

TRABALHO DE FORMATURA

Estudo sobre ferro fundido cinzento para blocos de motor com maior resistência ao desgaste

Aluno: Fernando Mantovani Iasi
Orientador: Prof. Paulo Sérgio C. Pereira da Silva

São Paulo - 1.996

Agradecimentos

Inicialmente, agradeço a Deus e a meus pais onde tudo começou.

Gostaria de agradecer também ao Prof. Dr. Paulo Sérgio C. P. da Silva, pela orientação e dedicação ao longo deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Hélio Goldenstein que, como co-orientador, forneceu também auxílio importantíssimo.

À Sociedade Técnica de Fundições Gerais - SOFUNGE -, que cedeu suas instalações, e que, apesar de fechada hoje, forneceu contribuições em minha formação que nunca serão esquecidas.

À Mercedes-Benz do Brasil, que também cedeu suas instalações para que alguns ensaios fossem realizados.

Ao Dr. Jan Vatauvuk pelo auxílio prestado.

Por fim, a todos os que durante este ano, muito importante em minha vida, estiveram presentes ao meu lado, e que de alguma forma me ajudaram.

Sumário

1. Justificativa do estudo	1
2. Introdução	1
3. Objetivo do trabalho	8
4. Revisão bibliográfica	9
<i>Definições e classificações de desgaste</i>	9
<i>Desgaste corrosivo</i>	10
<i>Desgaste adesivo</i>	10
<i>Desgaste abrasivo</i>	12
<i>Lubrificação</i>	23
<i>Desgaste lubrificado</i>	26
<i>Fadiga de contato</i>	30
5. Parte experimental	33
6. Resultados	37
7. Discussão e conclusões	44
8. Referências bibliográficas	49

Anexo

1. Justificativa do estudo:

Este trabalho visa estudar uma alteração microestrutural localizada nos blocos de motor, com camisa seca, utilizados em caminhões, de modo a se obter um produto final sem a camisa utilizada nos cilindros do bloco, e ainda com uma garantia de maior longevidade. O que se propõe é que na região interna dos cilindros se introduza, já no processo de fundição, uma camada de ferro fundido mesclado ou branco.

O material do qual é feito a camisa, hoje, é o CrMo250, segundo a norma DBL4403.00 (anexo 1).

Teria-se como pontos a favor desta alteração, a eliminação de um componente do bloco e uma etapa de montagem, redução da camada a ser usinada, barateamento do bloco, uma vez que este já sai com essa região quase pronta do processo de fundição, restando apenas a necessidade de realização de um brunimento, além de obter-se, naquela região, um material mais duro e, provavelmente, mais resistente ao desgaste.

Todavia são pontos desfavoráveis, a criação de uma interface na região dos cilindros, o que seria um ponto de fragilidade, a maior dificuldade de usinar um material mais duro, o desconhecimento do processo em relação ao controle da espessura desta camada durante a fundição, e o fato de ser um material com menor tenacidade que o utilizado hoje.

2. Introdução:

Nesta introdução, procurar-se-á enfatizar alguns aspectos importantes, envolvidos neste problema.

Os motores de combustão interna, apresentam um decréscimo de sua eficiência de funcionamento ao longo do uso, em virtude do contínuo desgaste de seus componentes mecânicos. Esse desgaste é tolerável até uma certa medida,

acima da qual, começa a ocorrer o não cumprimento das normas de funcionamento.

Desse modo, o "Desgaste", que tem sido definido como a "alteração indesejável e geralmente gradual da superfície de um componente mecânico com perda de material, como consequência de uma ação mecânica" ^[1], assistida ou não pelo meio ambiente, entra em cena como principal limitação de vida dos motores de combustão interna, em função também do difícil cumprimento das leis de emissões.

Os níveis de emissões gasosas^[1] cada vez mais baixos impostos pela legislação, têm conduzido à soluções que aumentam as cargas mecânicas e térmicas sobre os componentes, ao mesmo tempo que a sua durabilidade não pode ser comprometida, para que os níveis de emissões regulamentados possam ser atendidos ao longo da vida do motor.

Em função da maior solicitação dos motores, bem como a presença de revestimento nos anéis de primeiro canaleta, mais resistentes ao desgaste, configura-se uma condição de trabalho mais severa para a parede interna dos cilindros, principalmente na região do Ponto Morto Superior do primeiro anel (figura 1), onde as cargas são elevadas, e as condições de lubrificação críticas^[1].

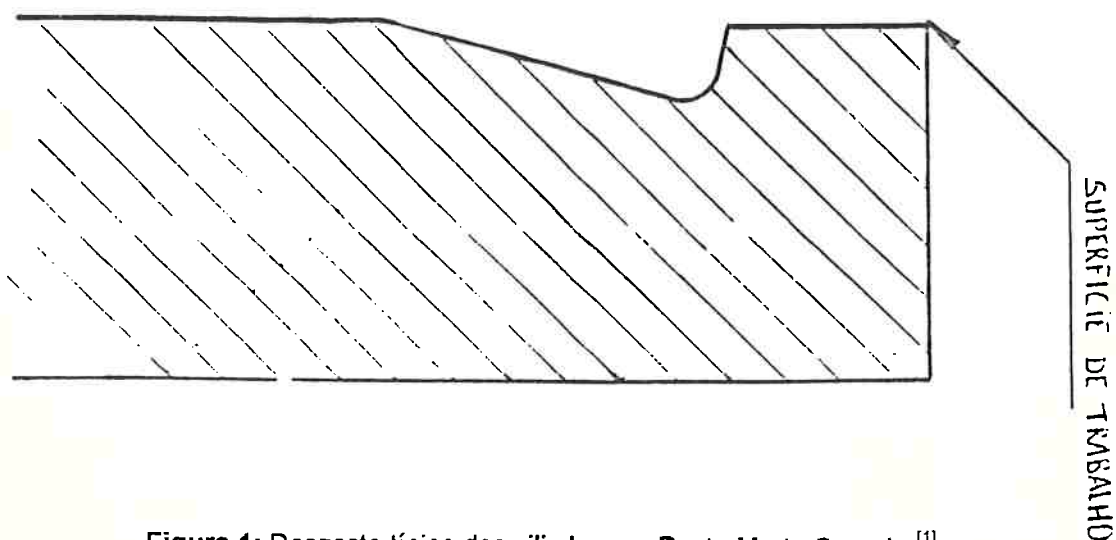


Figura 1: Desgaste típico dos cilindros no Ponto Morto Superior^[1]

Segundo Vatauvuk^[1], as temperaturas típicas de trabalho do conjunto anéis, pistão e cilindro podem chegar até 260°C; e a região mais exigida é onde se apoia o pistão durante o período de expansão no quinto cilindro. A situação pode se agravar com utilização de lubrificantes de baixo índice de alcalinidade associados a combustíveis com alto teor de enxofre, aumentando a incidência do componente de desgaste corrosivo.

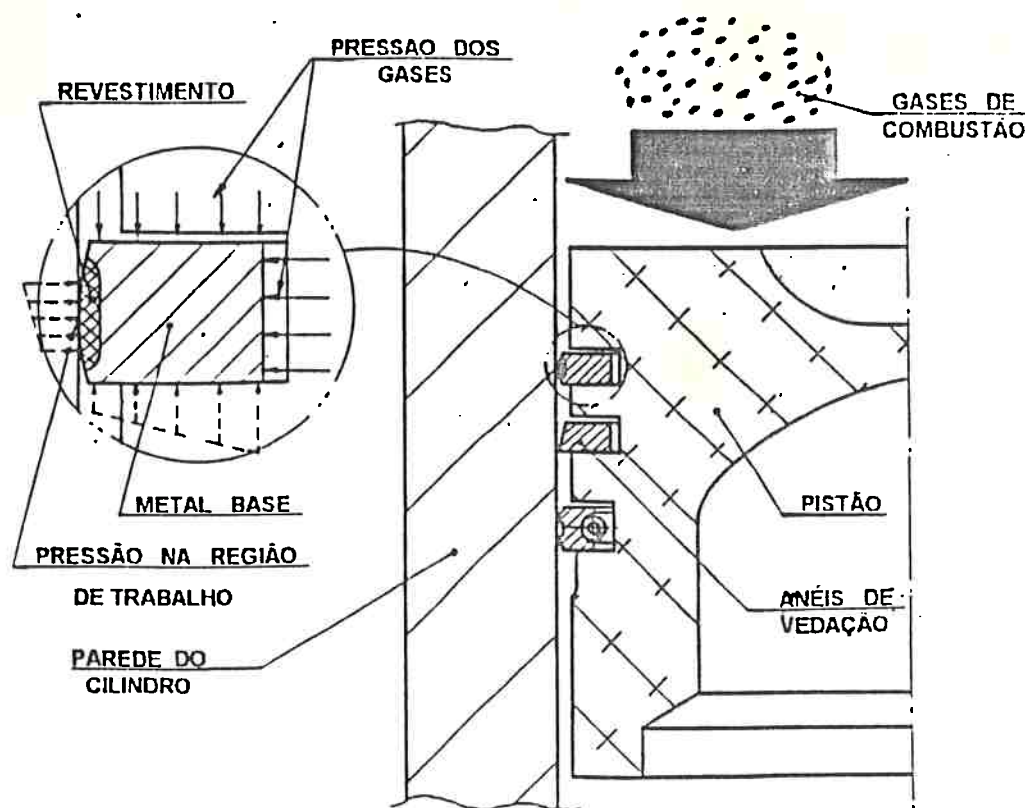


Figura 2: Representação esquemática do funcionamento do conjunto pistão, anéis e cilindro dos motores de combustão interna^[1]

Como pode ser visto as partes internas dos motores a combustão são expostas diretamente a altas temperaturas e pressões, e tem ainda contato com gases de combustão e impurezas provenientes dos combustíveis utilizados.

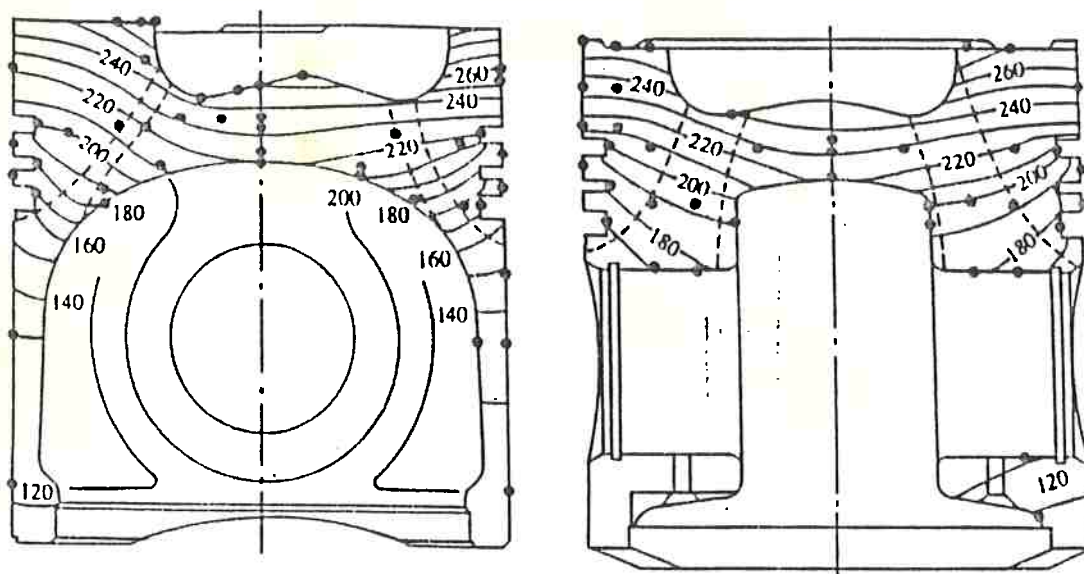


Figura 3: Perfis de temperatura (°C) em motores de combustão interna Ciclo Diesel^[1]

As partes mais críticas do bloco de motor a diesel são:

- *cabeça do cilindro*: é a parte mais importante do bloco. Contém as válvulas e suas passagens, e ainda é uma parte crítica no processo de fundição. Normalmente é de ferro fundido, mas pode ser de aço fundido; o último é mais difícil de ser fundido por ter coeficiente de expansão muito alto;

- *cilindro e camisa*: em alguns motores navais a cabeça do cilindro e a camisa são fundidas conjuntamente, mas usualmente são fundidas separadamente. A camisa é posicionada dentro do cilindro, é livre para expansão longitudinal, e tem a função de resguardar o bloco do motor naquela região altamente solicitada;

- *pistão*: Geralmente é fundido também. É a parte mais severamente testada, porque está sujeita, simultaneamente, a ação de altas temperaturas e pressões.

O bloco de motor que será estudado neste trabalho era originalmente fabricado em ferro fundido cinzento. A quantidade e forma do carbono no ferro fundido exerce grande influência em suas propriedades. Em todos os ferros fundidos cinzentos a maior parte de carbono presente é em forma de grafita, e o

restante é combinado como carboneto de ferro, geralmente como constituinte da perlita^[11]. Normalmente também, a grafita está presente em forma de veios. Estes veios podem ser grandes ou pequenos, abundantes ou dispersos, alinhados ou não, e exercem grande influência na resistência e usinabilidade.

Os blocos de motor a diesel utilizados neste trabalho, são fabricados com material GG 25; sua microestrutura é de um ferro fundido cinzento, no qual tem-se como fases finais a grafita lamelar, ou em forma de veios, do tipo A, que apresenta propriedades de dissipação de calor, amortecimento de vibrações, e outras favoráveis ao bloco; além disto, tem-se, na microestrutura também perlita e em menor quantidade ferrita.

O objetivo do trabalho é tornar a estrutura na região dos cilindros, que era anteriormente igual a de um ferro fundido cinzento, com o carbono presente na forma de grafitas lamelares, em uma estrutura mais próxima, ou igual, a de um ferro fundido branco, onde o carbono esteja predominantemente na forma de carbonetos.

O ferro fundido branco tem sido largamente utilizado como material resistente a abrasão. A resistência a abrasão do ferro fundido branco é determinada pela sua dureza e tenacidade. O carboneto é sem dúvida a fase mais importante, que afeta tanto a tenacidade como a dureza do ferro fundido branco. Ferros fundidos brancos com diferentes morfologias e estrutura de carbonetos são diferentemente afetados pelas aplicações a estes destinadas. Portanto, é muito importante o estudo destas em cada caso, em relação aos efeitos sobre as suas propriedades. O carboneto presente no ferro fundido branco não ligado, ou de baixa liga, é o Fe_3C ^[12].

A intenção é de se conseguir uma camada intermediária ao ferro fundido branco e ao ferro fundido cinzento: o chamado ferro fundido mesclado. Este ferro não é tão frágil quanto o ferro fundido branco, nem tem fragilidade menor que o ferro fundido cinzento. O mesmo se pode dizer em relação a todas as outras propriedades dos ferros fundidos branco e cinzento. Com isto espera-se conseguir uma resistência a abrasão que passe a satisfazer as necessidades exigidas.

O sistema Fe-C apresenta dois eutéticos provenientes da existência de dois equilíbrios: estável e metaestável. O eutético estável é formado por austenita mais grafita, e o metaestável é constituído por austenita mais carbonetos^[5].

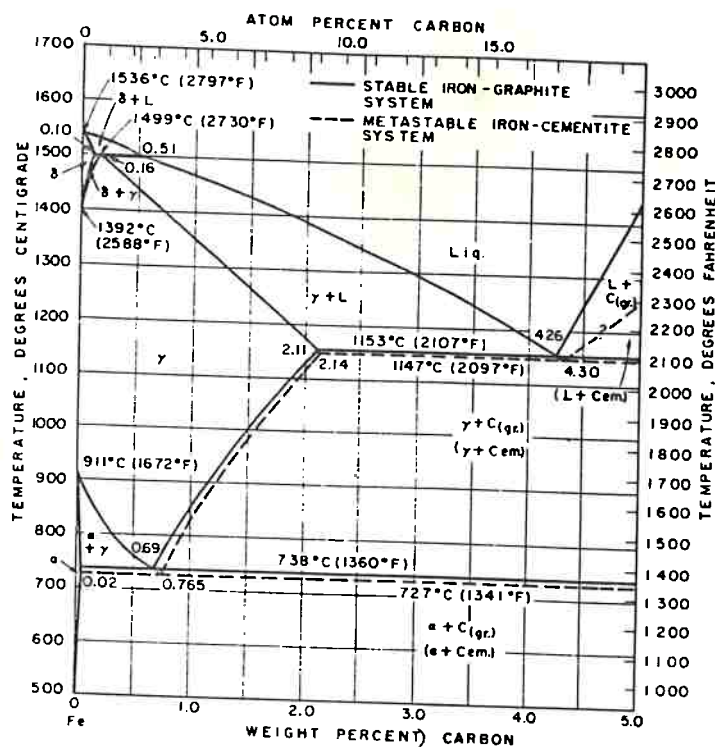


Figura 4: Seção do diagrama Fe-C^[4]

Segundo Hughes, em Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares^[5], o diagrama para o sistema Fe-C apresenta uma diferença de aproximadamente 7°C entre as temperaturas de equilíbrio do eutético estável e metaestável (segundo Minkoff^[4] essas temperaturas seriam 1148 e 1153°C), como pode ser observado, na seção referente às composições próximas ao ponto eutético, apresentado na figura 5.

Já a figura 6, ilustra curvas esquemáticas de resfriamento, com quantidades de superesfriamento crescentes da esquerda para a direita. A curva I representa a solidificação de um ferro fundido cinzento, a curva II uma solidificação parte como ferro fundido branco e parte como cinzento (ferro fundido mesclado), e a curva III a solidificação do material totalmente como ferro fundido

branco. A quantidade de superesfriamento depende da velocidade de extração de calor pelo molde, da composição química do material e do grau de nucleação do banho líquido^[6].

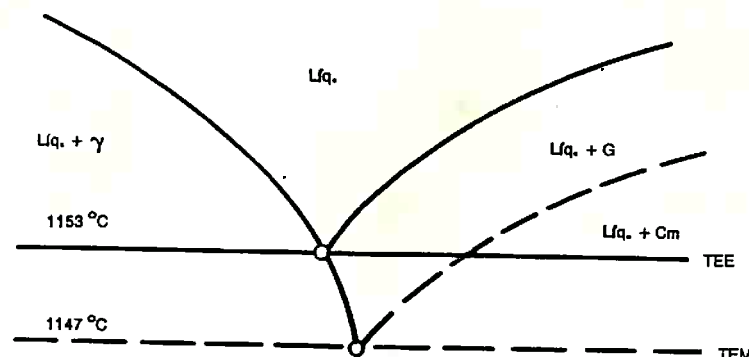


Figura 5: Seção próxima ao ponto eutético, no diagrama Fe-C indicando a temperatura para reação estável e metaestável^[5]

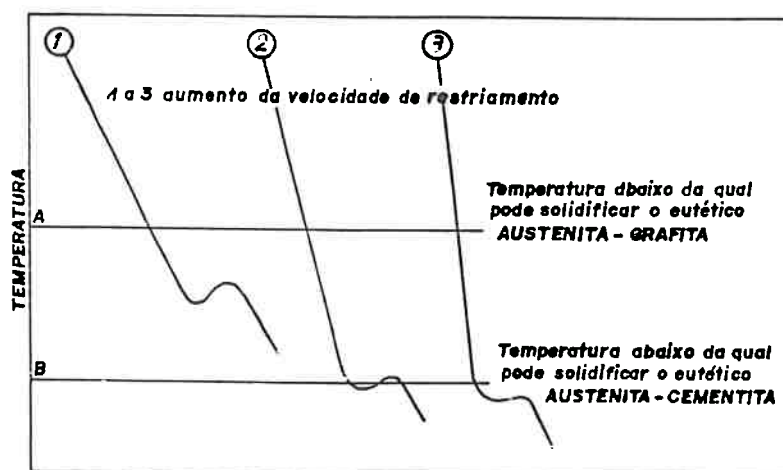


Figura 6: Curvas esquemáticas de resfriamento^[6]

A forma clássica de produzir uma peça de ferro fundido cinzento com uma camada de ferro fundido branco, para melhorar a resistência ao desgaste, seria a utilização de coquilhas ou resfriadores locais, que provocam um superesfriamento na região a ser coquilhada.

Uma outra forma, é a utilização de tintas a base de telúrio, como a TELLURIT-1 da FOSECO, que é uma tinta para aplicação em machos ou moldes de peças fundidas, e que tem ação coquilhante.

3. Objetivo do trabalho:

Este estudo, visa modificar a microestrutura dos cilindros do bloco de motor, e conseqüentemente melhorar as propriedades mecânicas dessa região, evitando-se assim o uso de camisas.

O projeto atual dos motores da Mercedes-Benz do Brasil, que levam camisa seca (OM366A e OM366LA) deixa como optativo o uso ou não de camisas, todavia, em função da longevidade do motor, 100% dos blocos produzidos são encamisados (estes dados também têm como fonte a Mercedes-Benz do Brasil).

Atualmente esses blocos produzidos são chamados de BR300, e apresentam alguns problemas como excesso de barulho e de emissão de gases, o que deve por lei ser sanado até meados do ano 2.000. Desta forma existe um projeto de implantação de um novo bloco que seria o BR900, o qual também não levaria camisa e o reforço dos cilindros seria feito por têmpera por indução. Estes blocos já são fabricados desta forma pela Mercedes-Benz na Alemanha. O estudo aqui abordado deve então apresentar alguma vantagem técnica ou de custo em relação ao BR900. O chamado bloco BR900 que viria a ser feito no Brasil, possui um projeto que especifica uma camada temperada de 0,5 até 1,0 mm; sendo assim a alteração microestrutural pretendida deve ter esta profundidade como ponto de referência.

4. Revisão bibliográfica:

Definições e classificações de desgaste:

Podemos definir desgaste como sendo “a perda progressiva de substância da superfície de trabalho de um corpo em contato com outro, que ocorre como resultado de movimento relativo entre estas superfícies de contato”^[7]. O desgaste causa a ocorrência de pequenas partículas soltas, e provoca modificações no material e na geometria da camada superficial solicitada tribologicamente^[7]. A norma ASTM, segundo Albertin^[7], também define como desgaste qualquer dano superficial, mesmo que não ocorra remoção de material.

Considerando as formas de interação superficial e as propriedades das substâncias em contato, costuma-se identificar pelo menos quatro categorias de desgaste^[7]:

- Adesão: ocorre durante o deslizamento de duas superfícies de trabalho, através da formação e quebra de ligações interfaciais;
- Fadiga de superfície ou de contato: decorre da aplicação local de ciclos de tensões, levando à formação de trincas de fadiga;
- Reações triboquímicas (desgaste corrosivo): ocorre a formação de produtos de reação associada à ação mecânica de desgaste;
- Abrasão: quando a remoção de material é devida à ação de partículas ou protuberâncias duras que exercem uma ação de corte e deformação.

Dentro dos problemas e vantagens que a utilização dessa camada de ferro fundido branco poderia trazer ao bloco, deve-se destacar a resistência ao desgaste abrasivo (abrasão) e a susceptibilidade à fadiga de contato, os problemas mais críticos em função da alteração estrutural gerada; isto ficará mais claro com as explicações que virão a seguir.

Desgaste corrosivo^[1]:

É um tipo de desgaste, no qual uma reação química, ou eletroquímica com o meio, contribui para o aumento da taxa de desgaste.

Em alguns casos, as reações químicas ocorrem primeiramente em uma ou ambas superfícies atritantes. Os produtos de reação são geralmente fracamente aderentes, sendo de fácil remoção por ação mecânica (abrasão).

A ação mecânica pode eventualmente preceder a reação química, resultando na formação de pequenos fragmentos que reagem subsequente com o meio ambiente.

Para o caso dos motores de ciclo Diesel o desgaste crítico dos cilindros está confinado no Ponto Morto Superior, região de inversão de velocidade, dos anéis de primeiro canaleta, formando uma depressão como indica a figura 1, com conseqüente polimento junto a essa região. Segundo Jakobs, em Vatauvuk^[1], nos motores de ciclo Otto não aparece tal desgaste localizado, a exceção dos motores com blocos de alumínio não encamisados.

Desgaste adesivo^[1]:

O comportamento químico das superfícies é um fator que deve ser levado em conta, quando se pensa em superfícies em contato. Os componentes da atmosfera na qual as superfícies estão expostas reagem com estas, sendo um fator tribológico de importância fundamental.

Sabe-se que, quando duas superfícies estão em contato, a área real é muito menor do que a área aparente, sendo que na realidade uma quantidade relativamente pequena de protuberâncias chegam a interagir, como mostra a figura 7, baseada em diagramas de rugosidade.

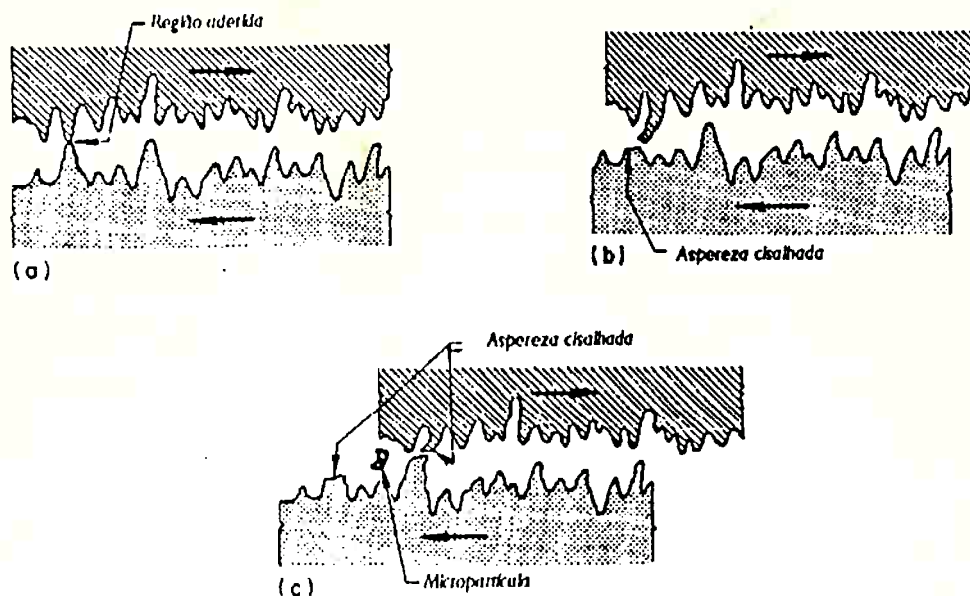


Figura 7: Esquema ilustrativo, em escala de rugosímetro, de como uma partícula é gerada durante desgaste abrasivo^[13]

Ao aplicar carga normal estaticamente, a pressão local nas protuberâncias torna-se extremamente elevada. O limite de escoamento é excedido, estas deformam-se plasticamente, até que a área real de contato aumente o suficiente, para suportar o carregamento elasticamente.

As protuberâncias podem aderir, e caso a resistência ao cisalhamento das "soldas" formadas seja alta, poderá ocorrer deformação plástica dentro de um dos materiais, ou ambos. A ruptura nessa região, geralmente transfere material de uma superfície para outra. Essa transferência não produz uma partícula instantaneamente, mas pode ser removida da superfície em movimentos relativos subseqüentes, como visto na figura 7.

O desgaste adesivo é mais freqüente em condições de atrito seco, ou não lubrificado, onde as duas superfícies de contato são metálicas^[13]. O desgaste adesivo pode ocorrer em contato lubrificado, mas em escala muito menor do que na ausência de lubrificação^[13].

Desgaste abrasivo:

Segundo a ASM^[3] o desgaste abrasivo é definido como uma decorrência da presença de partículas ou saliências duras que são forçadas contra uma superfície sólida e possuem movimento relativo entre si. O desgaste é o dano produzido nesta superfície e geralmente envolve uma progressiva perda de material devido principalmente ao movimento relativo entre a superfície e estas partículas duras.

O desgaste abrasivo é o mais destrutivo, produzindo as maiores perdas nos menores intervalos de tempo^[7].

O desgaste abrasivo pode ocorrer em duas situações^[1]:

- a) perda de material por parte de uma superfície, quando atritada com outra de maior dureza.
- b) partículas duras com movimento relativo em relação a duas superfícies atritantes, gerando maior remoção de material na de menor dureza. Nesse caso, as partículas podem ser encrustadas em uma das superfícies, gerando abrasão na outra.

Para o caso de desgaste abrasivo ocasionado por duas superfícies atritantes, é necessário além de uma maior dureza, uma certa rugosidade por parte do material de maior resistência^[1].

O desgaste abrasivo, tem sido minimizado através da melhora do acabamento das superfícies, assim como pelo controle da rugosidade dos componentes^[13]. Um exemplo desse fato em motores de combustão interna, é a necessidade de baixa rugosidade lateral ($R_z \sim 0,5$) nos anéis de aço inoxidável martensíticos nitretados. Em caso contrário, ocorre aumento do desgaste abrasivo nos canais de Al-Si^[1], onde estão alojados estes anéis.

O desgaste abrasivo gerado por partículas soltas, pode ocorrer em virtude de^[1]:

- a) partículas de metal de alta dureza geradas pelo atrito em uma superfície de maior dureza.
- b) partícula de metal de alta dureza produzidas pelo desgaste adesivo.

c) partículas oriundas da atmosfera, na forma de pó ou areia.

As duas primeiras são chamadas de abrasão secundária, e a última de abrasão primária, atribuindo-se a esta a maior responsabilidade pelo desgaste^[13] nos motores de combustão interna, de onde a importância dos filtros de ar e de óleo nesses motores, segundo Halling em Vatavuk^[1].

A figura 8 representa os mecanismos de desgaste, referentes a abrasão por dois corpos e a abrasão por três corpos. O contato tipo dois corpos ocorre quando um elemento abrasivo desliza sobre uma superfície. No caso do três corpos, o elemento abrasivo é capturado entre duas outras superfícies com movimento relativo entre si.

O desgaste é uma propriedade de difícil previsão, visto que não depende apenas do material, mas do sistema de materiais^[10].

Segundo Zum Ghar^[10], o desgaste produzido por uma partícula abrasiva pode advir de microcorte, ou por um processo de fadiga quando ocorre o microsulcamento. Quando o material que sofre abrasão é frágil, ocorrem microsulcamentos. A figura 9 ilustra os mecanismos propostos.

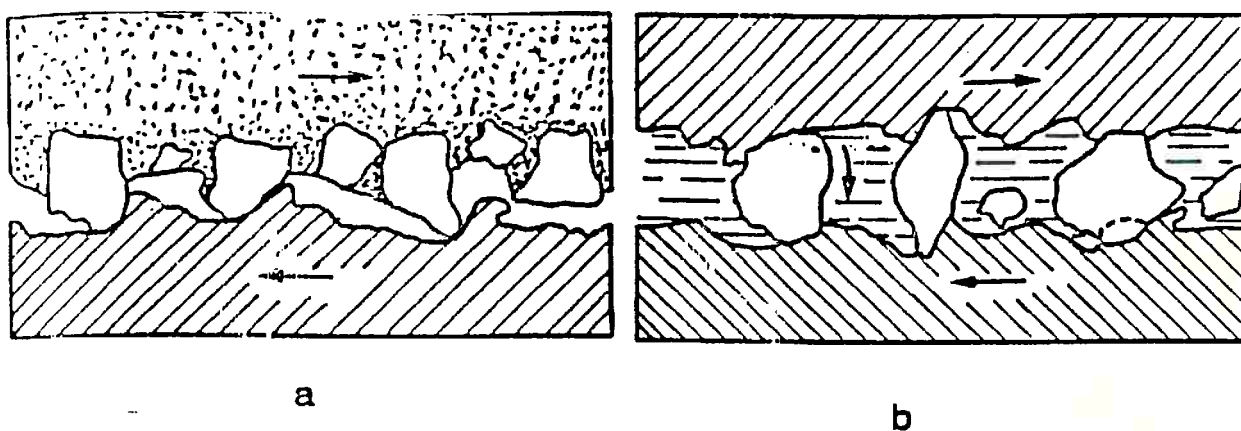


Figura 8: Representação esquemática de abrasão de dois corpos (a) e de três corpos (b)^[1]

A abrasão pode eventualmente ser diminuída pela interrupção dos riscos (microcorte, microsulcamento) em partículas duras dispersas na matriz, sendo importante o tamanho relativo entre os riscos e as partículas duras, segundo Kasel e Fiore, em Vatavuk^[1].

Segundo Vatauvuk e Goldenstein, em Vatauvuk^[1] papel das partículas duras (tais como carbonetos formados durante a solidificação), tem sido investigado intensamente, sendo importante o controle de sua morfologia, devendo consistir de partículas discretas, descontínuas, para que eventuais trincas não tenham percurso contínuo nestas.

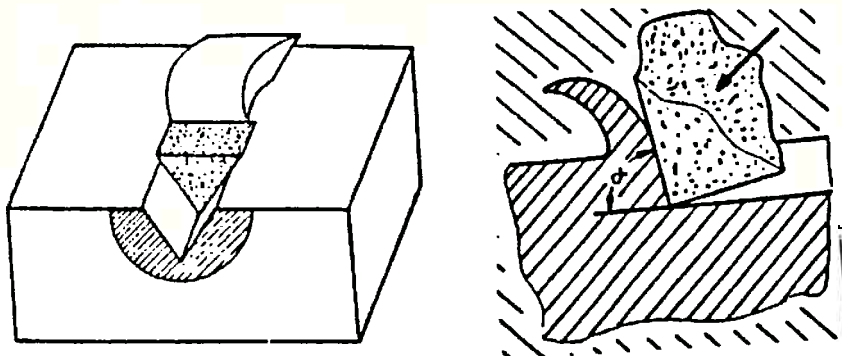
Vários outros mecanismos estão envolvidos na remoção de material de uma superfície quando ocorre abrasão. Dentre eles pode-se citar: fratura, fadiga e fusão.

O desgaste abrasivo é, geralmente, acelerado quando o meio em que ocorre apresenta condições corrosivas^[3]. A abrasão cria superfícies novas que são rapidamente corroídas, sendo a camada protetora de óxidos continuamente removida pela abrasão, aumentando desta forma a taxa de desgaste. No caso de motores de combustão interna, as condições corrosivas são originadas basicamente pelos subprodutos da combustão^[3].

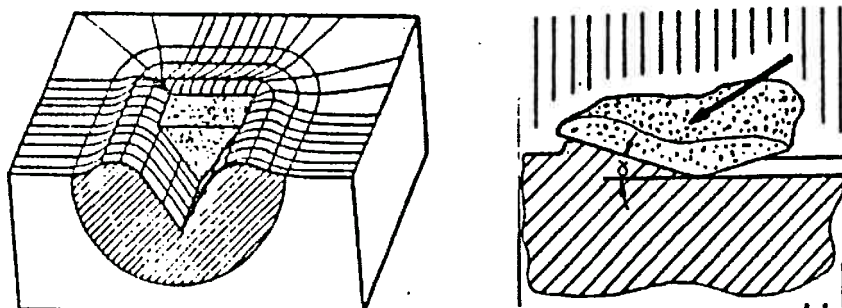
É importante considerar a dureza do abrasivo em relação à dureza da superfície do metal atritado. Segundo Krushov, em Vatauvuk^[1], quando a dureza da superfície dividida pela dureza da partícula atinge o valor de 0,8, ocorre uma transição com aumento da taxa de desgaste.

A forma do abrasivo é também importante, podendo passar de sulcamento, para corte, quanto a partícula abrasiva fraturar formando cunhas^[10].

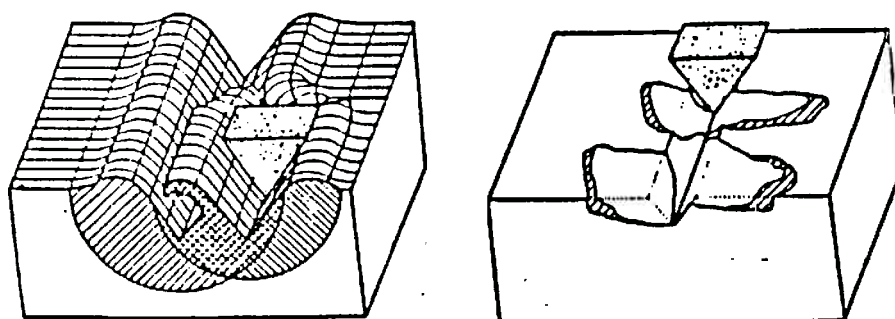
Krushov, segundo Vatauvuk^[1] estudou a relação entre a dureza dos materiais e sua resistência ao desgaste. A figura 10 apresenta uma série de materiais ensaiados em teste de pino contra disco, atritando lixa de carboneto de silício.



Microcorte.



Microsulcamento



Microfadiga

Microlascamento

Figura 9: Micromecanismo de desgaste abrasivo^[1]

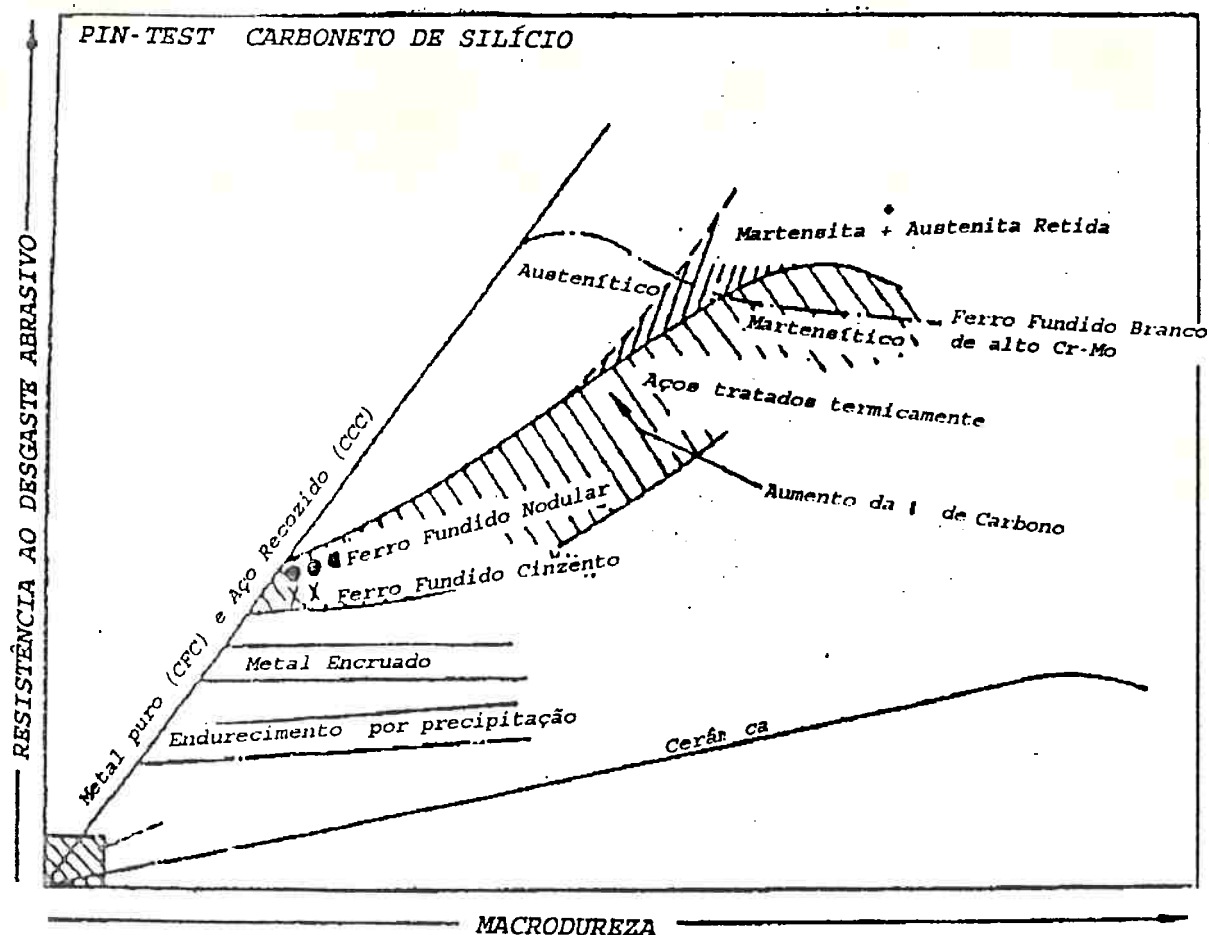


Figura 10: Desgaste em função da dureza em teste pino e disco em carboneto de silício^[1]

Observando-se a figura então, que para o mesmo nível de dureza dos ferros fundidos nodulares são mais resistentes ao desgaste abrasivo em relação aos cinzentos, o que aparentemente está relacionado com a maior tenacidade dos primeiros. Todavia, devemos notar que a resistência à abrasão do ferro fundido branco é muito maior, enquanto sua tenacidade é menor.

Quando as taxas de desgaste são muito pequenas, como é o caso de cilindros e anéis de pistão de motores de combustão interna ($0,01/0,1 \mu\text{m}$ por hora, ou 10^{-7} a $10^{-6} \mu\text{m}/\text{ciclo}$)^[1] e se utilizam materiais de estrutura complexa, a relação entre desgaste e tenacidade é de difícil caracterização.

As características do material considerado como abrasivo determinarão a taxa de desgaste dos materiais do sistema tribológico. Se a dureza das partículas

abrasivas for maior que a dureza do material, ela poderá penetrá-lo e removê-lo sem que suas características geométricas (por exemplo, ângulo de ataque, cantos quebrados, arredondados, etc.) sejam alteradas. A forma das partículas determinará o formato da cavidade produzida no material contra-atritante, e também a pressão real de contato^[1].

A resistência da superfície do abrasivo também determinará a capacidade de remoção de material. Quanto maior a resistência, maior a capacidade de remover material. A temperatura de trabalho influencia na dureza e na tensão de ruptura dos materiais, alterando assim as condições de desgaste quando em funcionamento.

Há uma excelente correlação linear entre dureza do material e resistência ao desgaste no caso de materiais monofásicos, como metais puros, e para alguns aços recozidos^[1]. Nestes sistemas, o desgaste decorre basicamente da penetração e deslocamento do abrasivo, sendo o volume removido diretamente proporcional à carga aplicada e inversamente proporcional à dureza.

No caso de materiais heterogêneos, o comportamento é basicamente o mesmo, verificando-se, entretanto, deslocamentos devido à composição microestrutural. Admitindo-se uma microestrutura composta de matriz mais carbonetos, é de se esperar que, para uma mesma dureza do material como um todo, a dureza da matriz seja mais baixa. Na prática, as variações microestruturais e fatores como a tenacidade do material e do abrasivo, as tensões aplicadas e flutuações estatísticas das propriedades do material e do abrasivo provocam deslocamentos de diversos tipos no aspecto das curvas da figura 11, mantendo-se, entretanto, sua validade em linhas gerais^[7].

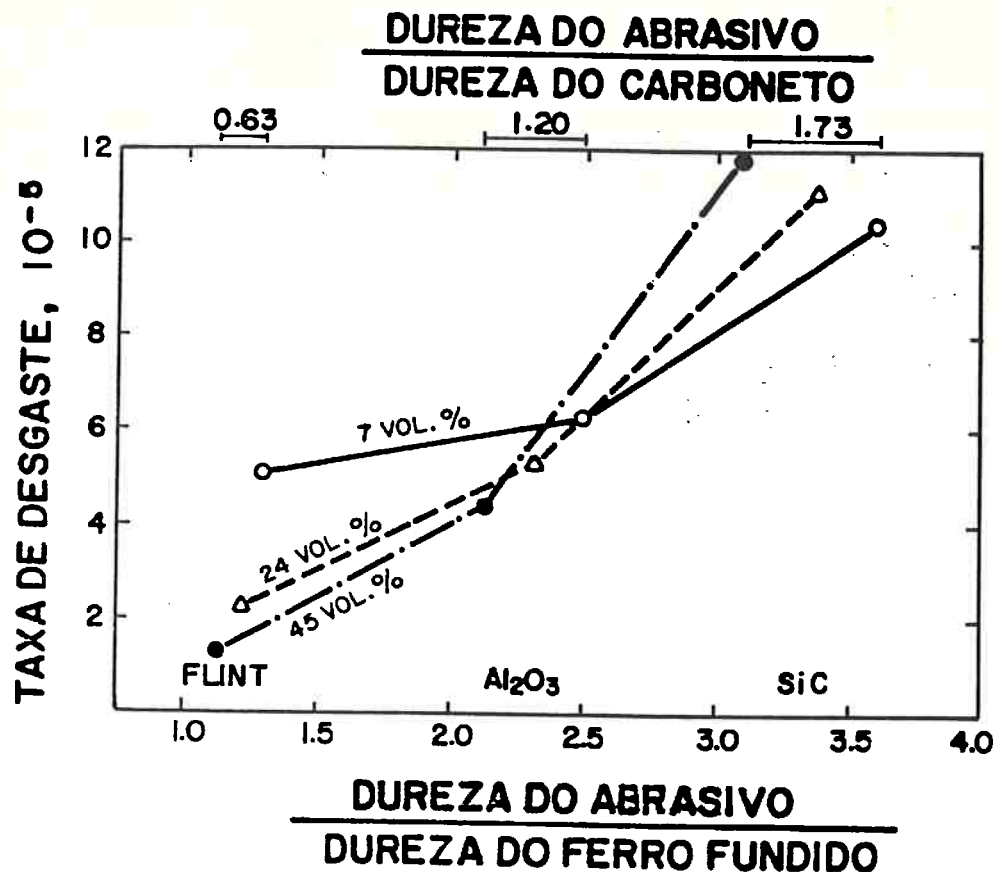


Figura 11: Taxa de desgaste do FFBAC em função da relação entre dureza do abrasivo e dureza dos carbonetos^[7]

Os resultados de taxas de desgaste abrasivo serão fortemente influenciados pela deformação plástica a que o material desgastado foi submetido no sistema tribológico. A relação entre microcorte e microsulcamento é afetada por essa deformação e pode ser expressa pelo seguinte fator^[10]:

$$f_{ab} = [A_v - (A_1 + A_2)] / A_v$$

cujo significado pode ser ilustrado na figura 12.

Consegue-se então estabelecer uma seqüência lógica de resistência ao desgaste em função da dureza, utilizando-se o parâmetro f_{ab} , e considerando-se a dureza do material após sofrer a ação de desgaste, como se vê na figura 13.

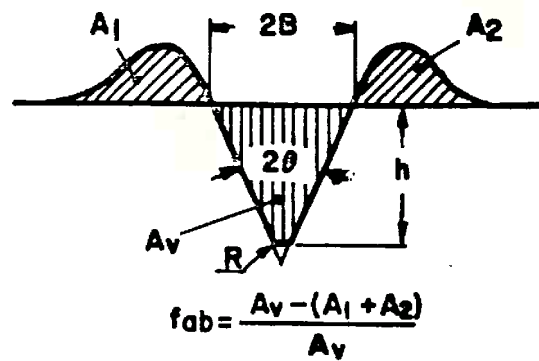


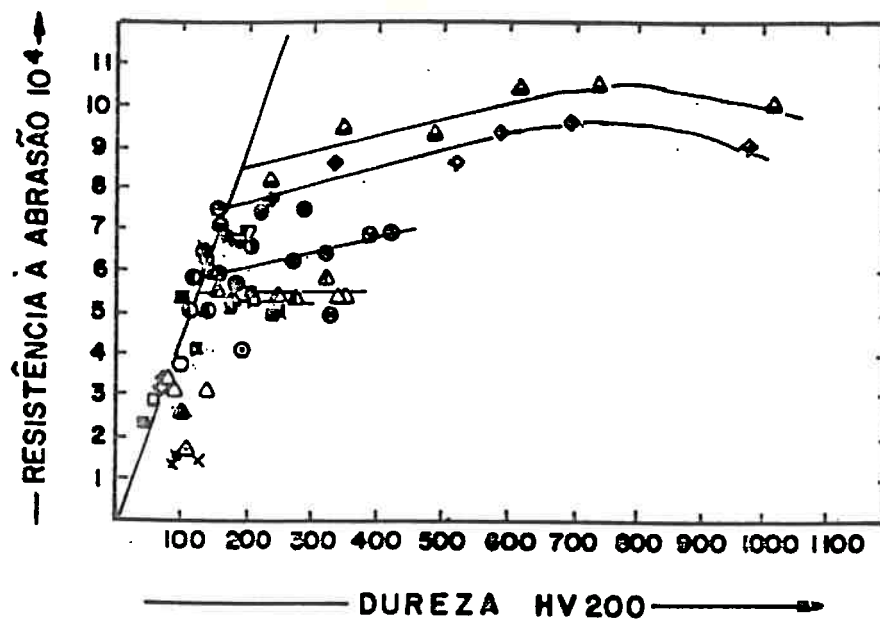
Figura 12: Definição de f_{ab} [9]

A tenacidade do material e de seus microconstituintes é fator importante na determinação da taxa de desgaste abrasivo à medida em que condiciona a entrada de um sistema tribológico no campo de atuação do mecanismo de microtrincamento. Zum Gahr^[10] verificou a existência de máximos nas curvas de resistência ao desgaste em função da tenacidade à fratura, de ferro fundido branco de alto cromo, conforme mostra a figura 14. Inicialmente, o aumento da tenacidade leva a maior resistência ao desgaste. Entretanto, a partir de um certo valor, como o ganho de tenacidade ocorre às custas da dureza, a resistência ao desgaste passa a diminuir. Esta transição é determinada por um conjunto de fatores compreendendo a microestrutura do material, as propriedades do abrasivo e a intensidade da sollicitação. Maiores pressões e abrasivos mais duros ou de maior tamanho deslocam o máximo de resistência ao desgaste para maiores valores de tenacidade, o que é acompanhado por decréscimo do valor dessa resistência. Esses efeitos são diretamente correlacionáveis com as contribuições desses fatores no estabelecimento do mecanismo de microtrincamento^[7].

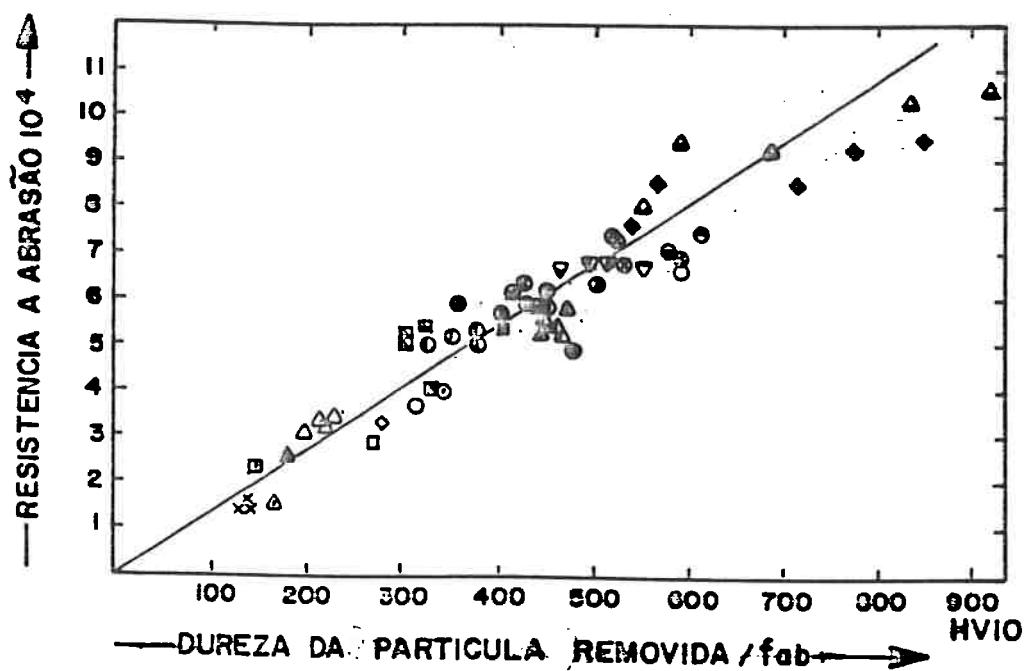
Algumas características microestruturais como a fração volumétrica, o tamanho e a distribuição de cada fase e as propriedades específicas de cada uma delas são de grande importância no comportamento do desgaste abrasivo num determinado sistema tribológico^[7].

As respostas podem ser muito diferentes, observando-se por vezes algumas inversões quando se compara com comportamento dos materiais

homogêneos, por exemplo a ocorrência de maiores taxas de desgaste com o aumento de dureza^[7].



(a)



(b)

Figura 13: Resistência ao desgaste em função da dureza: (a) dos materiais antes do ensaio; (b) dos cavacos removidos/ f_{ab} ^[7]

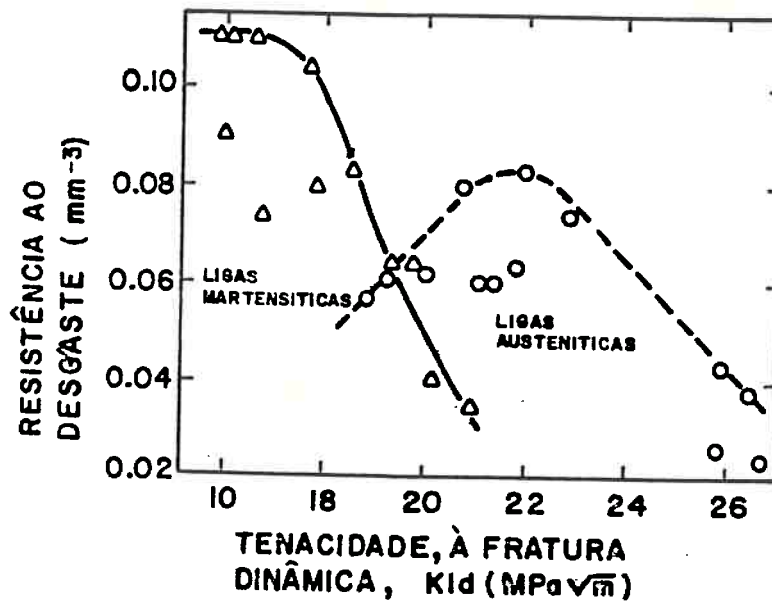


Figura 14: Resistência ao desgaste (roda de borracha) e tenacidade à fratura de ligas Fe-C-Cr-Mo martensítico e austenítico^[7]

No caso de aços ou ferro fundidos, podem-se distinguir três situações quanto à relação entre durezas, conforme Albertin, em Carvalho^[9]:

- a) a dureza do abrasivo é maior que a da matriz e menor que a do carboneto;
- b) a dureza do abrasivo é menor que a da matriz;
- c) a dureza do abrasivo é maior que a dos carbonetos.

No que se refere a interação entre os microconstituintes, destacam-se as seguintes situações^[9]:

- a) os carbonetos protegem a matriz metálica do ataque abrasivo, interrompendo o deslocamento dos grãos abrasivos sobre a superfície. Um efeito colateral nesta situação é a limitação do encruamento da matriz.

Se as distâncias entre os carbonetos forem pequenas em relação ao tamanho do abrasivo, sua penetração na matriz é dificultando, o que limita ainda mais o desgaste abrasivo.

b) a matriz pode oferecer ou não sustentação adequada aos carbonetos. Em caso negativo, os carbonetos ficam sujeitos a deformação excessiva, decoesão e trincamento.

Com relação aos micromecanismos, pode-se utilizar a figura 15 para interpretar o efeito dos microconstituintes. A medida que aumenta a dureza do material, aumenta a participação do mecanismo de microcorte, que contribui para uma maior taxa de desgaste. Por outro lado, diminui a penetração do abrasivo da matriz, o que reduzirá o desgaste. O resultado final vai depender do predomínio de uma dessas tendências em cada caso^[9].

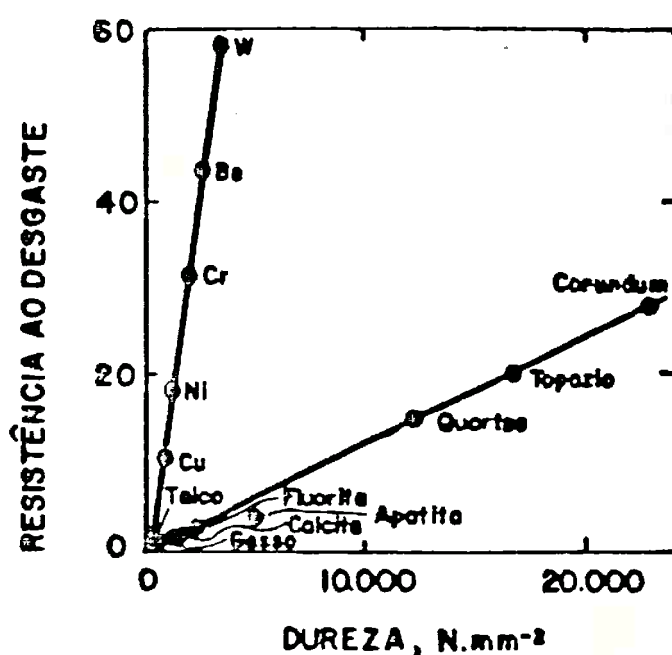


Figura 15: Resistência ao desgaste de metais puros e minerais em função da dureza^[9]

Uma combinação de cargas elevadas com abrasivos duros atuando sobre um material constituído por fases frágeis pode conduzir o sistema para a região onde ocorre o microtrincamento como principal mecanismo de desgaste^[9].

Outra situação típica em que se verifica a participação do microtrincamento ocorre com abrasivos de dureza maior que da matriz e menor que dos

carbonetos. O abrasivo corta a matriz, expondo os carbonetos em relevo até que estes são removidos por microtrincamento^[9].

Lubrificação^[9].

A lubrificação é o meio mais eficiente para reduzir o desgaste. A potência dissipada também é reduzida através da lubrificação^[1].

Fluidos lubrificantes têm três importantes efeitos na redução de atrito e desgaste de superfícies em deslizamento.

1. Eles fornecem um filme de baixa resistência ao cisalhamento entre as superfícies, desta maneira aliviando os efeitos da adesão.
2. Eles resfriam as superfícies, pelo efeito da redução de atrito e removendo calor por convecção. Com isso reduzem os efeitos térmicos prejudiciais como o amolecimento da superfície.
3. Em sistemas circulantes eles carregam muitos ou todos produtos de desgaste para fora da interface, reduzindo abrasão a três corpos da superfície por partículas encruadas ou oxidadas.

O desgaste abrasivo depende do contato direto sólido-sólido, e esse processo opera com fricção. Entretanto, se as superfícies em movimento puderem ser separadas por um filme lubrificante, como em mancais hidrostáticos e hidrodinâmicos, esse mecanismo de desgaste não pode operar. Na ausência de qualquer partícula abrasiva, mancais hidrostáticos podem operar indefinidamente, e os hidrodinâmicos desgastam somente numa fração da primeira revolução depois de cada *start-up*.

A lubrificação ocorre através da introdução entre as superfícies de deslizamento de uma camada de material com uma resistência ao cisalhamento inferior à das superfícies entre elas. Em alguns sistemas lubrificados, o lubrificante não pode prevenir completamente o contato entre as asperezas, embora ele o reduzirá e pode também reduzir as resistências das junções formadas. Em outros casos, o lubrificante separa completamente as superfícies e nenhuma junção de asperezas é formada.

Desta maneira, num menor ou maior grau, o uso de lubrificante sempre reduzirá a taxa de desgaste por deslizamento, e isto é um substancial benefício de lubrificação.

Existem portanto vários tipos de lubrificação. Para efeito do contato entre as superfícies podemos dividir a lubrificação em: hidrodinâmica, elastohidrodinâmica e limite.

a) Lubrificação hidrodinâmica: o filme de óleo lubrificante que separa as superfícies possui espessura maior do que a rugosidade combinada das duas, eliminando seu contato, minimizando o desgaste.

O atrito nesse caso é consequência do cisalhamento do filme lubrificante.

b) Lubrificação elastohidrodinâmica: neste caso, a soma das asperezas das superfícies atinge o valor da espessura do filme lubrificante, tornando possível o contato através do último, formando um filme de óleo muito fino entre as superfícies mais próximas.

Para esses dois casos, o desgaste dos sólidos é em geral consequência de tensões cíclicas aplicadas na superfície, estando relacionada ao fenômeno de fadiga de superfície.

c) Regime de lubrificação limite: em condições extremas, o filme de lubrificante pode tornar-se tão fino, a ponto de permitir contato direto entre os sólidos. Neste caso, qualquer separação das superfícies é dependente das moléculas aderidas às mesmas.

Os modos de lubrificação podem ser definidos através da figura 16.

Sob pressões de contato muito altas ou em velocidades de deslizamento muito baixas, forças hidrodinâmicas são insuficientes mesmo para manter um fino filme de lubrificante elastohidrodinâmico entre as superfícies, contato direto ocorrerá entre as asperezas. Altos atritos e taxa de desgaste então prevalecerão exceto onde as superfícies são protegidas por lubrificante limite.

As figuras 17, 18 e 19 apresentam esquematicamente situações de junções não lubrificadas, com espesso filme de lubrificante e lubrificação limite.

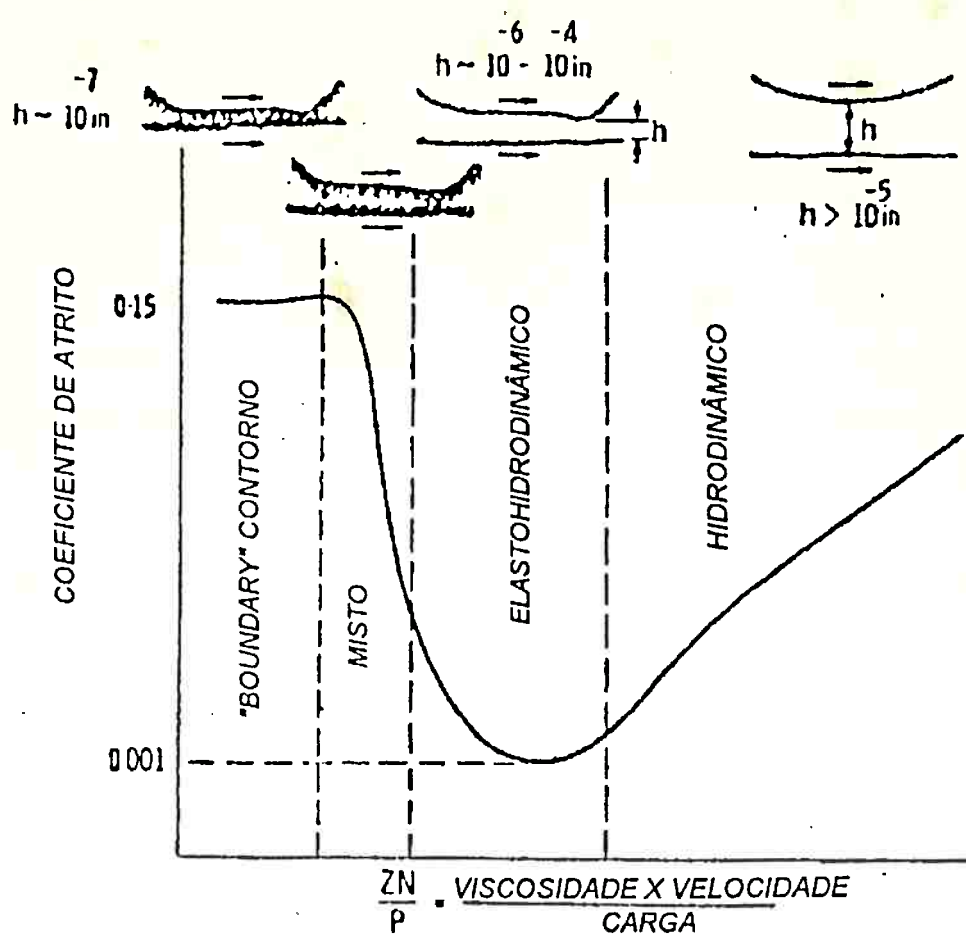


Figura 16: Esquema para os modos de lubrificação^[1]

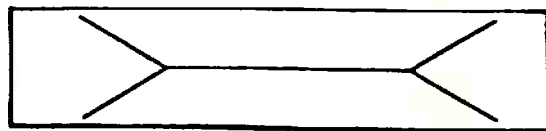


Figura 17: Uma junção não lubrificada^[9]

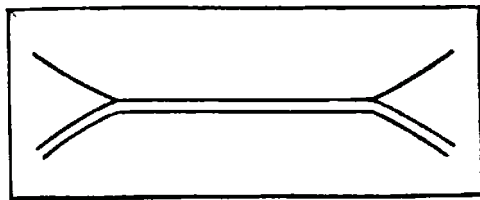


Figura 18: Uma junção com filme espesso de lubrificante^[9]

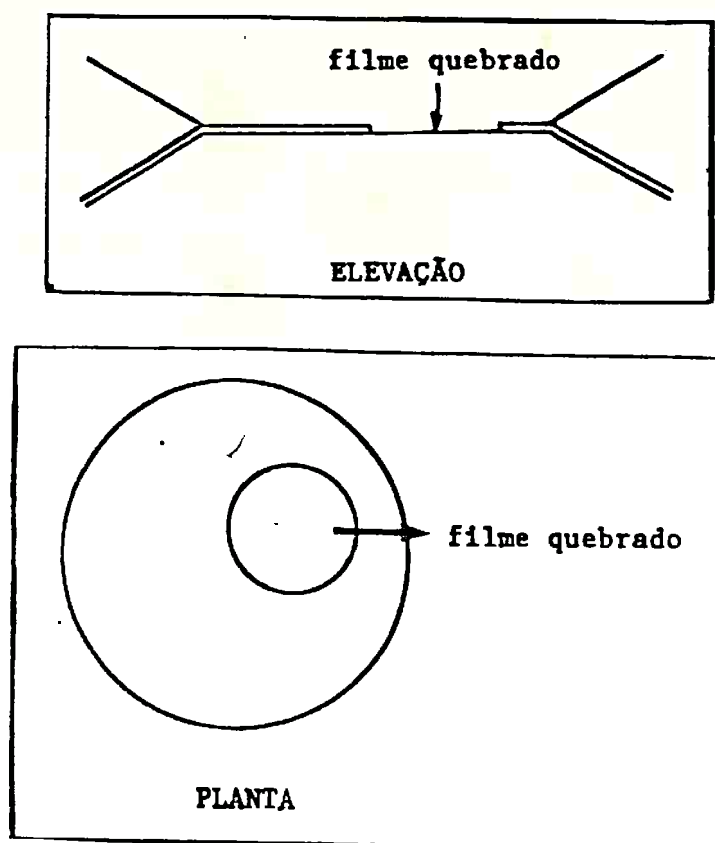


Figura 19: Vistas, elevação e planta, de uma junção hipotética mostrando filme lubrificante com quebra e área circular^[9]

Desgaste lubrificado:

O mecanismo de desgaste predominante na presença de lubrificação é o abrasivo, gerando riscos finos na direção do movimento relativo das superfícies atritantes. As partículas geradas pelo desgaste ficam em suspensão no óleo, podendo ser analisadas via espectroscopia. Essa técnica tem sido utilizada para monitorar as condições de componentes vitais em aeronaves e locomotivas^[13].

Quando as superfícies de contato dos corpos atritantes reagem com o meio (líquido ou gasoso) que as circunda, pode ocorrer um desgaste que Zum Ghar^[10] definiu como triboquímico, tendo dividido este em quatro categorias:

- a) Contato metálico (solda a frio) entre protuberâncias, ocorrendo remoção de material devido a adesão. Essas pequenas partículas podem ser oxidadas.
- b) Reação química entre os metais com o meio, cujos produtos reduzem o contato metálico.
- c) Quebra da superfície protetora devido à pressões locais elevadas, ou mesmo microfadiga, resultando em pequenas partículas não metálicas.
- d) Partículas metálicas e não metálicas podem aumentar a rugosidade das superfícies em contato por abrasão. A formação de uma nova camada protetora pode inibir o processo de abrasão e reduzir a rugosidade ao nível inicial.

A espessura da película de óleo é função da viscosidade (função da temperatura), da pressão e da velocidades dos anéis em relação aos cilindros. Além disso, a espessura é também função do perfil da face de contato dos anéis com os cilindros, segundo Halling, em Vataavuk^[1].

De acordo com Geehan, em Vataavuk^[1] a força de atrito varia ao longo do curso do pistão, sendo máxima nos pontos de reversão do movimento. O valor dessa força é função da viscosidade do óleo lubrificante, pressão de trabalho, velocidade relativa anéis/cilindros.

A força de atrito é ainda relativamente alta nas regiões de meio curso, onde a lubrificação é hidrodinâmica, o que indica o efeito do aumento da tensão de cisalhamento do óleo com o aumento da velocidade anel/cilindro, de acordo com Ting, em Vataavuk^[1].

Para que ocorra o contato metálico nos pontos de reversão, o óleo lubrificante, nessa região, deverá sofrer o *squeeze film* (expulsão da película de óleo, quando não há movimento relativo tangencial entre as superfícies) de acordo com Geehan, em Vataavuk^[1].

Programas de simulação das condições de funcionamento, mostram que para motores de ciclo Otto, a espessura da película de óleo no Ponto Morto Superior dos anéis de primeiro canaleta pode variar entre 0,1-0,3 μm , dependendo de variáveis, tais como, solicitação, viscosidade do óleo lubrificante, rotação e curso do pistão. Motores de ciclo Diesel devem apresentar

comportamento similar. Em função da dificuldade em sofrer o *squeeze film*, a menor espessura de óleo lubrificante deve ocorrer um pouco abaixo do Ponto Morto Superior, quando tem início a descida do pistão, de acordo com Tomanik, em Vataavuk^[1].

O regime de atrito varia durante o transcorrer de cada ciclo, indo de lubrificação longe da reversão, para elastohidrodinâmica quando a soma das asperidades (R_a) anel/cilindro atingem a espessura do filme de óleo, atingindo finalmente um contato mais generalizado limite nos pontos de reversão, onde ocorre maior desgaste, conforme Geehan, em Vataavuk^[1].

A espessura da película de óleo é também função do acabamento dos anéis, e principalmente dos cilindros que apresentam propositadamente um acabamento superficial chamado de brunimento, cuja principal função é reter óleo lubrificante mesmo em regiões distantes do cárter. Durante o amaciamento, a área real de contato é pequena, ocorrendo uma forte interação entre as asperezas, sendo as últimas removidas por desgaste adesivo, deformação plástica, até que a área real de contato se aproxime da área aparente, ocorrendo simultaneamente uma queda do coeficiente de atrito, segundo Halling, em Vataavuk^[1].

Para os anéis de pistão de motores de combustão interna, em particular nos de ciclo Diesel, as pressões durante a combustão pode atingir valores que vão desde 120 até 160 bar, para o caso de motores de alta potência específica^[1].

Outro fator a considerar é a proximidade da câmara de combustão (temperaturas elevadas) e o baixo nível de lubrificação no Ponto Morto Superior dos anéis de primeiro canaleta. Por essas razões é usual revestir o metal base, com materiais que vão desde o cromo eletrolítico, até a cerâmica aspergida^[1].

Até a segunda guerra mundial, os anéis de pistão não eram recobertos, porém com a maior necessidade de resistência aos desgastes de motores no deserto da África, começou a se revestir com cromo duro (eletrolítico), muito bom para resistir ao desgaste abrasivo, porém não eficaz no que se refere ao desgaste adesivo^[1].

Com a ampliação da pavimentação das rodovias em nível mundial e motores com maior potência por cilindrada, entram em cena os anéis de primeiro canaleta revestidos com molibdênio aplicado por aspersão térmica no final da década de 50^[1].

Com a evolução dos motores com potência cada vez maior e mais leves, tornou-se necessário materiais ainda mais resistentes. A partir da década de 70, começou a se utilizar a sinergia de materiais diversos, junto com o molibdênio, na forma de pós aplicados por *plasma spray*, segundo Vatauvuk et al e Herman, em Vatauvuk^[1].

O desgaste dos anéis de pistão na face de contato com a parede dos cilindros, provoca um aumento da folga entre pontas (extremidades livres dos anéis), podendo promover um maior consumo de óleo lubrificante, assim como uma excessiva passagem de gases da câmara de combustão para o cárter. A forma dos anéis é extremamente importante, devendo dentro do possível compensar o desgaste mais acentuado nas pontas. Vale lembrar que o revestimento pode desaparecer nessa região (desgaste mais acentuado) expondo o material base, que poderá fatalmente sofrer *scuffing*, segundo Laugênio, em Vatauvuk^[1].

Segundo Ishizuki, em Vatauvuk^[1], estudando motores Diesel *heavy duty* (diesel pesado), conclui que entre os componentes, anéis, pistões e cilindros, os últimos apresentam efeito incomparavelmente maior sobre o consumo de óleo ao sofrerem desgaste. Este é medido nos cilindros através da área polida, e pelo desgaste localizado no Ponto Morto Superior. Por Mc Geehan, em Vatauvuk^[1], o polimento dos cilindros torna-se ainda mais crítico para o consumo de óleo lubrificante, quando atinge todo o curso dos anéis.

O polimento dos cilindros é aumentado pela presença de depósitos de carbono resultante do processo de combustão nos motores de ciclo Diesel, podendo ser minimizado utilizando pistões com diâmetro menor na região acima dos anéis de primeiro canaleta, ou fazendo uso de um Diesel com baixo enxofre.

O desgaste localizado no Ponto Morto Superior é indesejável e, um valor típico aceito como máximo é de 75µm para motores Diesel pesado. Após atingir

esse valor as camisas devem ser trocadas. Na prática é comum valores de calo que se aproximam de 0,5 mm em motores Diesel pesado com alta quilometragem, em final de vida^[1].

Fadiga de contato:

Fadiga de contato ou "pitting", como é normalmente chamada, é a deterioração das superfícies de contato com o aparecimento de trincas subsuperficiais ou superficiais.

A distribuição das tensões de contato (tensões hertzianas) esta relacionada com os movimentos relativos das superfícies. Em rolamento puro, as tensões máximas de cisalhamento ocorrem em posições abaixo da superfície, onde é esperado o início das trincas de fadiga. Com a presença de deslizamento entre as superfícies de contato, o perfil de tensões é alterado por causa das tensões de cisalhamento geradas pelo movimento relativo entre as duas superfícies. Streng, em Faria^[8], propôs um modelo onde as tensões se sobrepõem gerando tensões de cisalhamento alternadas na superfície, conforme figura 20.

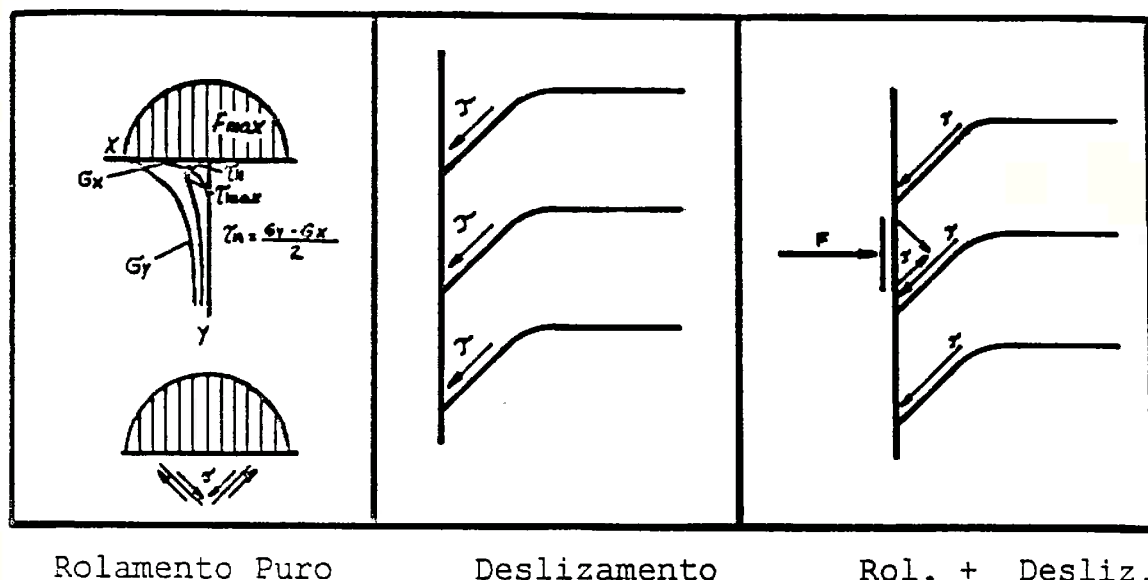


Figura 20: Geração das tensões de cisalhamento devido ao rolamento e ao deslizamento^[8]

A presença de escorregamento no movimento dos flancos dos dentes das engrenagens normalmente provoca a nucleação das trincas de fadiga de contato na superfície. O mecanismo de nucleação das trincas de fadiga superficial pode ser dividido em dois tipos, tomando-se por base a condição superficial dos corpos em contato. As trincas podem ocorrer em razão de defeitos superficiais como ranhuras ou sulcos, ou devido a colisão de "micro-saliências" (rugosidade elevada) sob condições pobres ou deficientes de lubrificação. O mecanismo de fadiga superficial está ilustrado na figura 21. No primeiro tipo de fadiga superficial, as trincas se originam nos defeitos superficiais e propagam-se ao longo de um plano inclinado em relação à superfície. Para o mecanismo de micro-saliências ocorrem repetidas colisões dos pontos mais elevados gerando trincas que usualmente resultam em pequenos pites. Para ambos os mecanismos de fadiga superficial, a condição de lubrificação e acabamento superficial são fundamentais na vida das superfícies em contato^[8].

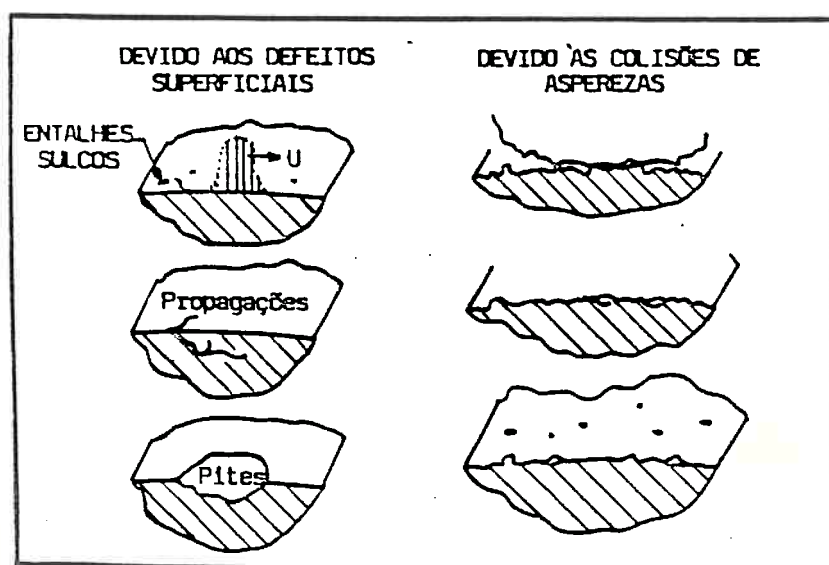


Figura 21: Mecanismo de fadiga superficial^[8]

Pode-se observar^[8] que a fadiga de contato deverá ocorrer em superfícies sujeitas a tensões de tração, ou seja, submetidas a deslizamento negativo.

Deve-se agora mostrar qual a relação entre a situação, ou problemas, descrita(os) acima, e o caso que está se estudando.

Pelo próprio funcionamento do pistão, no cilindro do bloco de motor, existe a ocorrência de picos de pressões transversais à parede do cilindro, principalmente no primeiro anel do primeiro canaleta.

Quando fala-se em fadiga de contato, pensa-se no deslocamento de carga por rolamento, como no caso de engrenagens, e como já foi citado acima.

Pelo fato de termos pressões localizadas no cilindro do bloco de motor, pode-se fazer uma analogia entre a sollicitação a que a camada coquilhada (no caso estudado) do cilindro está submetida, com a sollicitação a que a camada cementada está submetida em engrenagens ou rolamentos; surge daí então, a preocupação com a fadiga de contato, problema comum em camadas cementadas.

Tal situação é agravada, pelo fato de ter-se triaxialidade de tensões na interface, o que pode também causar um descolamento da camada coquilhada. Esta triaxialidade de tensões na interface pode ser rapidamente explicada da seguinte forma: a camada de ferro fundido branco solidifica antes, desta forma a superfície fica com tensões residuais de compressão, mas temos, em compensação tensões residuais radiais de tração; analisando mais a fundo ainda, e que não cabe aqui, a triaxialidade na interface é de tração.

Uma causa de toda esta situação, estaria também relacionada a falta de sustentação que a camada coquilhada poderia ter pela diferença entre os módulos de elasticidade do ferro fundido branco e o cinzento. Sendo assim, a camada coquilhada sofreria pequena deformação para uma dada tensão, ao mesmo tempo a camada de cinzento abaixo sofreria deformação maior não dando sustentação a camada externa, e conseqüentemente, podendo causar o início de trincas subsuperficiais na interface; trincas estas que cresceriam no sentido do centro do cilindro.

5. Parte experimental:

No estudo que começou aqui a ser desenvolvido, a idéia inicial é de eliminar a camisa com um reforço na região já no processo de fundição do bloco. Busca-se uma certa quantidade de precipitados de carbonetos na região dos cilindros através de uma ação coquilhante. TELLURIT-1 é uma tinta para fundição fornecida pela FOSECO, para ser aplicada em áreas de moldes ou machos onde se deseja uma superfície coquilhada na peça fundida, ou seja, esta tinta funciona como um meio promotor de coquilhamento, e esse coquilhamento pode chegar a 3mm. Devemos lembrar ainda que o telúrio é volatilizado a 994°C, e que é tóxico em concentrações superiores a 0,1mg/m³[2].

Segundo o Eng. Ricardo Nunes, gerente da área de tintas da FOSECO, não é a espessura da camada de tinta que provoca maior ou menor coquilhamento da peça. A profundidade de coquilhamento é função, principalmente, do projeto de alimentação da peça (turbulência na região a ser coquilhada poderia “diluir” este coquilhamento) e da liga a qual é composta a peça. Sendo assim, não existe uma “biblioteca” de informações dizendo como agir, ou para esta peça pode dar certo, ou nunca dará certo; a única forma de se obter essas respostas é através de experiências práticas com a peça em questão.

Segue como figura 22 um croqui simplificado do bloco que estamos tratando. Este bloco é fundido na posição horizontal, e os canais de ataque tem quatro entradas, todas elas pela região dos mancais (pontos assinalados na figura).

De posse das informações supra citadas, iniciou-se a parte experimental do trabalho, à fim de que se possa analisar o efeito da TELLURIT-1 no bloco estudado.

Nesta primeira etapa a aplicação da tinta se dá diretamente sobre o macho e nada é passado sobre ela, o que trouxe, como esperado, um acabamento superficial bastante ruim.

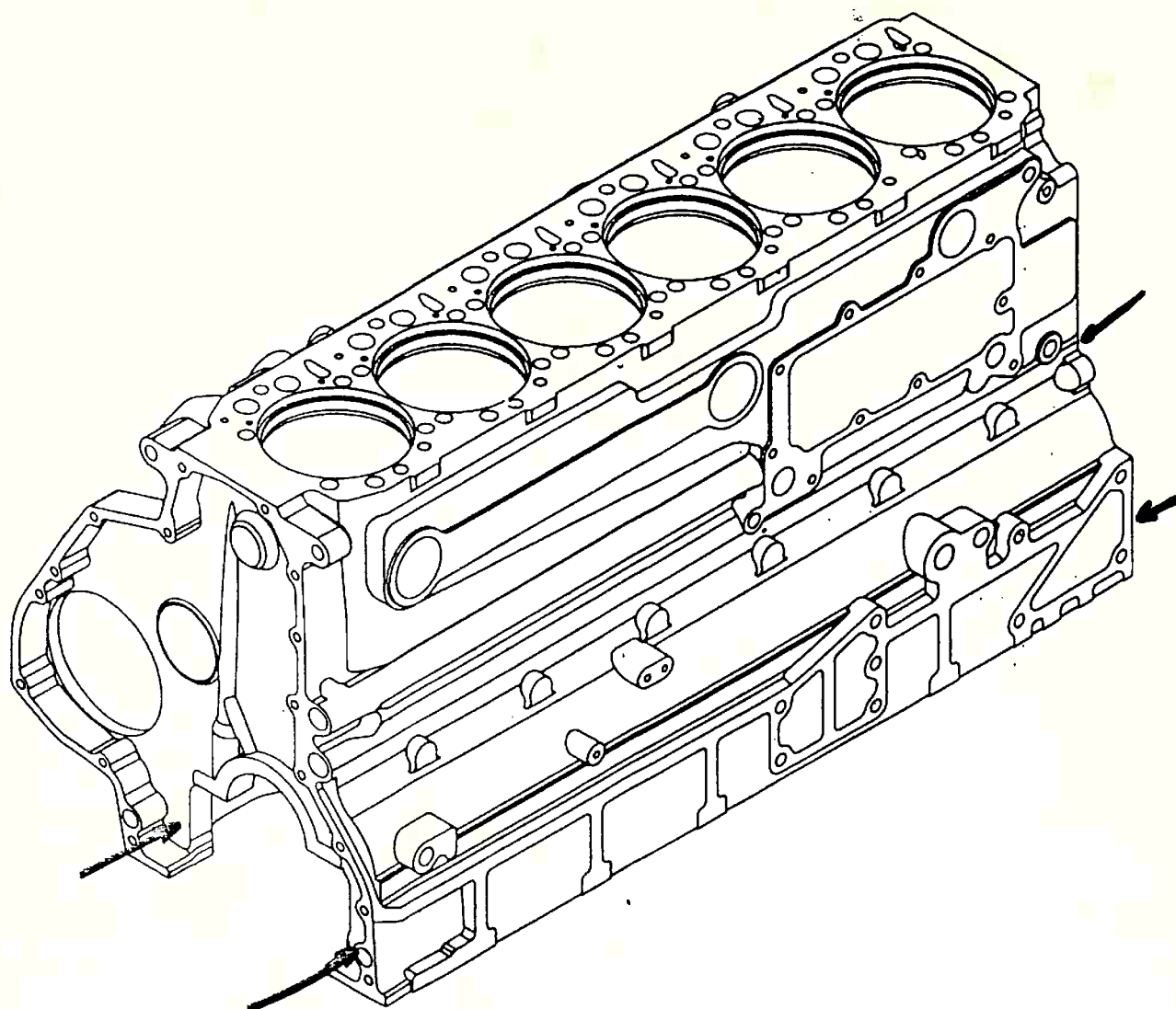


Figura 22: Croqui do bloco de motor estudado, com indicação da localização dos canais de ataque

Foram fundidas duas famílias de corpos de prova, corpos de prova estes de formato retangular; a família 456, e a família 789, que diferiam entre si pela suas alturas; a primeira com altura de 50mm e a segunda com altura de 25mm.

O molde era de areia verde, e seu fundo foi substituído por uma placa feita pelo processo Hot Box de confecção de machos (como são feitos os machos do bloco estudado), e onde a tinta foi aplicada.

Segundo o fabricante pode-se aplicar uma ou duas camadas da tinta, mas o aconselhável é que se aplique apenas uma camada.

Os corpos de prova apresentavam o seguinte perfil:

- Corpos 4 e 7: macho sem pintura;
- Corpos 5 e 8: macho com uma camada de tinta;
- Corpos 6 e 9: macho com duas camadas de tinta.

O ferro foi vazado a aproximadamente 1410°C, e a liga utilizada foi igual a do bloco 366 da MBBras (GG 25).

Microestruturalmente, estes corpos de prova apresentaram o que já se esperava, uma faixa próxima a região onde a tinta foi aplicada como a de um ferro fundido branco (cementita) com a presença de alguns nódulos de grafita degenerada, uma região de transição com alta concentração de grafita degenerada e a seguir uma região como se tivéssemos um corpo de prova de ferro fundido cinzento (ferrita e perlita mais grafita). O fato interessante que se notou nestes corpos de prova foi a mudança brusca de uma região para outra, ou seja, é estreita a região onde se encontra em maior quantidade grafitas degeneradas.

Como é possível se encontrar alguns carbonetos bastante longe da região coquilhada, suspeitou-se que o telúrio poderia ser o elemento que se combinaria com o carbono para formação destes; o que se encontrou, através de análise espectrométrica no MEV, foi presença de telúrio em quantidade muito pequena, e por hipótese o telúrio tem papel idêntico ao silício na formação da grafita, ou seja, um nucleante.

Fundiu-se, também na SOFUNGE, um bloco inteiro de seis cilindros, com variações nas regiões pintadas dos machos; temos um macho interno ao cilindro e um macho externo ao cilindro, e as aplicações da tinta foram de acordo com as informações que seguem:

- cilindros 1 e 6 sem aplicação alguma;
- cilindro 2 aplicação de uma camada de tinta no macho interno;
- cilindro 3 idem ao anterior só que com aplicação de duas camadas de tinta;

- cilindro 4 com aplicação de uma camada de tinta no macho externo;
- cilindro 5 com aplicação de uma camada de tinta tanto no cilindro interno como no externo.

Em seguida este bloco foi cortado, para que pudessem ser realizados os ensaios necessários, e retiradas amostras para micrografia.

Após macrografias das seções dos cilindros do bloco, foram tiradas medidas de dureza da camada coquilhada e da região com a microestrutura de ferro fundido cinzento comum a este bloco.

Realizou-se então dois ensaios para simulação de problemas de desgaste e fadiga de contato.

Para simulação de desgaste, utilizou-se uma máquina do tipo FALLEX, com o ensaio sendo realizado de acordo com a norma, onde uma amostra da região do cilindro, com a camada coquilhada, foi exposta à abrasão, e o resultado comparado com uma amostra do núcleo do bloco, que passou pelo mesmo processo abrasivo. Estes testes ainda estão em andamento na Cofap.

Para simulação de fadiga de contato construiu-se, especialmente, um aparelho cuja foto está indicada como figura 23.



Figura 23: Vistas frontal e traseira da máquina construída para ensaios de fadiga de contato

Esse aparelho possui um rolamento fixo num eixo; a fatia do cilindro é acoplada ao motor, e posta para rodar mantendo contato com o rolamento; desta forma, procura-se exercer uma pressão localizada e cíclica sobre a camada estudada.

O motor é um motor de bebedouro de água, cuja potência é de 10mhp, com rotação de 1540rpm a 60Hz. O ensaio durou 103 horas, a uma média de 8 horas ininterruptas por dia.

6. Resultados:

Como pode-se observar nas micrografias que virão a seguir, realmente a tinta a base de telúrio promoveu um coquilhamento na região próxima aos machos onde foi aplicada; este coquilhamento chegou, em algumas regiões, a 1,6mm de profundidade.

A dureza média da camada coquilhada foi de 330 HV (com carga de 1Kg), enquanto que a dureza média da região com a microestrutura do núcleo foi de 185 HV (com carga de 1Kg).

A figura 24 mostra parte da seção, partindo-se desde sua extremidade, no interior do cilindro e caminhando até o centro, onde a microestrutura é diferente. Na extremidade, nota-se a presença de carbonetos (regiões mais claras), e conforme adentra-se na seção passa-se a observar a formação de alguns núcleos de grafita degenerada (ou *mesh grafite*), até a região onde se observa então apenas a grafita lamelar do tipo A, que seria a exigida no processo de fundição sem o coquilhamento.

As figuras 25 a 27 mostram, em três etapas, a mesma região só que atacada com nital a 1%. Na extremidade tem-se a presença de carbonetos (regiões brancas) com o fundo escuro perlítico; no entanto, nota-se também a presença de alguns núcleos de grafita degenerada (pontos mais escuros).

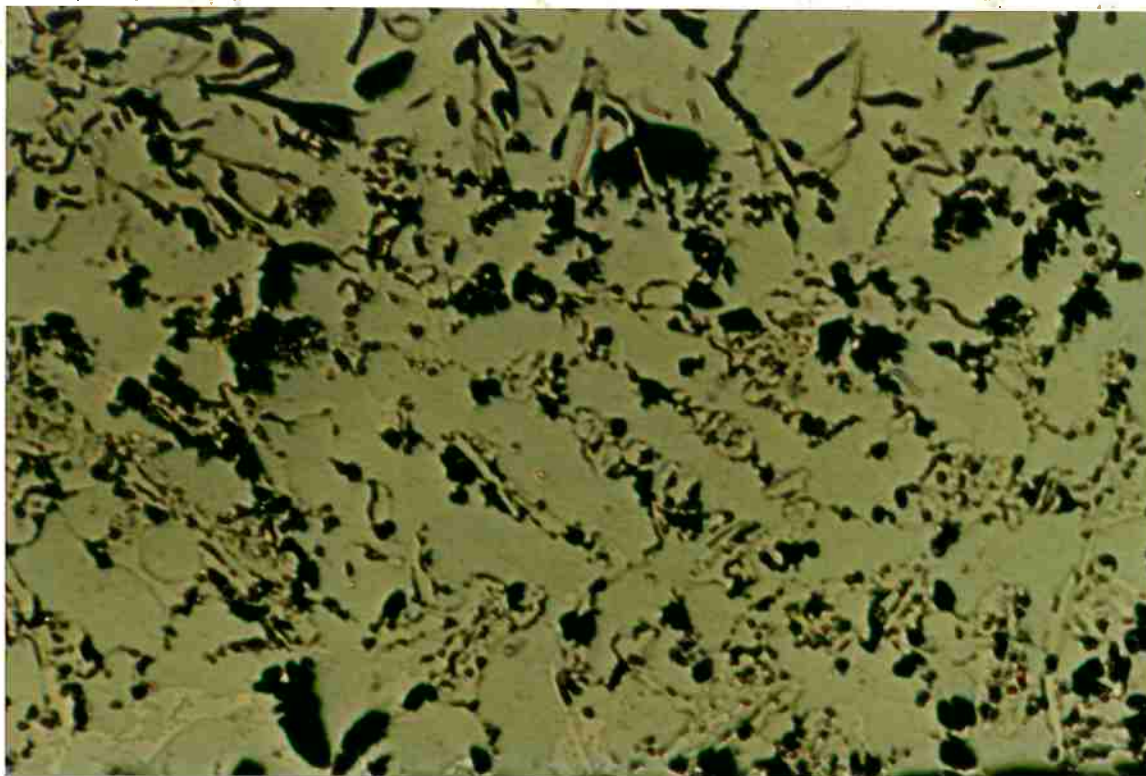


Figura 24: Micrografia que mostra a transição microestrutural desde a extremidade interna do cilindro até região onde surgem as primeiras grafitas lamelares. Sem ataque. Aumento 25X.

A quantidade de grafita degenerada cresce até a região onde pode-se estabelecer uma interface entre a região afetada pelo coquilhamento e a região não afetada por esse coquilhamento. Chega-se então a região com microestrutura típica deste bloco, que é a de matriz perlítica, com algumas regiões apresentando ferrita, e ainda as grafitas do tipo A.

O resultado do teste de desgaste, como já foi dito anteriormente, está sendo aguardado.

Quanto ao ensaio sobre fadiga de contato, o que se obteve foi a deterioração do material em algumas regiões, após as 103 horas de ensaio. As micrografias que seguem ilustram os resultados, mostrando que o material sofreu uma série de trincas na camada coquilhada, e ainda apresentou destacamento de material em algumas regiões onde a deterioração foi mais intensa.

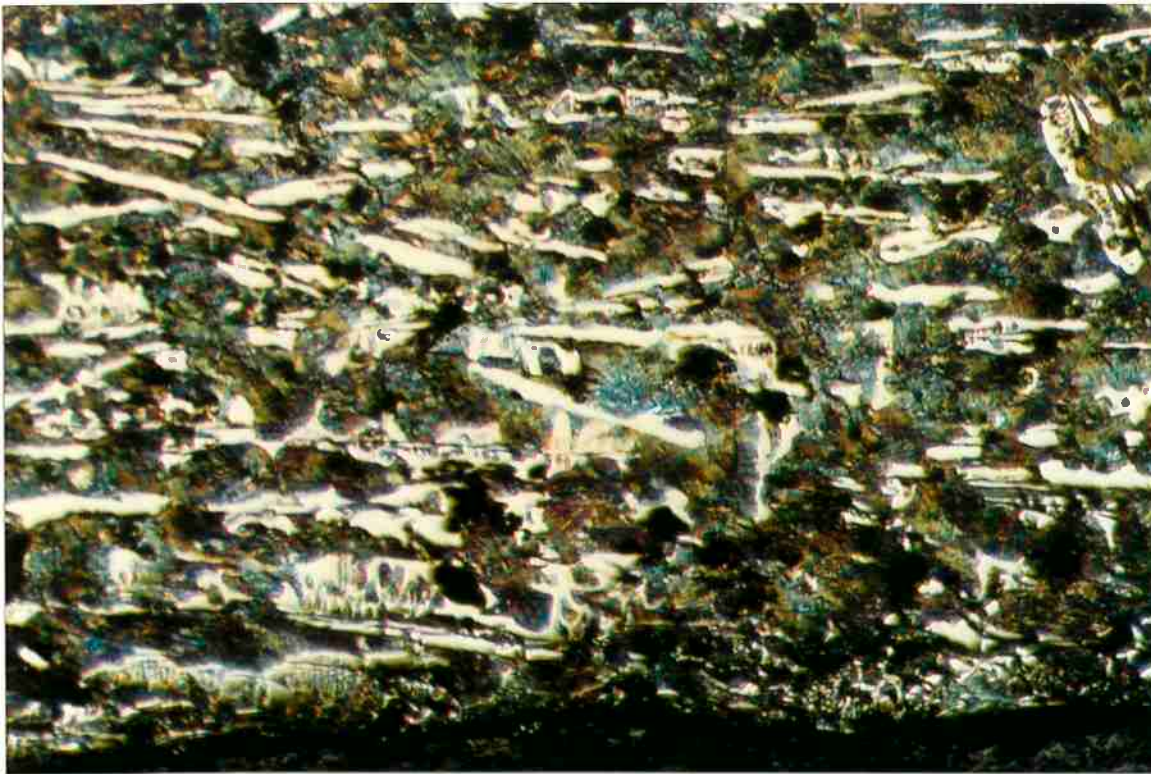


Figura 25: Região da extremidade interna do cilindro. Ataque nital 1%. Aumento 25X.

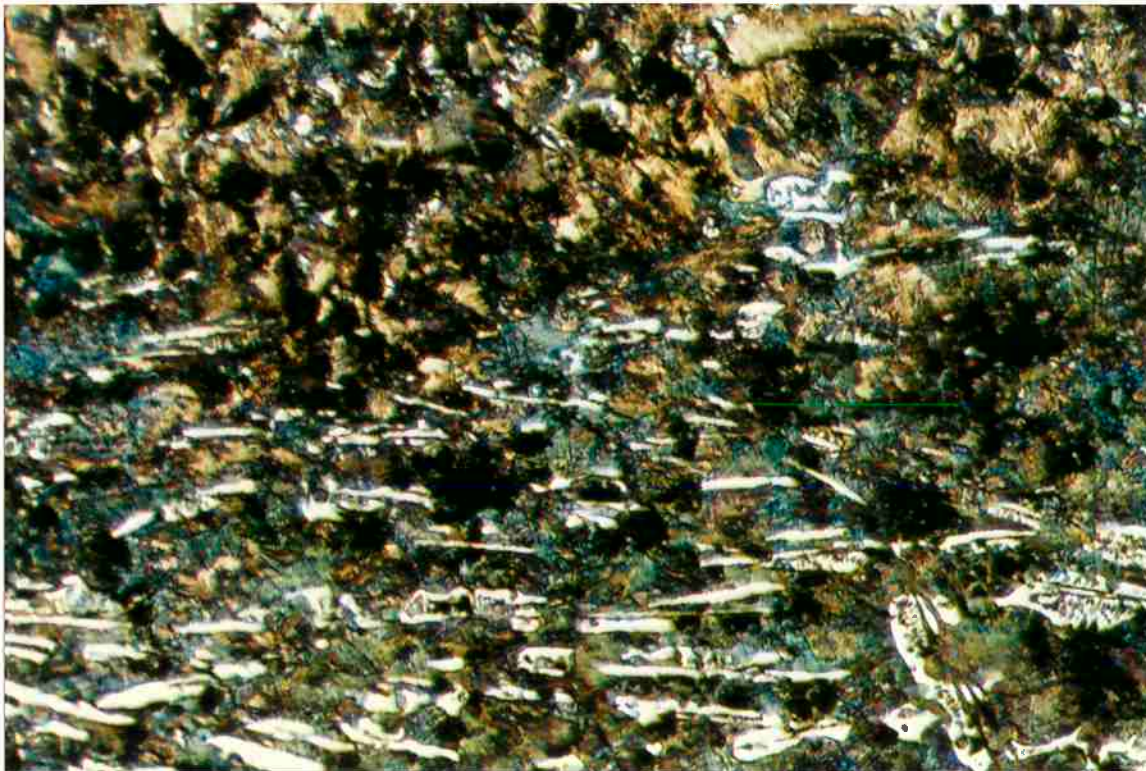


Figura 26: Adentrando no corpo de prova. Ataque nital 1%. Aumento 25X.

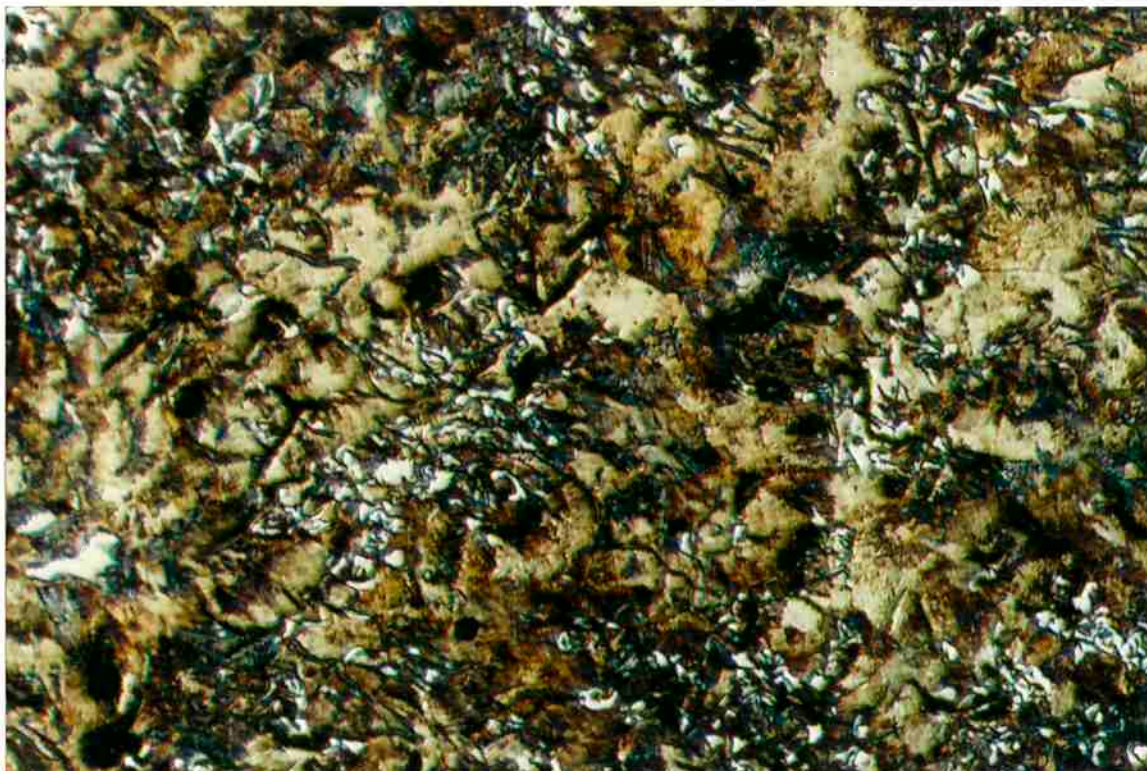


Figura 27: Região onde encontramos já quase que somente grafita lamelar tipo A. Ataque nítal 1%. Aumento 25X.

Para que se pudesse observar os defeitos nas regiões afetadas no ensaio de fadiga, o embutimento foi feito de modo que a região afetada ficasse perpendicular a face de polimento. Tomou-se a medida do defeito, e da sua distância à superfície de polimento. Controlando estas distâncias foi possível observar-se as deferentes camadas até o centro do defeito.

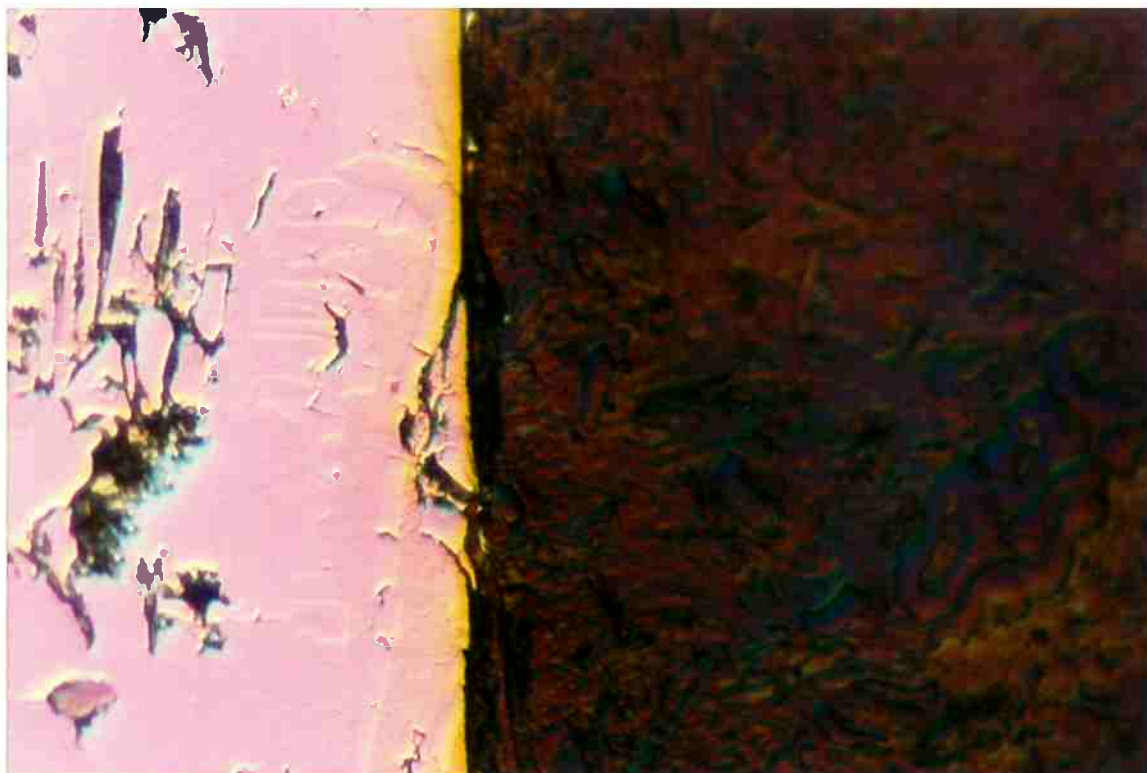


Figura 28: Região apresentando trincamento, e com pedaço na iminência de destacamento. Sem ataque. Aumento 50X.

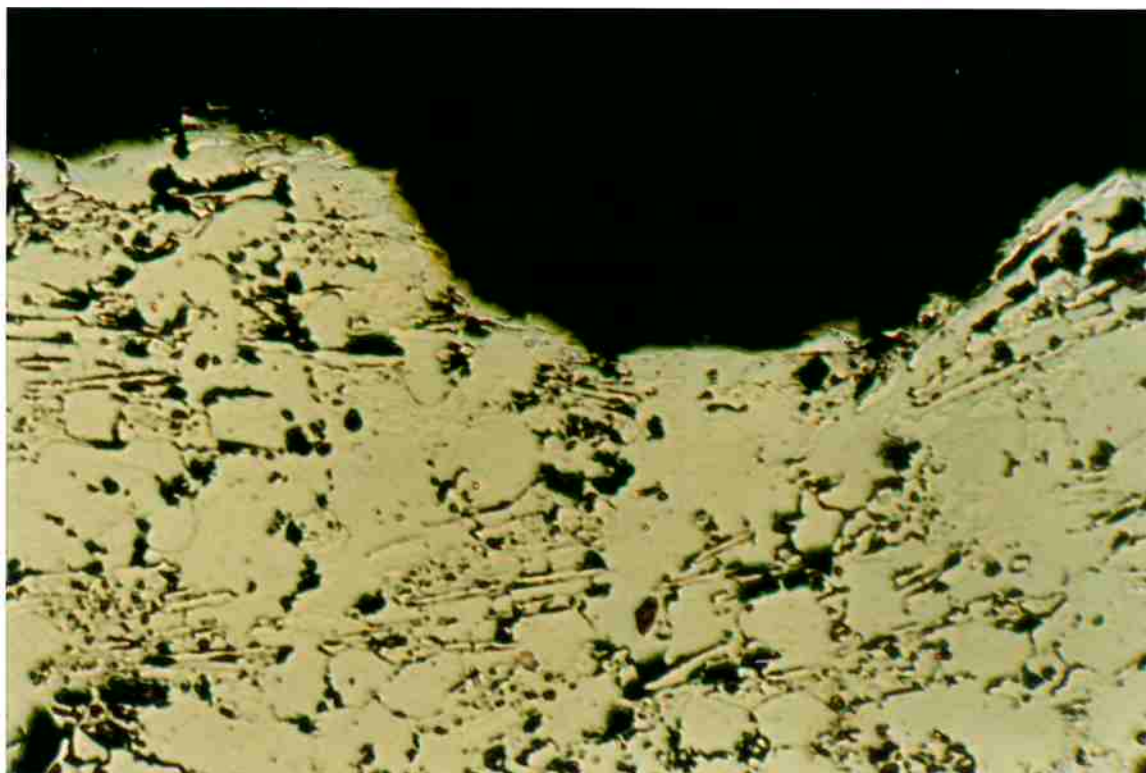


Figura 29: Região central de uma cavidade gerada pelo ensaio. Sem ataque. Aumento 25X.

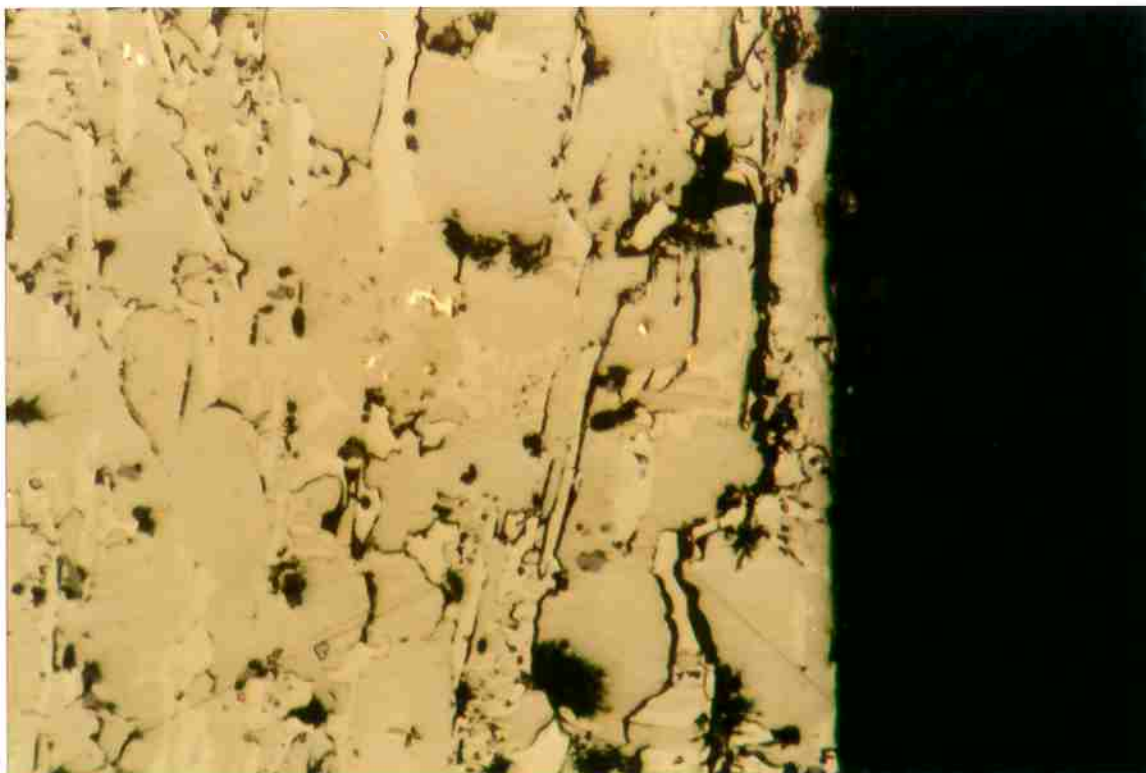


Figura 30: Detalhe de trinca que segue os carbonetos. Sem ataque. Aumento 50x.

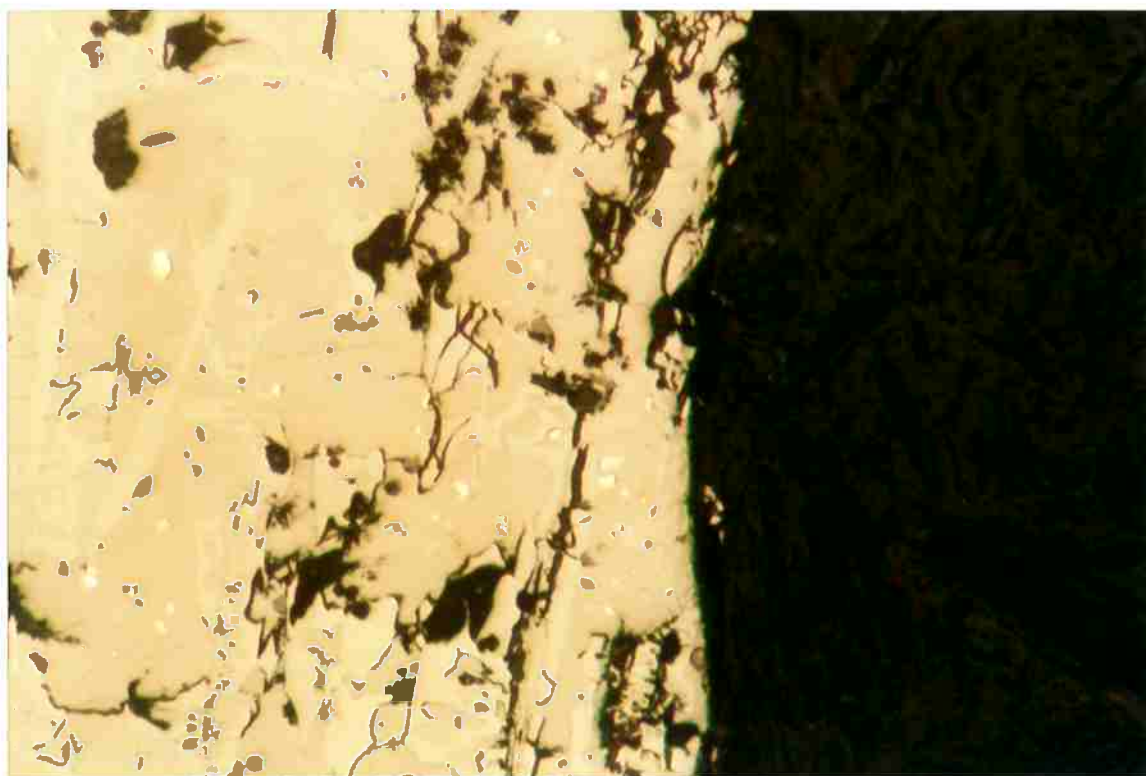


Figura 31: Detalhe de carboneto trincado. Sem ataque. Aumento 50X.

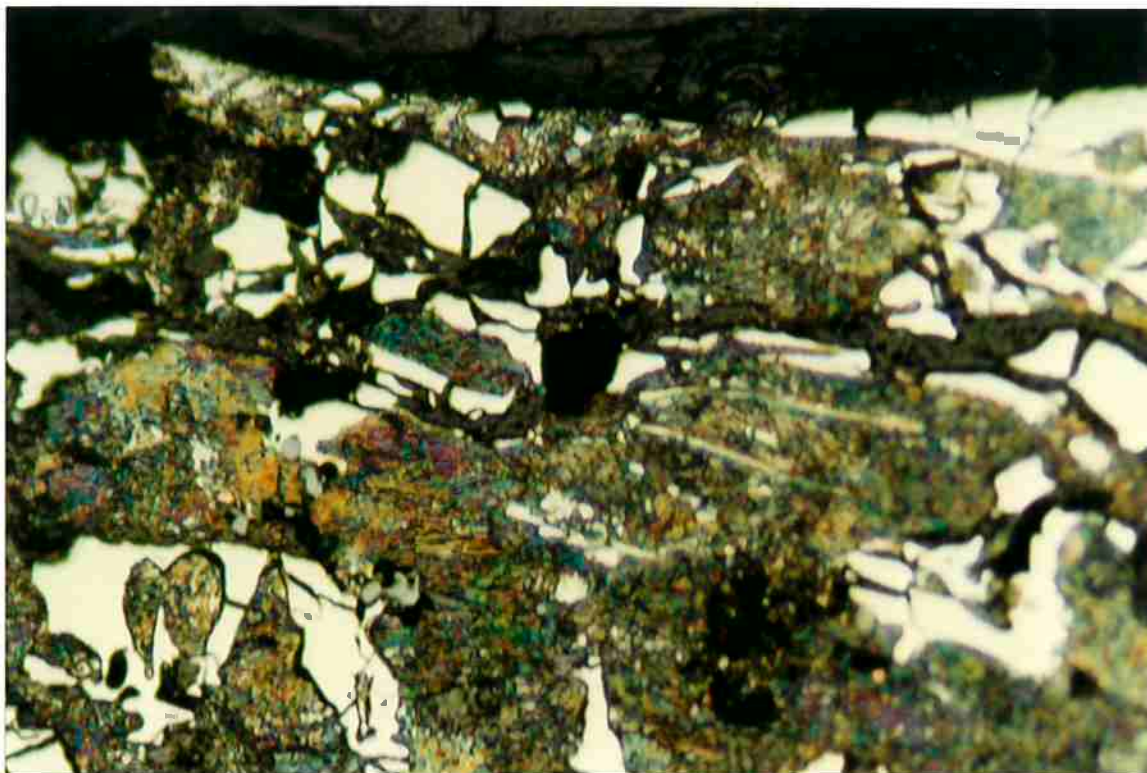


Figura 32: Detalhe da trinca seguindo carbonetos e destes trincados. Ataque nital 1%. Aumento 100X.

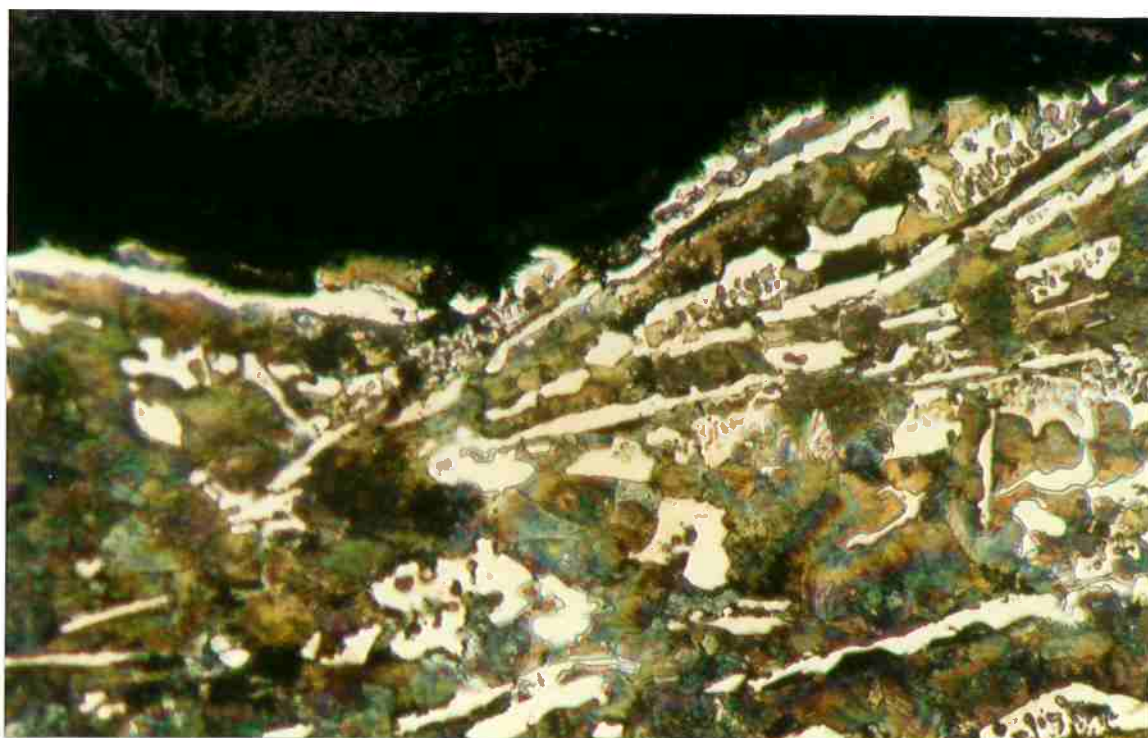


Figura 33: Detalhe da base do defeito atacada mostrando o contorno de carbonetos. Ataque nital 1%. Aumento 50X.

7. Discussão e conclusões:

Sem dúvida, foi possível a alteração microestrutural localizada que se desejava. Todavia, a camada coquilhada apresentou uma irregularidade muito grande em termos de penetração. Haveria necessidade que esta camada fosse mais profunda, com espessura mínima de 2mm para que a usinagem fosse possível, e ainda se mantivesse quantidade suficiente de camada alterada no cilindro.

O efeito da presença de grafita degenerada na camada é discutível. Pode, por um lado, acarretar uma diminuição na resistência ao desgaste devido à heterogeneidade da estrutura assim introduzida; por outro lado, pode ter um efeito benéfico, devido às características de lubrificante sólido da grafita, ou ainda pelo fato das regiões onde as grafitas sejam arrancadas servirem para acúmulo de óleo.

É possível que melhores resultados fossem obtidos caso houvesse transição gradual da região mais fortemente até o núcleo, ou então se a camada fosse completamente de ferro fundido branco mas mais espessa. Camadas muito espessas, por outro lado, teriam a elevação da fragilidade inerente a esta estrutura.

Fatores que poderiam auxiliar na obtenção de maiores espessuras, seriam seja a temperatura de vazamento, e alterações na extração de calor do molde.

A estrutura do carboneto Fe_3C é ortorrômbica. A morfologia da ledeburita (eutético $\gamma\text{-Fe}_3\text{C}$) encontrada, é explicada por Hillert, em Minkoff^[4], que mostrou que a solidificação do eutético se inicia com placas achatadas de Fe_3C crescendo no metal líquido, ramificando-se no processo. A fase γ então cresce na forma de dendritas sobre as placas de Fe_3C . Isto instabiliza o Fe_3C , cujo crescimento passa por γ . Desenvolvem-se então dois tipos de estrutura (figura 34): uma estrutura eutética lamelar na direção de crescimento das placas de Fe_3C , e algumas hastes crescendo transversalmente a essas placas. A última origina um crescimento de Fe_3C ao longo de γ formando uma frente de crescimento cooperativo.



Figura 34: Micrografia que ilustra o crescimento da cementita de acordo com Minkoff^[4]. Ataque nital 1%. Aumento 100X.

A taxa de crescimento cooperativo de γ e Fe_3C normal à placa é menor do que a taxa de crescimento do eutético na direção da placa.

Isto fica muito bem ilustrado com a micrografia (figura 35) que foi tirada de uma região da camada coquilhada do bloco.

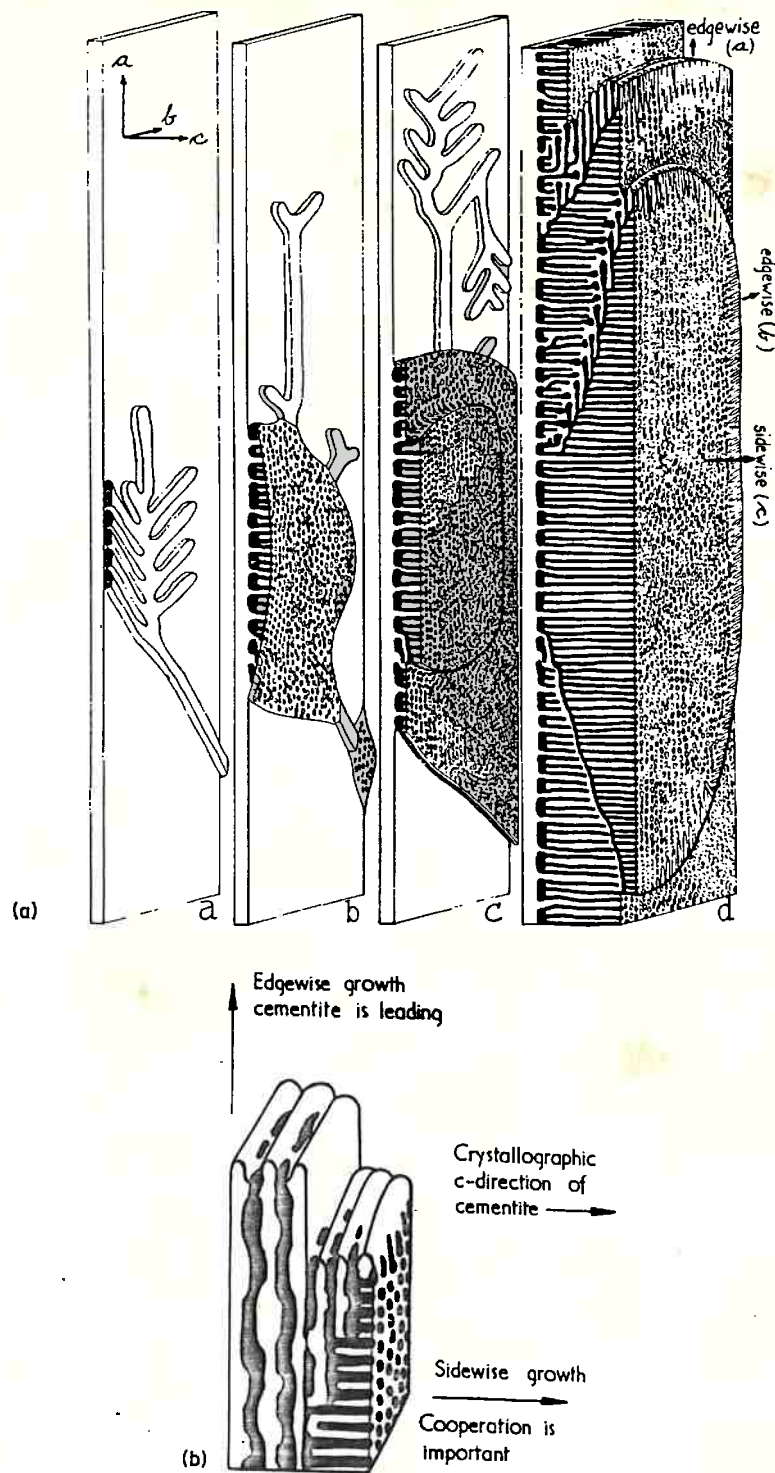


Figura 35: Esquematização do crescimento da cementita^[4]

O equipamento montado para ensaiar fadiga de contato é simples, e a pressão do rolamento contra a seção do cilindro podia ser regulada manualmente sem controle quantitativo. Todavia, o motor utilizado não permitiu que se aplicasse pressões muito elevadas.

Uma outra limitação do equipamento foi o fato da trepidação elevada, o que causou, sem dúvida, algumas variações de pressão ao longo das sucessivas passagens pelo rolamento. Esse efeito decresceu ao longo do ensaio, havendo uma tendência para homogeneização do esforço.

O corpo de prova começou a apresentar regiões com falhas já com cerca de 60 horas de ensaio; entretanto, para que o efeito fosse mais acentuado o ensaio prosseguiu até as 103 horas.

Macroscopicamente, foi possível notar regiões de camada que pareciam ter sido descascadas, formando buracos, como é possível observar, por exemplo, na figura 29.

Notou-se que esses buracos não apresentavam em suas bases, trincas que seguiam paralelas à superfície. Isso indicou não se tratarem de trincas subsuperficiais, mas sim de trincas superficiais.

Nota-se claramente, ao se observar a figura 28, que o que ocorre é um destacamento de parte da camada coquilhada. Nota-se também que as trincas se propagam ao longo dos carbonetos, o que se torna claro na figura 32.

Ainda na figura 33, pode-se notar que na base da cavidade se encontram carbonetos em todo contorno.

É interessante notar na figura 32, que os carbonetos apresentam uma série de trincas, ou seja, os carbonetos estão todos “fatiados”.

Deve-se concluir que a resistência ao desgaste é fortemente influenciada pela pressão exercida sobre a camada, devido a presença de componentes estruturais frágeis.

A ocorrência destas trincas, e posterior destacamento de partes da camada coquilhada, seguramente acelera o processo de desgaste, uma vez que as partículas destacadas passam a agir como partículas abrasivas, com dureza altamente elevada.

Não se observou nenhuma nucleação ou propagação de trincas subsuperficiais que seriam resultado das tensões hertzianas. A transição entre camada coquilhada e núcleo, também não representou papel significativo no processo de desgaste.

8. Referências bibliográficas:

- 1) Vatauvuk, Jan, *Mecanismos de Desgaste em Anéis de Pistão e Cilindros de Motores de Combustão Interna*, Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica em 1994;
- 2) Foseco, *Catálogo de Tintas*, 1996;
- 3) Windlin, F. L., Demarchi, V., Leal, M. G. G., *Desgaste Abrasivo em Motores Diesel*, SAE Technical Paper Series, nº962380, 1996;
- 4) Minkoff, I., *The Physical Metallurgy of Cast Iron*, N. York, 1983;
- 5) Santos, A.B.S., Branco, C.H.C., *Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares*, IPT, São Paulo, 1989;
- 6) Sociedade Educacional Tupy, *Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Qualidade*, Joinville, 1974;
- 7) Albertin, Eduardo, *Efeito da Porcentagem de Carbonetos e da Microestrutura da Matriz Metálica sobre a Resistência ao Desgaste de Ferros Fundidos Brancos de Alto Cromo - Ensaio em Moinhos de Bolas*, Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica em 1993;
- 8) Faria, João Vicente, *Desenvolvimento de um Método de Ensaio de Fadiga de Contato de Engrenagens*, Tese de mestrado apresentada à Escola Politécnica em 1993;

- 9) Carvalho, Miguel A., *Simulação do Desgaste de Materiais para Cilindros de Trabalho Utilizados na Laminação a Frio de Tiras de Aço*, Tese de mestrado apresentada à Escola Politécnica 1995;
- 10) Zum Ghar, H. K. , *Microstructure and Wear of Materials*, Elsevier - Saraburgerhartstract 25 P.O. Box 211 - 1000Ae - Amsterdam, N. 1987;
- 11) FOSECO International Ltd., *Applied Science in the Casting of the Metals*, Birmingham, 1970;
- 12) Materials Research Society, *Physical Metallurgy of Cast Iron IV*, Proceedings of the Fourth International Symposium on the Physical Metallurgy of cast Iron, Tokio, 1989;
- 13) *Metals Handbook*, oitava edição, ASM, Metals park, 1962, v.10.

ANEXO



MERCEDES-BENZ
DO BRASIL S. A.

ESPECIFICAÇÃO DE FORNECIMENTO

Ferro Fundido Cinzento Especial
Centrifugado, para Camisas de Cilindro

NORMAS MBB

MBB-F-4403

PÁGINA	Nº PÁGINAS
1	4

Substitui a edição anterior

Tipos:

MBB-F-4403.00

(Nova)

(anterior)

GGZ Cr Mo 250
GGZ Cr Mo 260
GGZ C Cr Ni Mo
GGZ C Cr Ni Mo

GGZ Cr Mo 250
GGZ Cr Mo 260
GGZ C Cr Ni Mo
GGZ C Cr Ni Mo

Designações abreviadas:

Para desenhos, no campo da
legenda para material

: Por exemplo: GGZ Cr Mo 260 MBB-F-4403.00

Para Execução e Fornecimento

: MBB-F-4403.00

1. MATERIAL

: Ferro fundido ligado centrifugado.

2. FORMA DE FORNECIMENTO

: Camisas de cilindro fundidas pelo processo de centri-
fugação, brutas, completamente desbastadas ou total-
mente acabadas, conforme desenho e pedido.

3. PROPRIEDADES

3.1 Requisitos internos e da superfície

: As peças fundidas devem estar isentas de irregularida-
des, áreas defeituosas, poros, bolhas de gás, trincas,
fissuras, etc. Zonas de ferro branco que prejudi-
quem a usinabilidade devem ser rigorosamente evitadas.
Não é permitida a reparação de eventuais defeitos por
meio de solda.

3.2 Tratamento térmico

: Se o pedido o especificar, deve ser realizado um reco-
zimento para alívio de tensões entre 530 a 550°C.
Esta temperatura deve ser mantida durante 2 horas. A
velocidade de resfriamento não deve ultrapassar 50°C/
hora.

OMENTE DE INFORMAÇÃO
NUR ZUR INFORMATION

03.79

16

Pág. 2, para o tipo GGZ Cr Mo 260, modificados os itens
4.2 e 4.3

DATA

Nº

MODIFICAÇÃO

NOME

NORMA DB

ENSAIO DE MATERIAL MBB

TRADUÇÃO DE:

de L. 4403

DATA 09.78
MODIFICAÇÃO Nº 16

BASEADA EM:
DBL. 4403

1ª EMISSÃO

ELABORADO E REVISADO

APROVADO

EMISSÃO

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

03.79

4. DADOS TÉCNICOS

4.1 Processo de fusão

: Forno elétrico ou Duplex.

Designação MBB

Indicação do fornecedor conforme a Liberação de Fornecimento da DBL original.

4.2 Composição química, em % peso

Carbono Combinado

Carbono

Grafita

Manganês

Silício

Fósforo

Enxôfre

Cromo

Níquel

Molibdênio

Estatido

Cobre

SOMENTE PARA INFORMAÇÃO
NUR ZUR INFORMATION

4.3 Propriedades de resistência

Dureza Brinell

kgf/mm²

GGZ Cr Mo 250	GGZ Cr Mo 260	GGZ C Cr Ni Mo	GGZ C Cr Ni Mo
3	1 e 2	3 e 4	1
3,20 a 3,50 - 0,60 a 0,80 1,60 a 1,90 0,35 a 0,50 Máx. 0,090 0,20 a 0,40 - 0,30 a 0,50 - -	- 3,20 a 3,50 - 0,80 a 1,00 1,80 a 2,20 0,30 a 0,60 Máx. 0,12 0,20 a 0,50 - 0,30 a 0,60 - 0,50	0,65 a 0,80 - 3,00 a 3,20 0,10 a 0,35 1,00 a 1,65 0,15 a 0,40 Máx. 0,040 0,20 a 0,40 0,20 a 0,40 0,20 a 0,35 0,40 a 0,60 -	0,65 a 0,80 - 3,00 a 3,20 0,10 a 0,35 1,00 a 1,65 0,15 a 0,40 Máx. 0,040 0,20 a 0,40 - 0,20 a 0,35 0,10 a 0,30 0,40 a 0,80
250 ± 20	250 ± 20	210 ± 20	210 ± 20

A dureza é determinada sobre a face frontal usinada da camisa do cilindro a uma distância de aproximadamente 1/3 da largura do rebordo a partir do furo do cilindro.

Na camisa de cilindro GGZ C Cr Ni Mo é necessário, por causa do alto teor de grafita, verificar por amostragem a matriz perlítica por determinação da micro dureza Vickers HV 0,05 300 a 360 kgf/mm².



ESPECIFICAÇÃO DE FORNECIMENTO

Ferro Fundido Cinzento Especial Centrifugado, para Camisas de Cilindro

NORMAS MBB

MBB-F-4403

PÁGINA

2

Nº PÁGINAS

4



MERCEDES-BENZ
DO BRASIL S.A.

ESPECIFICAÇÃO DE FORNECIMENTO

Ferro Fundido Cinzento Especial
Centrifugado, para Camisas de Cilindro

NORMAS MBB

MBB-F-4403

PÁGINA

Nº PÁGINAS

3

4

4.4 Aspecto da fratura

: Granulação fina, cinzento, sem ocorrência de ferro branco.

4.5 Microtextura

: Grafita em lamelas finas, não eutética, tipo A ou B, tamanho 1 a 7 conforme VDG Merkblatt P 441 de agosto de 1962. Na camisa de cilindro GGZ C Cr Ni Mo de alto teor de carbono é admissível grafita D 1 a 3 em pequena quantidade, mas deve-se evitar segregação de grafita em forma nodular.

Matriz perlítica em lamelas finas, com máximo 5% de ferrita livre, eutético de fosfeto dentro do possível na forma de rede fechada.

SOMENTE DETERMINAÇÃO
NUR ZUR INFORMATION

5. ENSAIOS

5.1 Ensaio de dureza

: O fabricante deve certificar-se por meio de ensaios de dureza Brinell e também nas camisas de alto teor de carbono por meio de determinação de micro dureza Vickers (HV 0,05) realizados por amostragem, de que na superfície de trabalho foi atingida a dureza especificada.

5.2 Exame de trincas

: Se o pedido especificar ensaio de trincas, todas as peças deverão ser submetidas a esse ensaio. O magnetismo residual nas peças testadas não deve ultrapassar a 400 A/m correspondente a 5 Ce nos terminais do polo.

5.3 Ensaio de estanqueidade

: Se o desenho especificar ensaio de estanqueidade, as peças deverão ser submetidas 100% ao mesmo. As prescrições correspondentes deverão ser verificadas no desenho.

Sem autorização do Laboratório de Ensaios da MBB não é admitida impermeabilização.

6. GARANTIA

6.1 Certificado

: Relativamente à primeira remessa e às amostras iniciais, deve ser apresentado ao Laboratório de Ensaios da MBB um Certificado de Ensaio de Remessa, nos termos da Norma DIN 50049, Julho 1972, item 2.3. Devem constar do mesmo:

- a) Data de fornecimento e número da Nota Fiscal.
- b) Data de vazamento e quantidade de peças.
- c) Resultados dos ensaios.

Os resultados dos ensaios do controle corrente de qualidade de todas as remessas, devem ser arquivados de modo a poderem ser apresentados para verificação em intervalos regulares (por ex.: cada três meses).



MERCEDES-BENZ
DO BRASIL S.A.

ESPECIFICAÇÃO DE FORNECIMENTO

Ferro Fundido Cinzento Especial
Centrifugado, para Camisas de Cilindro

NORMAS MBB

MBB-F-4403

PÁGINA

Nº PÁGINAS

4

4

- 6.2 Amostras iniciais : Com cada remessa inicial, bem como juntamente com as peças destinadas ao Departamento Experimental, deverão ser apresentadas duas amostras iniciais destinadas ao controle dimensional e de material.
7. IDENTIFICAÇÃO : A data do vazamento e a marca do fabricante devem ser fundidas no rebordo da camisa.
8. EXPEDIÇÃO : As peças acabadas devem ser protegidas contra corrosão.
9. INDICAÇÕES ESPECIAIS : Eventuais prescrições divergentes ou complementares constantes no desenho devem ser especialmente observadas.

SOMENTE PARA IDENTIFICAÇÃO
NUR ZUR INFORMATION