

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

SELEÇÃO DE MATERIAIS E TRATAMENTOS TÉRMICOS NO

PROJETO DE ENGRENAGENS

Autor: Cesar Roberto Kiral Santaella

Orientador: Hélio Nanni

Ano: 1986

1. INTRODUÇÃO

A partir da constatação básica, sobre a qual se baseia a ciência econômica, de que a quantidade de recursos é limitada e as necessidades humanas, a serem satisfeitas ilimitadas, fundamentam-se todos os sistemas econômicos. De fato, é em vista desta realidade que se impõe, nas unidades produtivas, a busca constante pela máxima eficiência. Produzir mais, a um custo menor implica no aperfeiçoamento da técnica e dos processos de fabricação.

Os custos de fabricação de um automóvel de passageiros por exemplo, são compostos segundo a tabela abaixo:

TABELA 1 : Composição dos custos de fabricação de um automóvel

PARCELA	PERCENTUAL
Material	62%
Projetos e Desenvolvimento	17%
Energia, fretes, serviços	7%
Maquinas e instalações	4%
Outros	10%
Dados de 1981 [1]	

Neste caso, o custo de material é o de maior vulto. Esse total perfaz um volume de compras que inclui peças acabadas, peças brutas, matérias primas e materiais auxiliares, compostos para uma dada empresa segundo a tabela abaixo:

TABELA 2 : Composição de custos de materiais na fabricação de um
automóvel

DISCRIMINAÇÃO	PERCENTUAL
Peças acabadas	75%
Peças brutas e matérias primas	20%
Materiais auxiliares	5%
Dados de 1981 [1]	

Se o item "peças acabadas" atingisse para esta mesma empresa Cz\$ 500.000.000 (1986), uma parcela de 40% no mínimo, poderia ser assumida como custo de material. Assim, a soma dos custos diretamente relacionados com materiais revelaria:

TABELA 3 : Custos relativos aos itens discriminados na Tabela 2

DISCRIMINAÇÃO	CUSTO (milhões de cruza_ dos)
- parcela relativa ao custo de material das peças acabadas	200
- matéria prima, peças brutas	140
- materiais auxiliares	30
Soma dos custos relativos a materiais	370
Dados de 1981 [1]	

A distribuição dos diversos grupos de materiais na construção automobilística é demonstrada na tabela abaixo:

TABELA 4: Composição relativa entre os diversos materiais empregados na indústria automobilística.

ITEM	PERCENTUAL
- ferro e aço	76%
- borracha e materiais sintéticos	6%
- metais não ferrosos	5%
- vidro	2%
- tintas protetoras, lubrificantes, etc.	11%
Dados de 1981 - [1]	

Apesar de possíveis alterações no futuro, o uso de ligas ferrosas deve ainda predominar, cabendo a elas uma análise mais detalhada.

Como exemplo, podemos comparar os processos de fabricação de bielas. Bielas de diferentes tamanhos podem ser fabricadas de aços DIN 28Cr4, 34Cr4 e 41Cr4 (similares aos ABNT 5130 e 5140). Estes aços se distinguem apenas pelo teor de carbono que é expresso pelo número que antecede o símbolo "Cr".

Assim, "20" significa 0,20% em peso de carbono, em média. Analogamente temos para os demais 0,34 e 0,41% de carbono em média. Estes aços contêm ainda 1% de cromo em peso.

Devido à condições iguais de fabricação, estes aços tem o mesmo preço, pois o carbono nada custa como elemento de

liga. Entretanto, para o produto final existe diferenças significativas no custo de fabricação, uma vez que o comportamento metalúrgico dos três aços é bastante diferente.

O aço 41Cr4 requer, para a obtenção da resistência necessária, um tratamento termico constituído de têmpera*, em banho de sal para martêmpera (ou em óleo) seguido de revenimento.

O aço 34Cr4 exige também uma têmpera e revenimento, porém o resfriamento de têmpera deve ser feito na água.

O aço 28Cr4 pode ser temperado diretamente em água a partir da temperatura de forjamento, necessitando apenas do revenimento posterior.

Para o beneficiamento do primeiro aço haveria necessidade de se instalar um forno de aquecimento e um de resfriamento em banho de sal para martêmpera. O segundo aço dispensaria o forno de resfriamento para martêmpera, podendo ser resfriado em água e o terceiro dispensaria ainda o forno de aquecimento de têmpera. A diferença de investimento entre a primeira e última alternativa é notável e pode atingir (dependendo da capacidade da instalação) algumas dezenas de milhões de cruzados.

Outra questão que pode ser colocada refere-se à relação entre o teor de carbono do aço e seu comportamento durante a fabricação da peça. O aumento do teor de carbono aumenta desproporcionalmente o desgaste da matriz de forjamento. O risco de formação de trincas térmicas também aumenta, caindo ainda a usinabilidade. A produtividade cai, portanto, drasticamente com o aumento do teor de carbono.

Além disto, os desenvolvimentos tecnológicos na fabricação dos aços permite a obtenção de ligas especiais, para apli

* com resfriamento

cações específicas. Um exemplo seria a liga 49 Mn V S 3, que é utilizada na fabricação de virabrequins. O quadro abaixo ilustra ' melhor suas vantagens.

TABELA 5 : Comparação entre características de utilização dos aços DIN CK 35 e 49 Mn V S 3.

	CK 35 (n ABNT 1035)	49 Mn V S 3 (--)
Preço	100	104
Roteiro de fabricação	Têmpera direta após forjamento	Resfriamento controlado após forjamento
Equipamentos	Tanque de têmpera e forno de revenimento	-
Observações	Riscos de trincas de têmpera	-

Apesar do preço mais elevado do material, os custos de produção são reduzidos sensivelmente, quer nos equipamentos envolvidos, quer no índice menor de rejeição.

A Volkswagen do Brasil, por exemplo, está desenvolvendo* junto aos fornecedores de aços, a obtenção de ligas especiais, micro-ligadas ao Niobio , para possibilitar uma cementação de 950º C a 1000º C, o que reduzirá consideravelmente os tempos de tratamento resultando num aumento de produtividade.

Em resumo, a seleção do material deve ser feita com

* atualmente

base no conhecimento profundo das características técnicas do material e além de satisfazer as solicitações de serviço, mas características e comportamento na conformação em função dos elementos de liga devem ser levados em conta.

Assim, será assunto dos próximos capítulos as solicitações em serviço de uma engrenagem, particularidades dos diferentes tratamentos térmicos e como, a partir disso, selecionar adequadamente o material para a engrenagem.

2. TIPOS DE AVARIAS MAIS COMUNS EM ENGRENAGEM

A norma DIN 3979 relaciona e divide os tipos de danos como esquematizado abaixo:

1. Danos nos flancos

1.1. Desgaste

1.1.1. Desgaste normal

1.1.2. Desgaste abrasivo

1.1.3. Desgaste por interferência

1.1.4. Riscagem (scratching)

1.1.5. Riscagem (scoring)

1.1.6. Arrastamento (scuffing)

1.2. Desgaste corrosivo

1.2.1. Corrosão química

1.2.2. Corrosão por fricção

1.2.3. Escamação

1.2.4. Superaquecimento

1.3. Erosão, cavitação

1.4. Descarga elétrica

1.5. Efeitos de fadiga nos flancos

1.5.1. Crateração (pitting)

1.5.1.1. inicial

1.5.1.2. destrutiva

1.5.2. Porosidade

1.5.3. Lascamento (flaking)

1.5.4. Lascamento (spalling)

1.6. Deformação

1.6.1. Recorte

1.6.2. Ondulação

1.6.3. Enrolamento

1.6.4. Deformação a quente

1.7. Trincas nos dentes

1.7.1. Trincas de têmpera

1.7.2. Trincas do material

1.7.3. Trincas de retáfica

1.7.4. Trincas por fadiga

2. Ruptura do dente

2.1. Ruptura por sobrecarga

2.2. Ruptura por fadiga

Destes, vamos destacar três tipos básicos, que ser virão de referência para os cálculos e para a seleção de material e tratamento

2.1. Desgaste dos flancos

2.1.1. Riscagem

Características: depressões lineares, na direção do movimento de deslizamento, que se estende continuamente para a extremidade do dente ou para o início ou fim do engrenamento na raiz do dente.

Riscagem progressiva leva à intensificação da remoção de material e ocorre principalmente na área de altas velocidade de deslizamento na raiz e topo do dente.

Causas: riscagem é um sinal de que o flanco do dente afetado foi localmente sujeitado a carregamento severo. Pequenos corpos estranhos (impurezas) e picos de rugosidade no flanco da outra engrenagem em contato será forçado para dentro do flanco e, como resultado do movimento de deslizamento, resultam em depressões estriadas as quais por sua vez, durante o engrenamento, causam o riscamento da superfície do flanco da outra engrenagem.

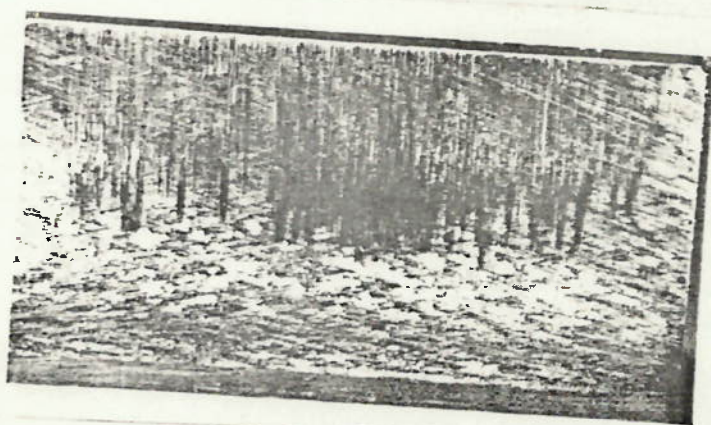


Figura 1 - Caso avançado de riscagem

2.2. Fadiga de contato

2.2.1. "Pitting"

Partículas de material desprendem-se dos flancos do dente, resultando assim em depressão denominadas pites. Pode ser feita uma distinção entre "pitting" inicial e "pitting" destrutivo.

2.2.1.1. "Pitting" inicial

Características: genericamente falando, pequenas partículas de metal, frequentemente em forma de conchas e placas, desprendem-se do flanco da engrenagem motora, principalmente abaixo do cilindro primitivo. O conceito de "pitting" é também caracterizado pelo fato de que sua formação decresce com o tempo, assumindo condições de operação constantes ("pitting" regressivo) e pode até parar.

Em engrenagens cementadas o "pitting" inicial pode também ser acompanhado da formação de finos poros. "Pitting" inicial geralmente começa abaixo do cilindro primitivo .

Causas: "Pitting" inicial pode ocorrer quando uma nova engrenagem de material sem tratamento térmico é posta em serviço. Em geral ele somente cresce até o momento em que proeminências localizadas na superfície do flanco, resultantes de imperfeições de processo da fabricação afetem o perfil de evolvente ou a rugosidade superficial e as ondulações do flanco tenham sido aplainadas de modo ' que haja uma área de contato suficiente para sustentar o carregamento sem que novos danos superficiais ocorram.

2.2.1.2. "Pitting" destrutivo

Características: este tipo de "pitting" continua a desenvolver poros e/ou "pitting" inicial mesmo após o ajustamento inicial da superfície e frequentemente provoca a formação de grandes pites pela ruptura do material através de pequenos pites adjacentes. Em estágios avançados este tipo de "pitting" pode levar a uma modificção da forma do flanco através da sobrecarga que a superfície ainda não afetada está sujeita. Com o prosseguimento da operação aumenta o desgaste pela ação de deslizamento que acelera a remoção do material especialmente na raiz do dente. Como resultado fi

nal de tais perdas de material pode ocorrer a ruptura do dente.

Causas: "Pitting" destrutivo se desenvolve como consequência do limite de resistência a esforços de rolamentos e deslamentos combinados se excedido em áreas do flanco onde a capacidade de carga é diminuída por poros e/ou "pitting" inicial ou como consequência de tal limite de resistência tenha sido excedido para toda a superfície. Outros fatores de influência são as propriedades dos lubrificantes, deslamentos específico e velocidade circumferencial. "Pitting" destrutivo pode também desenvolver-se como resultado de curso incorreto do dente.

OBSERVAÇÃO: Com o propósito de definir "pitting" destrutivo não é sempre um critério seu desenvolvimento a partir do "pitting" inicial, após as proveniências superficiais terem sido removidas.

"Pitting" destrutivo pode também começar abaixo do cilindro primitivo, depois de um prolongado período de operação mesmo para engrenagens fabricadas com alto grau de precisão e qualidade superficial e que tenham curso correto, sem que nenhuma evidência de "pitting" inicial tenha ocorrido.

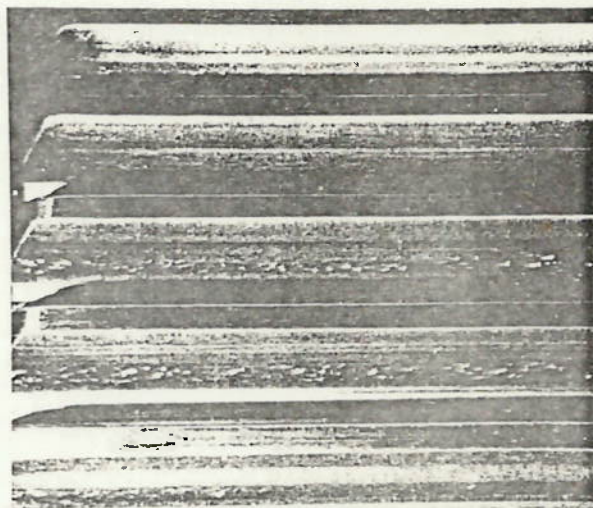


Figura 2 - "Pitting" inicial no flanco do dente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos, beneficiada.

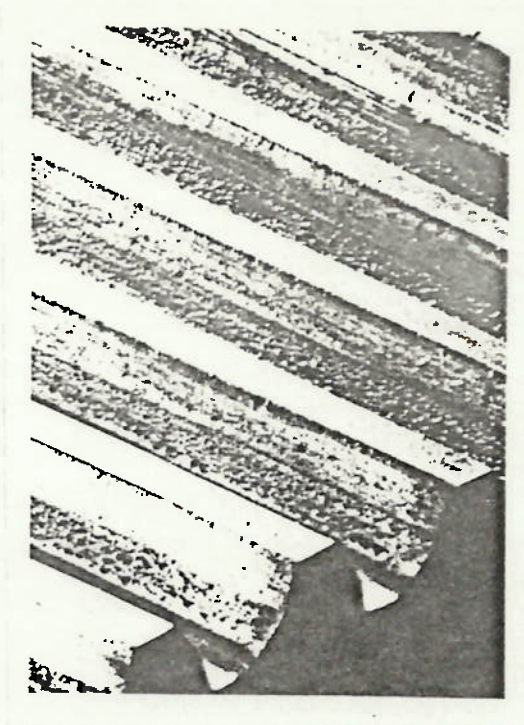


Figura 3 - "Pitting" destrutivo no flanco de dente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos, beneficiada



Figura 4 - "Pitting" destrutivo no flanco de dente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos, beneficiada.



Figura 5 - "Pitting" severo sobre todos os flancos de uma engrenagem cementada. O coalescimento dos pites resultou na perda completa do perfil de evolvente.

2.2.2. "Spalling"

Características: lascas de metal variando em tamanho e espessura desprendem-se do flanco do dente, geralmente localizadas, mas também distribuídas sobre todo o flanco do dente. "Spalling" ocorre principalmente em dentes temperados por chama ou indução.

Causas: "Spalling" é atribuído a defeitos de material e de tratamento térmico e também a excessiva geração de calor durante a retificação, bem como a excessiva tensão do material do núcleo. Isso leva a ruptura de uma parte do flanco do dente sobre ou abaixo da camada endurecida onde o "spalling" teve início. A espessura da camada que se desprende é geralmente maior que a profundidade endurecida.

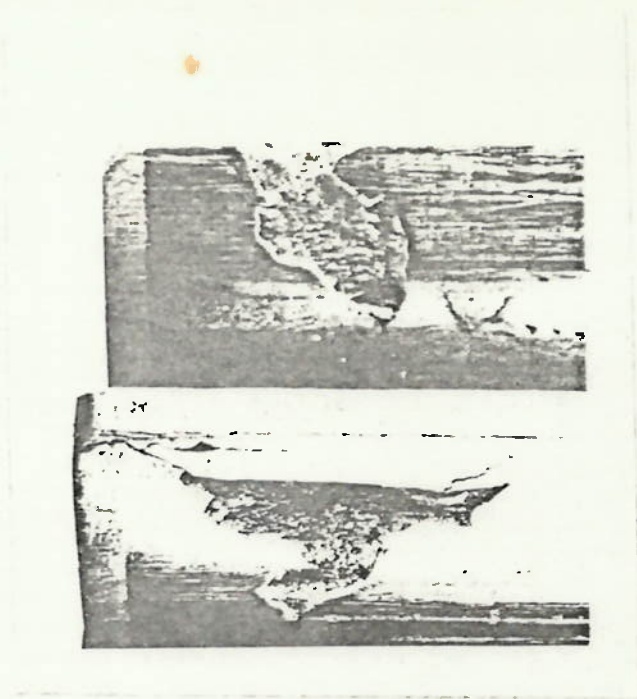


Figura 6 - "Spalling" cansado por insuficiente profundidade cemen-
tada e baixa dureza de núcleo.

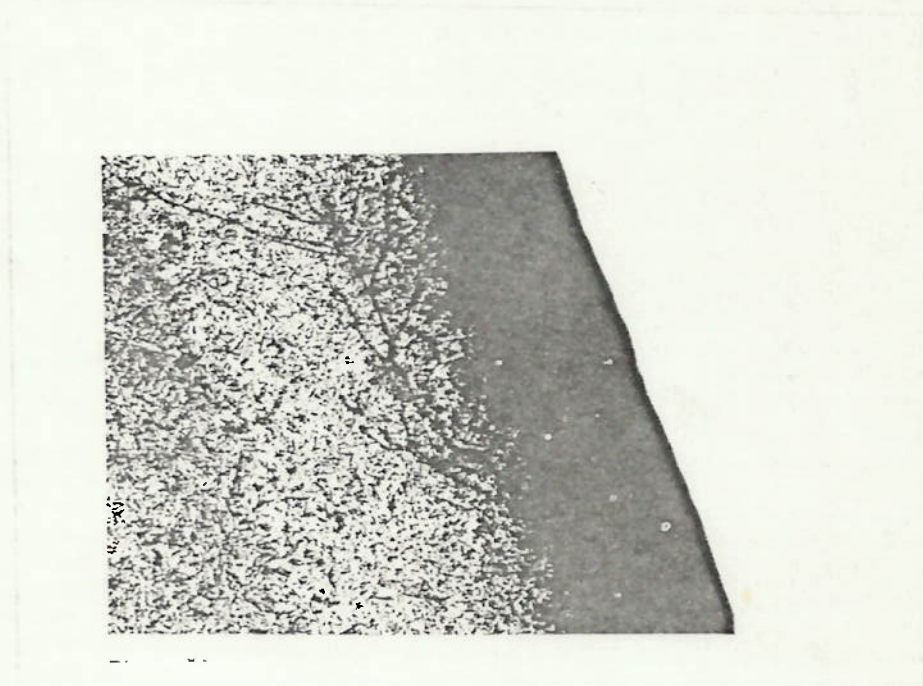


Figura 7 - Trincas incipientes abaixo da camada cementada devido
a defeito do material.

2.3. Ruptura por fadiga no pé do dente.

Características: a superfície de fratura consiste de duas diferentes zonas, a superfície de fratura por fadiga e a superfície de fratura residual. A superfície de fratura por fadiga é não deformada e plana possivelmente atravessada por linhas interrompidas e pode exibir passos entre sucessivos estágios de ruptura por fadiga. A superfície de fratura residual corresponde a de fratura por sobrecarga. A ruptura inicia no lado carregado do flanco do dente (raiz sob esforços de tração).

Um caso especial é constituído pela ruptura por fadiga de parte do dente. Neste caso somente uma parte do dente em uma extremidade (o canto) rompe-se.

Causas: a ruptura por fadiga resulta frequentemente de ciclos repetidos de oscilação quando as tensões excedem o limite de fadiga do material. Após um certo tempo de desenvolvimento de trincas, uma trinca incipiente se forma se o ciclo continua, cresce até que o restante da seção seja incapaz de sustentar o carregamento. O dente rompe-se entrão subitamente quando o esforço é novamente imposto. Esta ruptura da seção residual representa uma ruptura frágil a qual no caso de uma ruptura por fadiga é denominada fratura residual.

As trincas incipientes originam-se no ponto de máxima tensão, principalmente na raiz do dente. São bastante favorecidas pela produção-indução de trincas, inclusões, marcas da ferramenta ou entalhes, pelo seu efeito de concentrador de tensões.

Linhas interrompidas ocorrem quando no curso de propagação da trinca, período de severa pulsação ou alternância de carregamento (propagação rápida da trinca incipiente) e períodos de baixo carregamento (propagação lenta ou inexistente da trinca)

alternam-se entre si.

A porcentagem da superfície da fratura por fadiga em relação à total e sua rugosidade tornam possível, assumindo conhecido o comportamento à fratura ditado pelo material, estabelecer onde a trinca incipiente propagou-se rapidamente e lentamente. A partir disto, uma conclusão qualitativa pode ser obtida, contanto que não existam falhas de fabricação no início da fratura, como para determinar qual o carregamento imposto que excedem os valores permitidos.

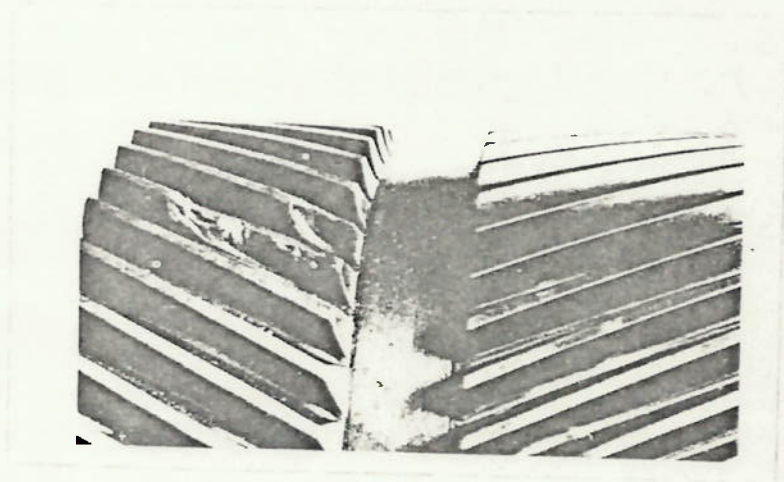


Figura 8 - Ruptura por fadiga dos dentes de uma engrenagem planetária de aços DIN 31Cr Mo V9 temperada.

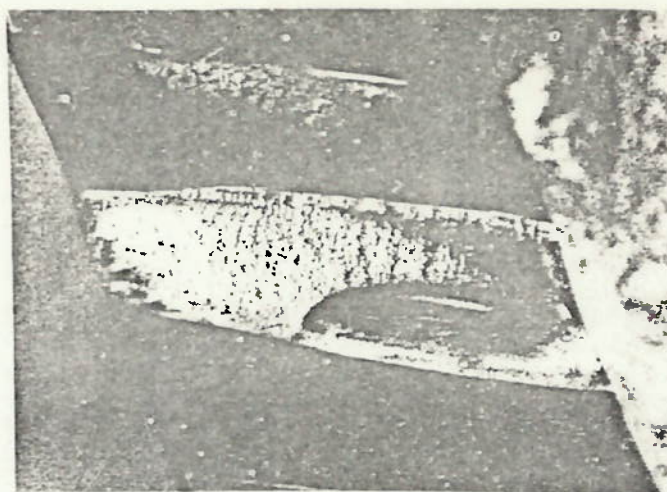


Figura 9 - Ruptura por fadiga ou uma engrenagem cilíndrica de dentes helicoidais, revelando uma porcentagem de 30% para a superfície de fratura por fadiga.

3. MODELAGEM DOS ESFORÇOS NO FLANCO DO DENTE

A transmissão de torque da roda motora para a movida, que ocorre durante o engrenamento dos dentes, é feita através de uma área deformada elasticamente nos flancos de ambos os dentes em contato. A força de contato é assim aplicada não pontualmente mas de maneira distribuída na área de contato, que pode ser modelada matematicamente como uma elipse.

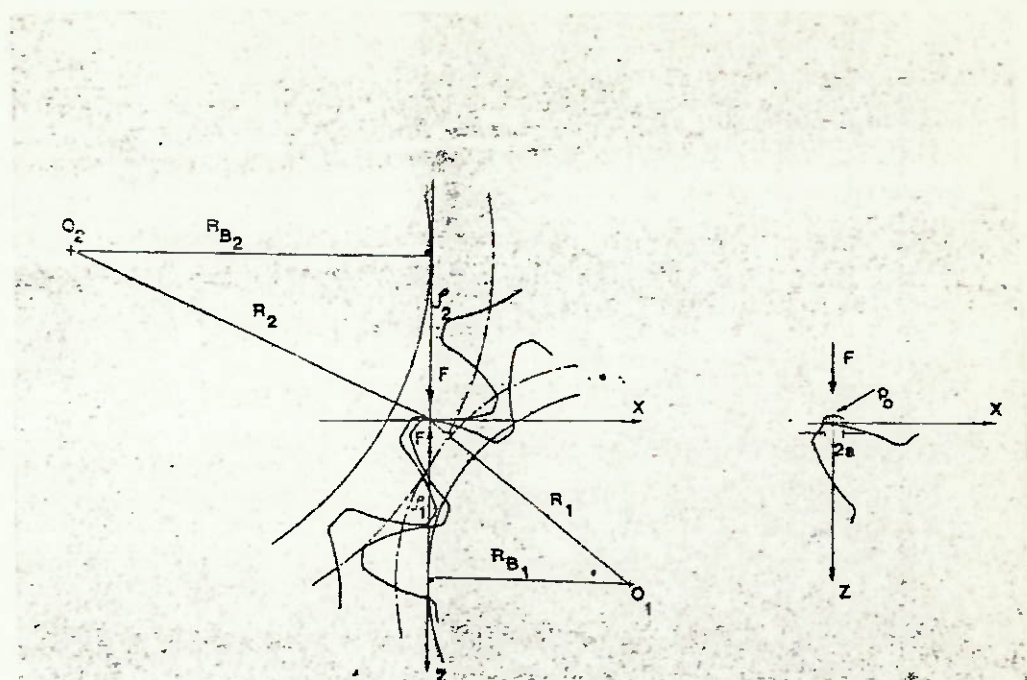


Figura 10 : Transmissão de torque durante o engrenamento.

Genericamente, para um carregamento aplicado com rolamento e deslissamento, ainda na zona elástica, o tensor de tensão do semi-espaco abaixo da superfície de contato tem nove componentes; tres destas são tensões normais T_x , T_y e T_z e seis são tensões de cisalhamento. As componentes tangenciais de índices que apresentam as mesmas letras em ordem invertida são iguais entre si, ou seja $xy = yx$ e assim sucessivamente. Assim o estado de tensão é caracterizado por um máximo de seis componentes distintos, as três tensões normais e as tres tensões de cisalhamento xy , yz e xz (Figura 11, posições 1 e 2)

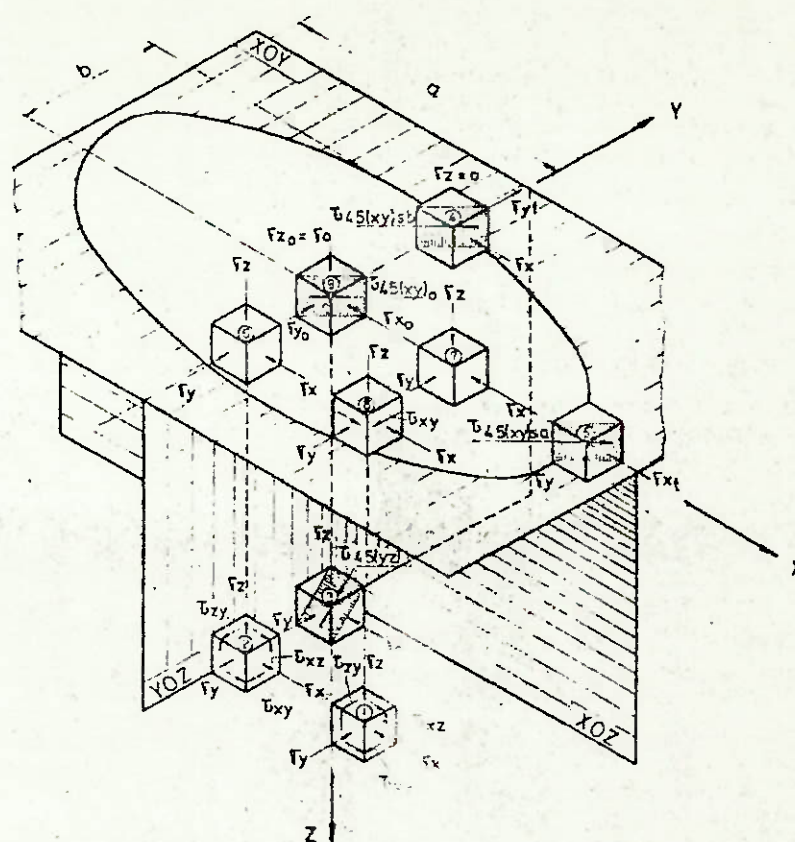


Figura 11 : Tensões sobre e abaixo da superfície de contato

As tensões normais atingem seus valores máximos T_{x_0} , T_{y_0} e T_{z_0} no centro da elipse de contato. O máximo destes valores é a tensão $T_{z_0} = P_0$, a qual é conhecida como a máxima pressão hertziana de contato (Figura 11, posição 9)

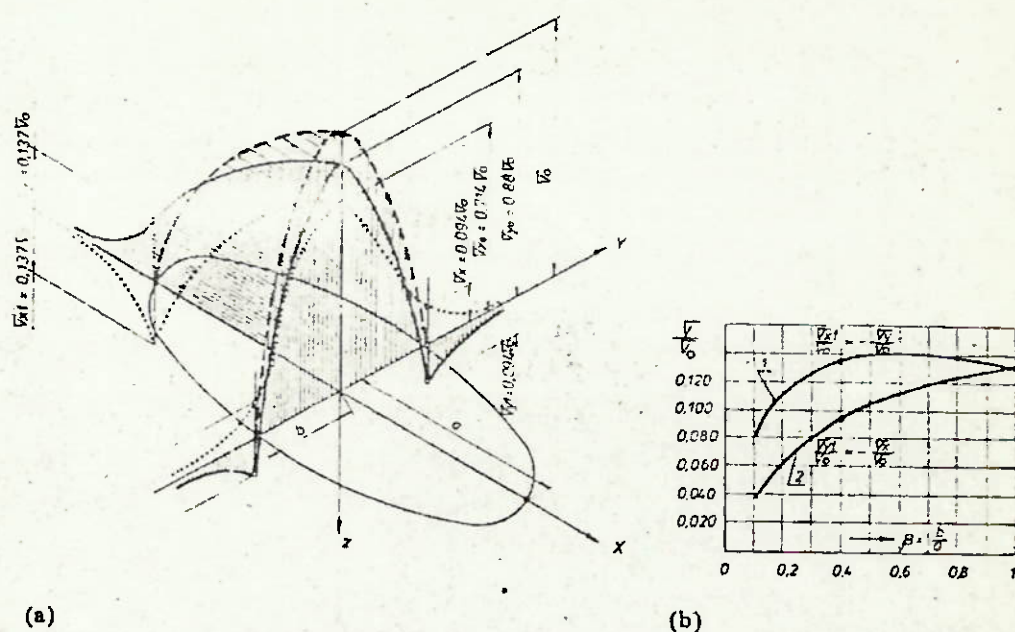


Figura 12: (a) Distribuição das tensões normais sobre a elipse de contato ($\beta = a/b = 0,4$: - , T_x ; - - - T_z ; ···, T_y ;
(b) Tensões normais no cruzamento da elipse com os eixos: y para curva e x para curva Z

No eixo x as tensões T_z e T_y são de compressão. Nos cruzamentos da elipse com o eixo x a tensão T_y é diferente de zero, tendendo a zero fora da elipse de contato, a tensão T_x é de tração (T_x) e a tensão T_z é zero. No eixo y as tensões T_z e T_x são de compressão sendo o comportamento na intersecção entre a elipse e o eixo y análogo ao descrito acima para T_z e inverso para T_x e T_y (vide Figura 12).

Se o processo de rolamento ocorre ao longo do eixo x , as tensões T_z e T_y causarão um carregamento pulsante de frequência V , igual ao número de rotações por minuto da engrenagem. Sob as mesmas condições, a tensão T_x resultará num carregamento alternativo assimétrico de frequência $1.5 V$.

Sobre as tensões de cisalhamento, apenas τ_{xy} é diferente de zero na superfície de contato (Figura 11, posição 8). Estes valores são muito menores que aqueles das tensões normais.

No semi-espço sob a superfície de contato, as tensões T_x , T_y e T_z são de compressão. Elas atingem seus valores máximos sobre o eixo z , porém estes valores não atingem aqueles máximos obtidos no centro da elipse de contato (T_{x0} , T_{y0} e T_{z0}). As tensões de cisalhamento τ_{xy} , τ_{yz} e τ_{zx} atingem seus máximos sob a superfície de contato. O máximo valor é atingido à profundidade z_0 pela tensão τ_{xz} . Durante o processo de rolamento ao longo do eixo x , as tensões T_x , T_y , T_z e τ_{yz} cansarão um carregamento pulsante de frequência V e as tensões τ_{xy} e τ_{xz} cansará um carregamento simétrico alternado de mesma frequência.

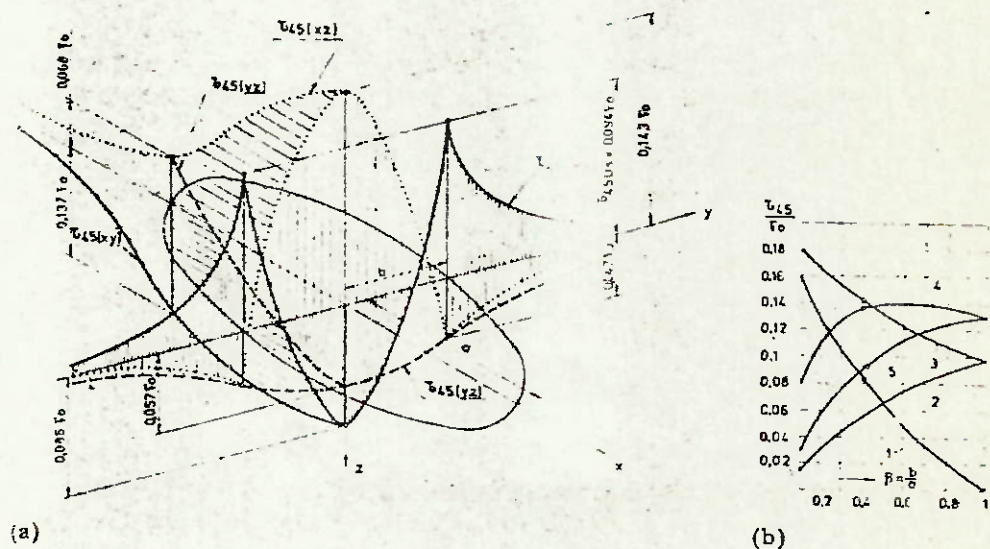


Figura 13 : (a) Distribuição das máximas tensões de cisalhamento na superfície de contato para $\beta = a/b = 0,4$

- (b) τ_{45}/τ_0 em função de β : curva 1, $\tau_{45}(xy)0$; curva 2, $\tau_{45}(xz)0$; curva 3, $\tau_{45}yz0$; curva 4, $\tau_{45}(xy)_{max}$; curva 5, $\tau_{45}(xy)_{min}$.

Diversas hipóteses foram feitas então para estabelecer-se a tensão crítica responsável pela fadiga de contato. Atualmente prevalece a hipótese de que o fenômeno de ruptura por fadiga de contato é uma competição entre diferentes modos de falha causados pela existência de vários concentradores de tensão com origem superficial ou subsuperficial [3].

As principais hipóteses para a tensão crítica na fadiga de contato por rolamento são [4]:

1. A hipótese de máxima pressão hertziana de contato P ;
2. A hipótese de máxima tensão de tração na superfície de contato $T_{x\tau}$;
3. A hipótese de máxima tensão de cisalhamento τ_0 ;
4. A hipótese de tensão equivalente T_{ED} .

O sucesso de cada teoria pode ser comparado segundo o quadro a seguir [4]:

TABELA 6 : Sumário das hipóteses da tensão crítica e sua correlação com os dados experimentados

HIPÓTESE DA TENSÃO CRÍTICA	Sucesso na correlação com dados experimentais			
	Origem das falhas	Alterações Estruturais	Razão b/a	Tensões Residuais
1	parcial	nenhum	nenhum	nenhum
2	parcial	nenhum	nenhum	parcial
3	parcial	parcial	bom	nenhum
4	bom	bom	bom	bom

Como a hipótese 4 leva a uma formulação complexa, que necessita do auxílio de métodos numéricos para sua mais rápida solução, utilizaremos neste trabalho a hipótese 3, que apresenta ainda boa correlação com os resultados experimentais.

3.1 - TENSÃO MÁXIMA DE CISALHAMENTO ABAIXO DA SUPERFÍCIE DE CONTATO

Da teoria da elasticidade, as tensões no semi-espaço determinadas pela força F que atua normalmente à elipse de contato serão:

- tensões devidas à força de contato:

$$\sigma_{xx} = -P_0 \frac{z}{a} \left\{ \lambda_0 \left[1 + 2 \left(\frac{x}{a} \right)^2 + 2 \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right] - 3 \lambda_1 \frac{z}{a} - 2 \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = -P_0 \frac{z}{a} \left(\lambda_0 - \frac{x}{a} \lambda_1 \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = -P_0 \left(\frac{z}{a} \right)^2 \lambda_0 \quad (3)$$

$$\sigma_{xx}(z=0) = \begin{cases} -P_0 \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} & p/ |x| < a \\ 0 & p/ |x| > a \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma_{yy}(z=0) = \begin{cases} -P_0 \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} & p/ |x| < a \\ 0 & p/ |x| > a \end{cases} \quad (5)$$

$$\sigma_{zz}(z=0) = 0 \quad (6)$$

As equações de (1) a (3) são válidas para $z > 0$ (abaixo da superfície de contato). As equações de (4) a (6) são para as tensões sobre a superfície do flanco do dente.

- tensões devidas ao atrito entre os flancos:

$$\tau_{xz} = -\mu \cdot P_0 \left\{ \lambda_1 \left[2 \left(\frac{x}{a} \right)^2 - 3 \left(\frac{z}{a} \right)^2 - 2 \right] + \frac{2x}{a} - \frac{2x\lambda_1}{a} \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 - \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right] \right\} \quad (7)$$

$$\tau_{yz} = -\mu \cdot P_0 \left(\frac{z}{a} \right)^2 \quad (8)$$

$$\tau_{zx} = -\mu \cdot P_0 \left\{ \frac{z}{a} \lambda_1 \left[1 + 2 \left(\frac{x}{a} \right)^2 + 2 \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right] - \frac{2z}{a} - \frac{3x}{a} \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right\} \quad (9)$$

$$\tau_{xy}(z=0) = \begin{cases} -2\mu P_0 \frac{x}{a} & p/1 \times 1 < a \\ -2\mu P_0 \left\{ \frac{x}{a} + \left[\left(\frac{x}{a} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} & p/1 \times 1 = a \\ -2\mu P_0 \left\{ \frac{x}{a} + \left[\left(\frac{x}{a} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} & p/1 \times 1 > a \end{cases} \quad (10)$$

$$\tau_{xy}(z=0) = 0 \quad (11)$$

$$\tau_{yz}(z=0) = \begin{cases} -\mu \cdot P_0 \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} & p/1 \times 1 < a \\ 0 & p/1 \times 1 > a \end{cases} \quad (12)$$

As equações de (7) a (9) são válidas para $z > 0$ (a baixo da superfície de contato). As equações de (10) a (12) são para as tensões sobre a superfície de flanco do dente.

Nas formulas acima

$$\lambda_1 = \frac{1-\beta}{\alpha_1^2} \left(\frac{1}{\beta^2 + 2\beta + 1 - 4\alpha_1^{-2}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\lambda_2 = \frac{1-\beta}{\alpha_1^2} \left(\frac{1}{\beta^2 + 2\beta + 1 - 4\alpha_1^{-2}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$$

$$\alpha_1 = \left(1 + \frac{x}{a} \right)^2 + \left(\frac{z}{a} \right)^2$$

$$\alpha_2 = \left(1 - \frac{x}{a} \right)^2 + \left(\frac{z}{a} \right)^2$$

μ coeficiente de atrito

P_0 máxima pressão hertziana de contato

a metade da largura da superfície deformada.

As tensões resultantes são:

$$\overline{\sigma}_x^* = \overline{\sigma}_{xm} + \overline{\sigma}_{xi}$$

$$\overline{\sigma}_z^* = \overline{\sigma}_{zm} + \overline{\sigma}_{zi}$$

$$\overline{\sigma}_{xz}^* = \overline{\sigma}_{xzm} + \overline{\sigma}_{xzi}$$

e, as tensões principais

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\overline{\sigma}_x^* + \overline{\sigma}_z^*}{2} \pm \left[\left(\frac{\overline{\sigma}_x^* - \overline{\sigma}_z^*}{2} \right)^2 + \overline{\sigma}_{xz}^{*2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\tau_{máx} = \pm \left[\left(\frac{\overline{\sigma}_x^* - \overline{\sigma}_z^*}{2} \right)^2 + \overline{\sigma}_{xz}^{*2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Para facilitar sua aplicação, a partir desta equação de $\tau_{máx}$ mostrou-se uma curva paramétrica, fazendo $x/a = 0,195$ que resultou no máximo valor da relação $\tau_{máx}/P_0$. O coeficiente de atrito será adotado inicialmente 0,06 e depois será verificada a alteração da curva com o coeficiente de atrito.

Os parâmetros que devem ser conhecidos são indicados na figura 10. Assim sendo

F força de contato (N)

l largura do dente

ρ raio de curvatura do flanco do dente

ν coeficiente de Poisson

E módulo de elasticidade, temos

N potência (KW)

$$a' = \frac{l \cdot F}{\pi \cdot E \cdot K} \quad \text{e} \quad P_0 = \frac{F \cdot K}{\pi \cdot l}$$

onde

$$\bar{F} = \frac{3 \cdot 10^3 \text{ N}}{\pi \cdot \bar{p}_0 \cdot r_0 \cdot \sin \alpha}$$

$$K = \frac{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}{(1 - \nu_1^2) \frac{1}{E_1} + (1 - \nu_2^2) \frac{1}{E_2}}$$

temos então a curva mostrada abaixo

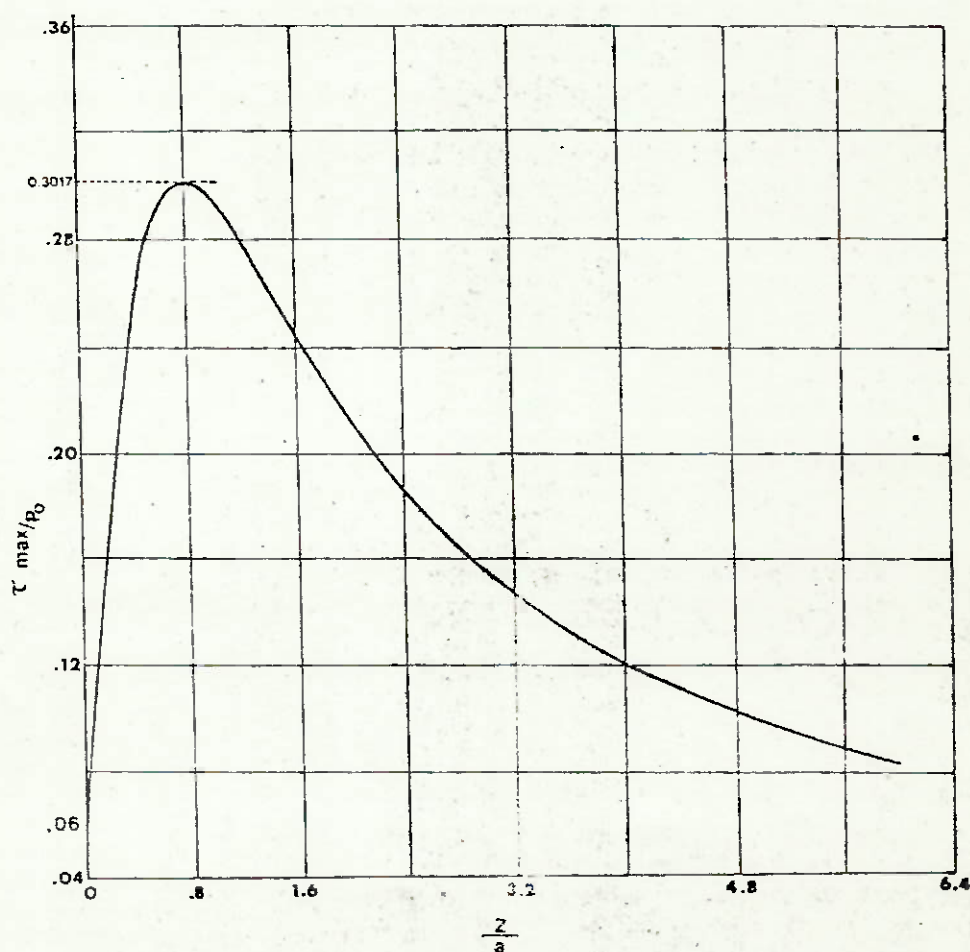


Figura 14 : Curva paramétrica das tensões máximas de cisalhamento abaixo da superfície de contato em função da distância abaixo da superfície [5]

A variação das tensões máximas de cisalhamento abaixo da superfície em função de diferentes parâmetros de projeto é evidenciada nas figuras a seguir:

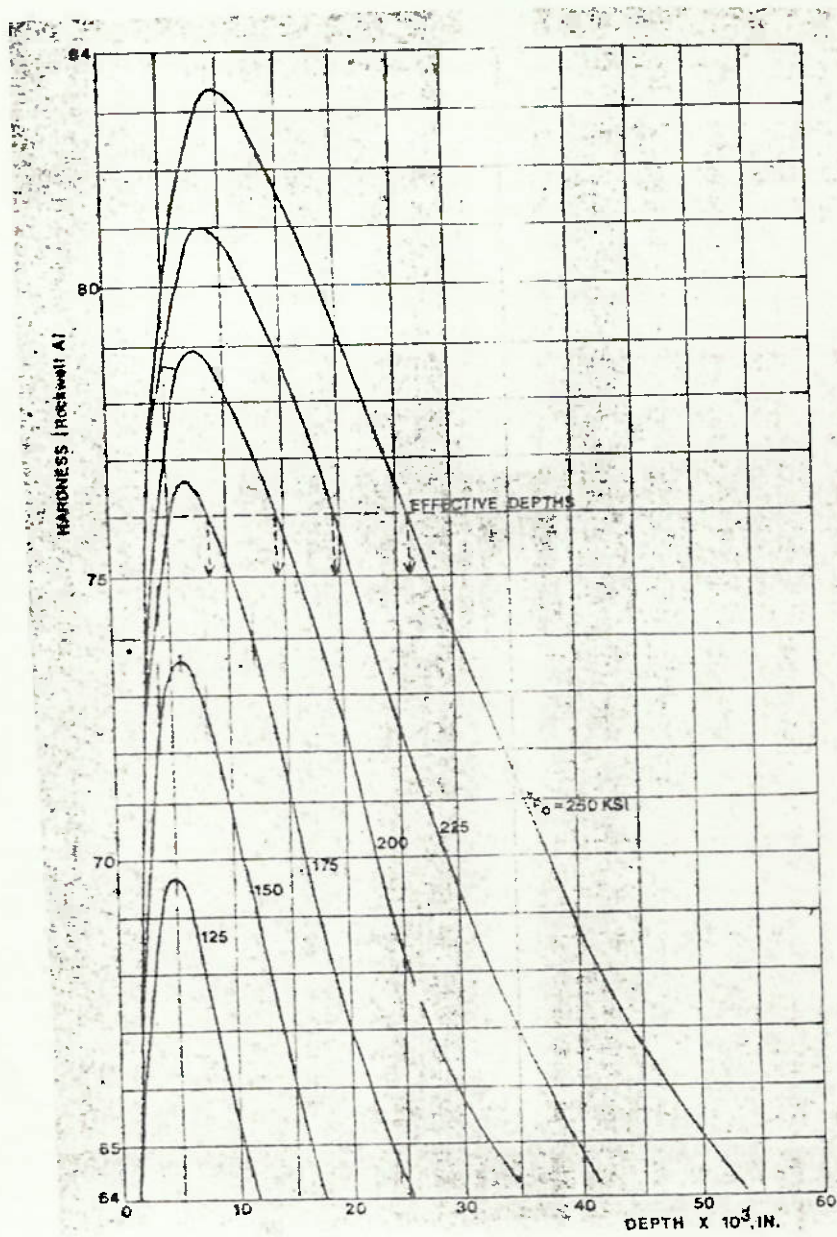


Figura 15 : Efeito da máxima pressão de contato (P_0)
 ($\mu = 0,06$, $K = 10,9 \cdot 10^3 \text{ N mm}^{-3}$) [5]

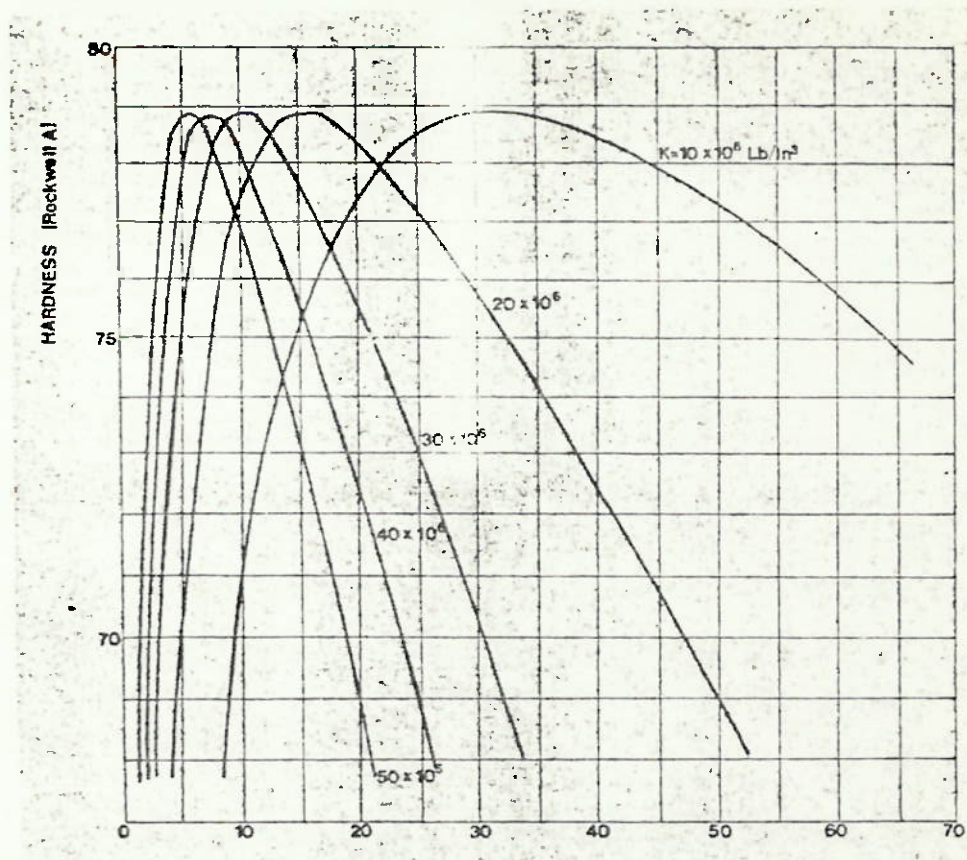


Figura 16 : Efeito de K ($P_0 = 1,4 \cdot 10^3 \text{ N mm}^{-2}$) $\mu = 0,06$ [5]

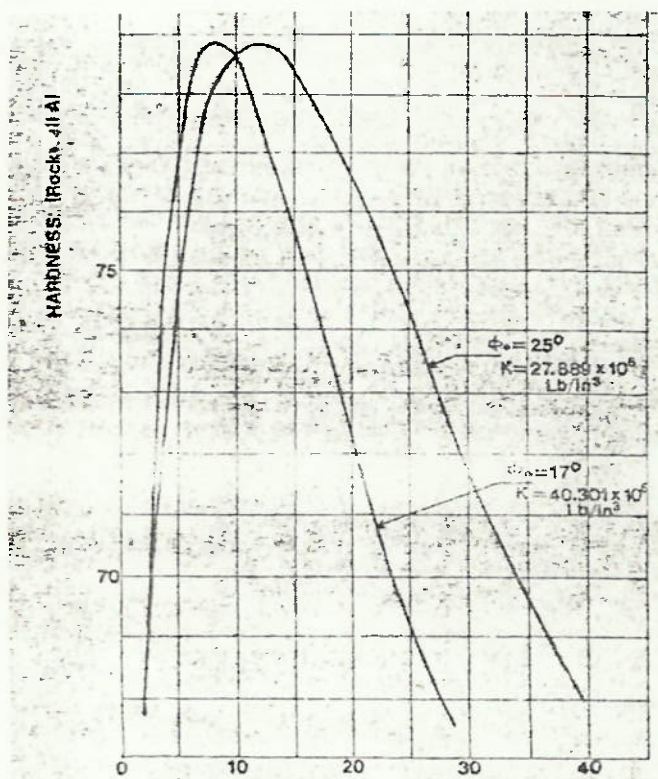


Figura 17 : Efeito do ângulo de pressão (ϕ_0) ($P_0 = 1,4 \cdot 10^3 \text{ N mm}^{-2}$)
 $\mu = 0,06$, $i = 4,121$ - redução). [5]

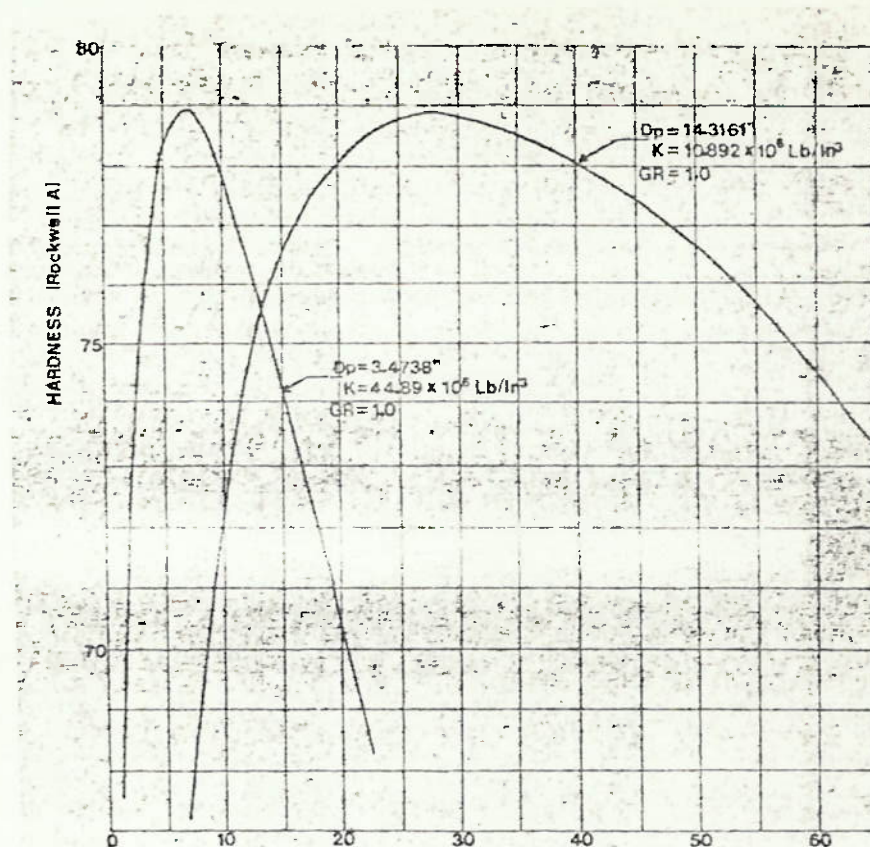


Figura 18: Efeito do tamanho da engrenagem (mn) ($P_o = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Nmm}^{-2}$)
 $\mu = 0,06$, $\alpha_o = 25^\circ$ e $i = 1$). [5]

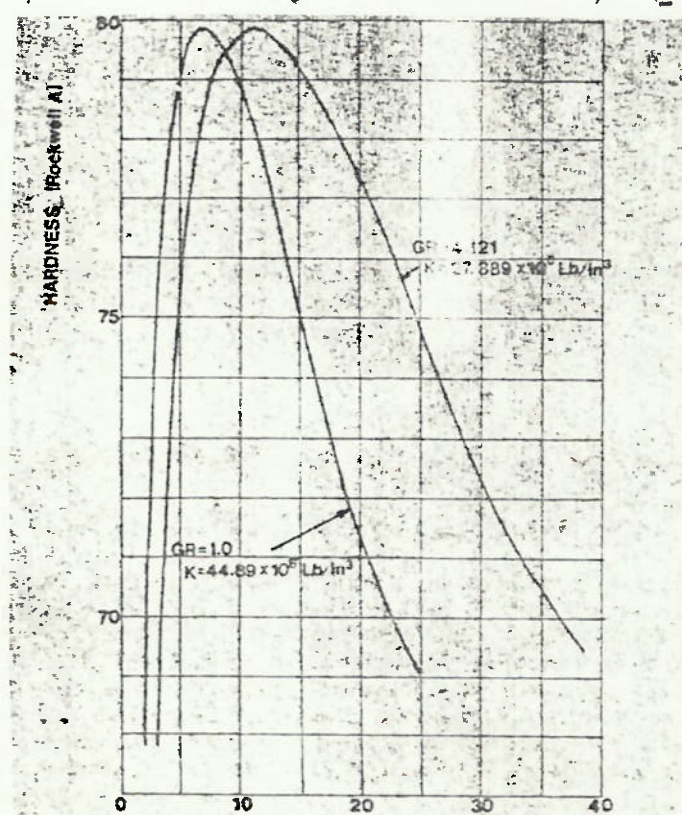


Figura 19 : Efeito da relação de transmissão (i) ($P_o = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Nmm}^{-2}$)
 $\mu = 0,06$). [5]

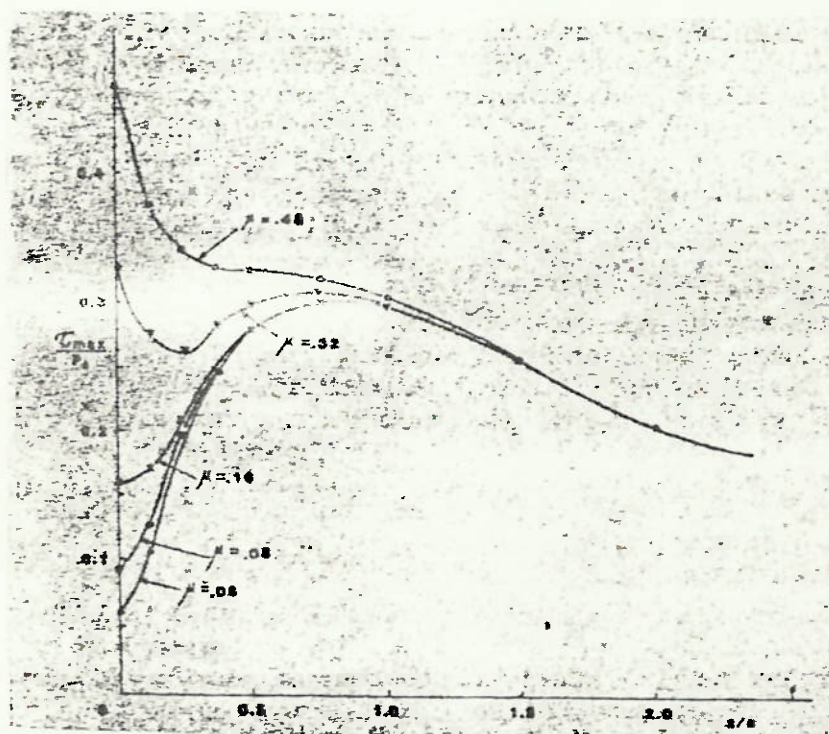


Figura 20 : Efeito do coeficiente de atrito (μ) [6]

4. MODELAGEM DOS ESFORÇOS NO PÉ DO DENTE

Durante o engrenamento, o pé do dente está sujeito a tensões normais de tração e compressão bem como a tensão de cisalhamento, que variam de acordo, com o braço de alavanca entre a força de contato aplicada e a base do dente. Essas tensões, aplicadas de maneira repetida, levam a ruptura por fadiga no pé do dente. A seção de ruptura, ou seja, a seção crítica, pode ser estabelecida através da parábola de igual resistência. Atualmente, entretanto, a seção crítica é definida pelos pontos de tangência no pé do dente a dois segmentos inclinados de 30° em relação ao eixo de simetria do dente.

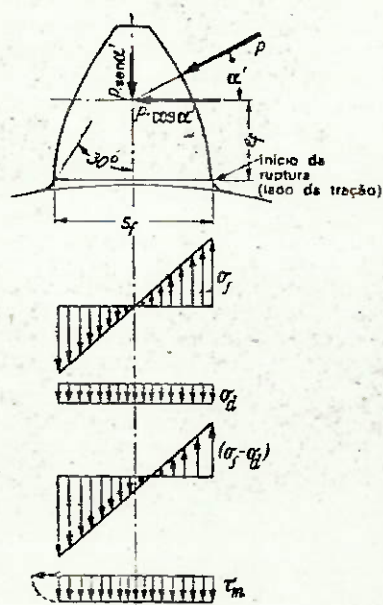


Figura 21 : Tensões na seção crítica

Como podemos verificar, na seção crítica temos atuando em módulo, tensões normais de compressão maiores que as de tração. Entretanto, como a propagação de trincas por fadiga se dá invariavelmente do lado tracionado, a tensão crítica para a ruptura por fadiga do pé do dente é a tensão máxima de tração que atua na seção crítica, combinada com a tensão de cisalhamento que atua nessa seção, resultando numa tensão equivalente, como apresentado abaixo. [7].

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_f - \tau_c)^2 + (2,5 \cdot \tau_m)^2}$$

onde

$$\sigma_f = \frac{6 \cdot F \cdot e_f \cdot \cos \alpha}{l \cdot b_f}$$

$$\tau_c = \frac{F \cdot \sin \alpha}{l \cdot b_f}$$

$$\tau_m = \frac{F \cdot \cos \alpha}{l \cdot b_f}$$

resultando em
$$V = \frac{F \cdot Y_F}{H \cdot m \cdot L \cdot \cos \alpha}$$

onde Y_F coeficiente do pé do dente

m módulo

α angulo de pressão

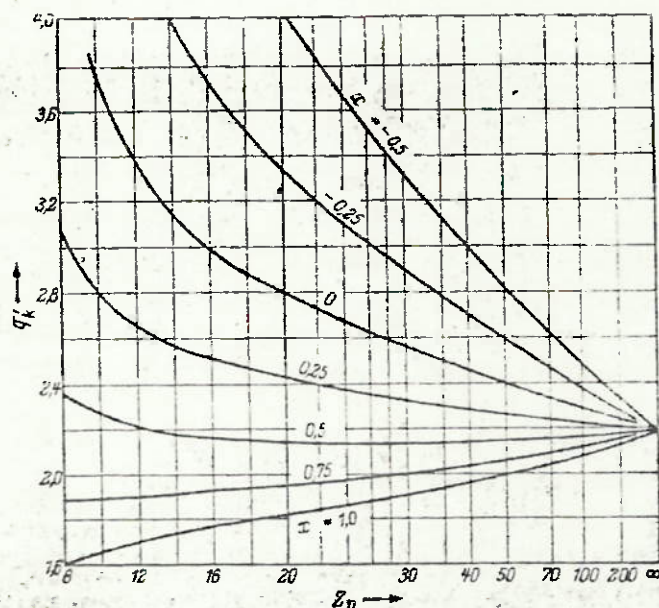


Figura 22 : Coeficiente do pé do dente

5. TRATAMENTOS TÉRMICOS: PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS

A seleção adequada do material e tratamento térmico para uma dada engrenagem implica no conhecimento profundo das características de resistência, que resultam de cada tratamento. Assim, vamos inicialmente apresentar um resumo dos principais tratamentos térmicos e termoquímicos [8]

5.1. DESCRIÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Vide figura 9.

5.2. CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA DA ENGRENAGEM EM FUNÇÃO DA ESTRUTURA OBTIDA

Os diferentes tratamentos térmicos resultam em propriedades distintas e consequentemente em maior ou menor resistência da engrenagem. A escolha do tratamento térmico e do material deve ser feita de maneira a atender da melhor maneira, as solicitações a que a engrenagem está sujeita.

Assim, como veremos no capítulo seguinte, a ordem de grandeza relativa entre as tensões no pé e no flanco do dente e a importância do desgaste superficial é que determina a melhor "adaptabilidade" de um ou outro tratamento.

Tres parâmetros de tratamento térmico são diretamente responsáveis pela maior ou menor resistência da engrenagem a uma dada solicitação. Assim, a dureza superficial esta diretamente relacionada com a resistência ao desgaste, ou seja, mantidas rugosidade superficial e lubrificação constantes, quanto maior a dureza do flanco, maior a sua resistência ao desgaste. O gradiente da dureza, ou seja, a variação de dureza da superfície para o núcleo, tem influência direta sobre a resistência à fadiga no flanco do dente. Se em algum ponto abaixo da superfície a resistência (ou seja, a dureza) for menor que aquela necessária para suportar as tensões que a deformação da superfície de contato provoca, pode parecer aí uma microtrinca que se propagaria a seguir com a repetição cíclica do carregamento. Assim, o gradiente de dureza não pode apresentar, em geral uma queda brusca. Finalmente, a dureza de núcleo influe assim na resistência à fadiga do flanco do dente, pe

la atuação direta que tem sobre o gradiente de durezas, e indiretamente na resistência à fadiga do pé do dente, pelo efeito sobre as tensões residuais, que será descrito em detalhes a seguir.

5.2.1 - GRADIENTE DE DUREZA

A variação de dureza, da superfície para o núcleo da engrenagem é diferente para os diferentes tratamentos térmicos e termoquímicos. Assim, para a têmpera, esta é a função direta da temperabilidade do material e do meio de resfriamento utilizados. O anexo apresenta curvas.

A têmpera superficial por chama ou indução apresenta um gradiente de dureza que é função da camada temperada, bem como os tratamentos termoquímicos de cementação e nitretação, que apresentam gradientes de dureza em função dos percentuais de carbono e nitrogênio difundidos e ainda no caso da cementação da temperabilidade do material e na nitretação da presença de elementos químicos forte formadores de nitretos, como Al, Cr, W e V.

A título de ilustração, os diferentes gradientes de dureza apresentam-se segundo o aspecto indicado na curva abaixo.

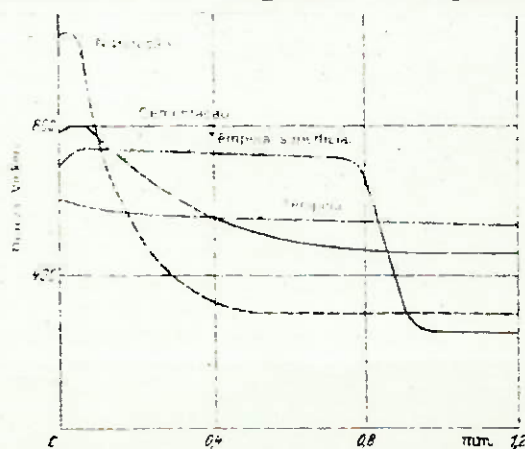


Figura 23 : Variação de dureza em função da profundidade abaixo da superfície para diferentes tratamentos térmicos [7]

Além de apresentarem diferentes gradientes de dureza, cada tratamento implica no desenvolvimento de tensões internas causadas pela variação volumétrica não uniforme que transformações estruturais e/ou gradientes de temperatura originam tensões internas podem surgir também como resultado da adsorção e difusão de átomos que ocorre nos tratamentos termoquímicos. Tais tensões internas são portanto residuais e influem diretamente na resistência à fadiga do pé do dente. Ensaios efetuados com tensões de tração e compressão demonstraram que a tensão de compressão é fato importante no impedimento de propagação da trinca [9]. Assim, em qualquer hipótese são preferíveis tensões de compressão no pé do dente.

Figura 24 : Esquema ilustrativa da distribuição das três tensões normais residuais que são originadas a partir do resfriamento de um pino de aço.

Tratamentos como nitretação subcrítica e revenimento, que são efetuados abaixo da temperatura de austenitização provocam o surgimento de tensões de compressão na superfície. Isto ocorre pois a superfície se resfria primeiro, diminuindo de volume e provocando uma deformação plástica à quente do núcleo. Quando este então, se resfria e diminui de volume tende a provocar tensões radiais de tração, resultando em tensões axiais e circunferências de compressão.

O resfriamento de têmpera provoca a transformação martensítica primeiro na superfície, que por isso aumenta de volume e traciona radialmente o núcleo deformando-o plasticamente a quente. Quando então a temperatura de início de transformação ' martensítica é atingida no núcleo este se expande, originando tensões radiais de compressão e consequentemente axiais e circunferenciais de tração. O revenimento posterior pode apenas aliviar uma parte destas tensões. Assim, uma engrenagem beneficiada apresentará tensões circunferenciais de tração, o que é bastante prejudicial em termos de resistência à fadiga do pé do dente.

O resfriamento de têmpera após a cementação pode resultar na transformação martensítica ocorrendo primeiro na superfície ou no núcleo, resultando assim em tensões circunferenciais de tração ou compressão. Isto ocorre devido à diferente composição química entre superfície (camada cementada) e núcleo. O aumento do teor de carbono abaixa a temperatura de início de transformação martensítica. Assim, em última análise, desde que o gradiente de temperatura entre superfície e núcleo seja tal que a temperatura de início de transformação martensítica seja atingida primeiro no núcleo, este se expandirá, deformando plasticamente a ' quente a superfície. Esta, quando então se expandir por transformação martensítica, tracionará radialmente o núcleo, resultando em

tensões circunferenciais de compressão. Assim para um dado material (e conseqüente meio de resfiamento, existe um tamanho máximo de engrenagem (módulo do dente) a partir do qual a cementação resultará em tensões de tração circunferenciais. Quanto maior a temperabilidade do material, tanto maior será esse módulo máximo.

Finalmente, na têmpera superficial por chama ou indução, como somente a camada se transforma e se expande, resultam tensões circunferenciais de compressão.

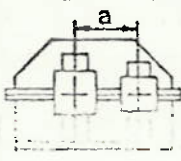
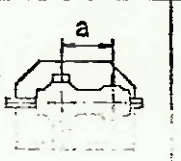
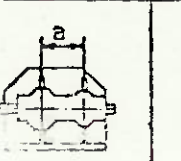
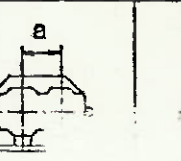
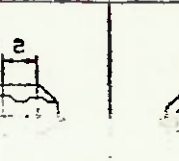
O apêndice apresenta alguns folhetos técnicos que detalham as particularidades de alguns dos tratamentos.

6. SELEÇÃO DO MATERIAL E TRATAMENTO TÉRMICO

Como já foi dito, a seleção do material e respectivo tratamento térmico para uma engrenagem deve levar em conta a ordem de grandeza dos bens como esforços a que os flancos e o pé do dente estão sujeitos. Em geral, dada a aplicação já se tem uma idéia sobre o processo de fabricação (que engloba conformação e beneficiamento posteriores).

A título de ilustração, a tabela abaixo apresenta uma comparação entre peso e dimensões de redutores fabricados com engrenagens de materiais e tratamentos diferentes [*]

TABELA 7 : Comparação entre dimensões de redutores que transmitem o mesmo torque, porém fabricados por diferentes processos.

Materiais	Pi. e En. C 45	Pi. e En. 42 CrMo 4	Pi. 20MnCr5 En. 42CrMo4	Pi. e En. 31CrMoV9	Pi. e En. 34CrMo4	Pi. e En. 20MnCr5
Tratamento térmico	Normalizado	beneficiado	Pi. cement. En. benef.	nitretado a gás	temp. por indução	cementado
Usinagem	fresado	fresado	Pi. rotif. En. fres.	fresado fino	fresado lapidado	retificado
a mm	830 mm	650 mm	585 mm	490 mm	475 mm	390 mm
Diagramas						
Peso kg	8.505 kg	4.860 kg	3.465 kg	2.620 kg	2.390 kg	1.581 kg
Peso em %	174%	100%	71%	54%	49%	33%
Segur. S _G S _B	1,3 6,1	1,3 5,7	1,3 3,9	1,3 2,3	1,4 2,3	1,6 2,3

De uma maneira geral, pode-se a seguinte orientação:

NITRETAÇÃO (Processo Tenifer): indicado para engrenagens pequenas ($Mn \leq 4$), cuja principal causa de avaria seja o desgaste dos flancos.

CEMENTAÇÃO: indicado para engrenagens que transmitam torques elevados, com reduzidas dimensões. Exige via regra retificação posterior ao tratamento, o que encarece bastante o processo de fabricação.

CEMENTAÇÃO / NITRETAÇÃO (Processo Tenifer): a combinação de pinhão cementado e coroa teniferizada constitui-se numa alternativa ao caso anterior, com pequeno aumento de dimensões de dimensões, em alguns casos, porém com econo-

38.
mã de fabricação da coroa (material e tratamento mais baratos; dispensa retífica posterior).

BENEFICIAMENTO + NITRETAÇÃO (Processo Tenifer): indicado para engrenagens em que se deseje um custo de fabricação menor. O material pode ser fornecido pré-beneficiado, se guidos contatos com o fornecedor. Procede-se então a usinagem e acabamento da engrenagem que é então teni ferizada.

TÊMPERA SUPERFICIAL: indicada para engrenagens pequenas de produção seriada (têmpera por indução) ou engrenagens gran des ($Mn > 30$), que por limitações de tamanho de forno não possam ser cementadas.

O Apendice apresenta ainda uma série de exemplos. Assim, tende-se a uma noção do material e tratamentos adequados, procede-se ao pré-cálculo do par engrenado.

O apendice 1 apresenta um programa para microcompu tador em linguagem "Basic" e um roteiro de cálculo mais elaborado.

De maneira mais apurada, dois métodos de seleção de material podem ser utilizados, de maneira relativamente indepen dente, como descreveremos a seguir.

6.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS SEGUNDO A TEMPERABILIDADE

O princípio sobre o qual se baseia este método é c de que o material deve apresentar a mínima temperabilidade que ain da atenda às solicitações de serviços. Assim, a microestrutura do material e sua resultante dureza devem ser tais que garantam a re sistência mínima desejada.

A microestrutura pode ser estabelecida segundo o critério de:

- 90% de martensita, no mínimo, na região mais solicitada da seção crítica, sendo que esta porcentagem pode ser menor em regiões menos solicitadas da seção crítica, de maneira a resultar numa distribuição de tensões residuais de compressão na superfície, ou pelo menos, em tensões de tração superficiais de menor valor que aquelas que se obteria para uma maior expansão volumétrica do núcleo que resultaria de um maior percentual de transformação martensítica.
- 80% de martensita em peças menos solicitadas.

O teor mínimo de carbono para atingir uma dada dureza, em função da porcentagem de martensita presente na estrutura é mostrado na figura abaixo.

Figura 26: Dureza superficial atingida após têmpera em função do teor de carbono, para diferentes percentuais de transformação martensítica.

para aços de até 0,5% C

De maneira genérica, o limite de resistência, bem como o de escoamento, pode ser relacionado com a dureza, como demonstram as figuras abaixo:

Figura 27: Dureza em função do limite de resistência [11]

Figura 28: Relação entre limite de resistência e limite de escoamento. [11]

Figura 29: Relação entre limite de resistência e estrição [11]

A dureza que aparece nos diagramas anteriores é obtida após têmpera e revenimento. Como vimos, o revenimento provoca um aumento da tenacidade em detrimento da dureza. Assim, dada uma dureza mínima desejada após revenimento, a dureza necessária após têmpera é apresentada no gráfico abaixo:

Figura 30 : Dureza mínima necessária após têmpera para uma dada dureza após revenimento. [11]

Assim conhecida a dureza necessária após têmpera, devemos considerar o efeito de massa da engrenagem para estabelecermos o meio de resfriamento adequado. A velocidade de resfriamento é fixada em função do grau de distorção admitido.

Assim o processo de seleção é como segue:

- 1º : Através da relação $D = f(m)$
determina-se o diâmetro equivalente da engrenagem.
- 2º : Em função da experiência anterior, processo de fabricação e precisão de montagem determina-se a velocidade de resfriamento, ou seja, a severidade de têmpera .

39 : Adota-se em certo raio (r) como indicador da profundidade onde ocorrem as tensões críticas, ou seja, até onde é desejável a mínima transformação martensítica de 90%. Estes valores substituídos no respectivo gráfico de Lamout (abaixo), resultam na equivalente distância da ponta temperada do ensaio Jominy.

- 4º : A distância da extremidade temperada assim obtida pode ser introduzida nas curvas de temperabilidade Joniny dos diferentes materiais. Aqueles aços, que a esta distância, atingirem dureza maior que aquela mínima desejável por questões de resistência, serão satisfatórios segundo este critério.
- 5º : Como o controle de qualidade após o tratamento térmico é feito por medidas de dureza superficial, entrando-se agora no gráfico de Lamont com mesmos $H e d$ e com $V/R = 0,9$, determina-se uma nova distância equivalente, que levada as correspondentes gráfico Joniny fornece a dureza superficial de têmpera.
- 6º : A dureza superficial após têmpera e revenido é estabelecida admitindo-se que a variação de dureza HRC no núcleo e superfície, após têmpera e após revenido sejam iguais. A dureza assim obtida é a mínima na superfície. A máxima corresponde a este valor adicionado a 4 HRC

6.2. SELEÇÃO DE MATERIAIS SEGUNDO SEU GRADIENTE INTRÍNSECO DE RESISTÊNCIA

O princípio sobre o qual se baseia este método é o de que o material deve apresentar uma variação de resistência (ou seja, de microestruturas) tal que em nenhum ponto seja atingida a tensão limite de fadiga naquele ponto. Assim, o gradiente de dureza deve ser tal que garanta a resistência mínima desejada.

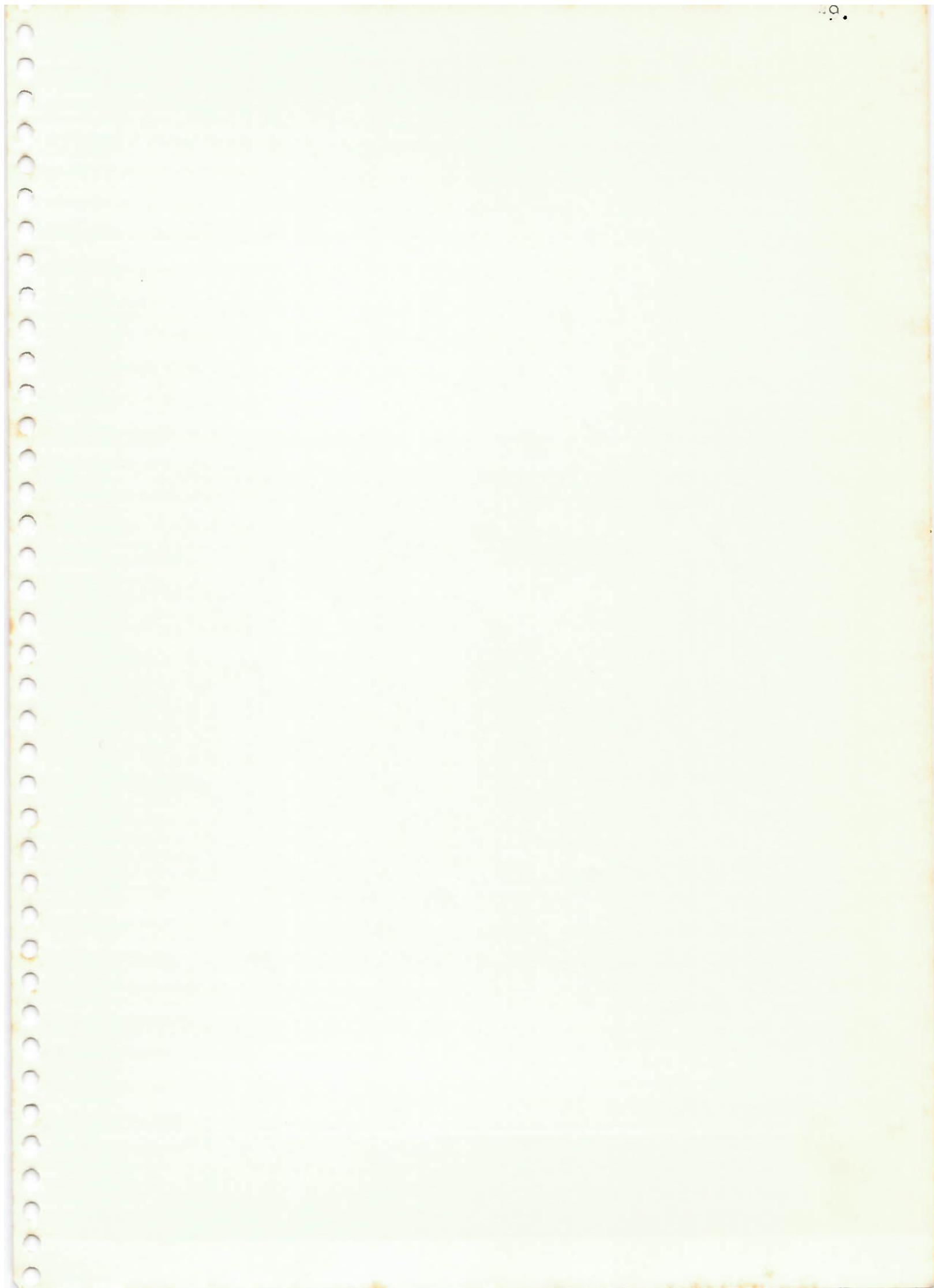
A dureza Brinell, pode ser relacionada com a tensão de cisalhamento como segue:

$$\tau_{max} = 1 HB$$

Assim, o gradiente de tensões máximas de cisalhamento abaixo da superfície de contato, obtido segundo o método descrito no capítulo 3, pode ser convertido para um gradiente de durezas mínimas a serem obtidas após tratamentos térmicos.

Assim, o processo de seleção é como segue:

1º : Através da curva paramétrica a seguir, estabelecemos o gradiente de tensões de cisalhamento abaixo da superfície.



2º : Adotando um coeficiente de segurança de 1,38 podemos escrever:

$$1 \text{ HB} = 1\%_{\text{máx}} \quad (\text{com } \sigma_{\text{máx}} \text{ em MPa})$$

3º : A dureza Brinell pode ser convertida a pela relação:

ou segundo tabela anexa

4º : A comparação da curva obtida com a figura 23 permite estabelecer o tratamento mais adequado.

5º : O próprio gradiente obtido serve como especificação do tratamento, utilizando-se uma das definições de profundidade en durecida da norma DIN.

A P E N D I C E

BIBLIOGRAFIA

1. RAZIN, C. - A Seleção de Materiais e seu significado econômico, palestra proferida na Brasimet, 1981.
2. Norma DIN 3979
3. LITTMAN, W. E. e WIDNER, R. L - Propagation of contact fatigue from surface and subsurface origins, J. Basic Eng., 188 (3) (1966) 624-636
4. Popinceam, N.G.; Diaconescu, E. e Cretu, S - Critical stress in Rolling Contact Fatigue - Wear, 71 (1981) 265-282
5. ELKHOLY, A. H. - Case Depth Requirements in Carbunized Gears - Wear, 88 (1983) 233 - 244
6. ELKHOLY, A. H. - Optimum Carburization in External Spin Gears - Wear, 95 (1984) 79 - 86
7. Niernan, G. - Elementos de Máquinas, Vol I, 85 - 86, Vol II, 165 - 168 (1971)
8. CAIROLLI, O. B. - Descrição dos Tratamentos Térmicos, palestra de mesmo nome proferida na Brasimet - 1985
9. SCUZA, S. A. - Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos, 5.^a ed. pág. 197.
10. Apostila Transmotécnica
11. Apostila Engesa

BRASIMET

DESCRIÇÃO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

O. B. CAIROLI

DESCRIÇÃO DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

Orpheu B. Cairolli

<u>ÍNDICE</u>	<u>PÁG. Nº</u>
I- Introdução	1
II- Variáveis Comuns	1
1. Temperatura	1
2. Tempo	1
3. Atmosfera	2
4. Velocidade de Resfriamento	2
III- Classificação de Processos de Tratamentos Térmicos	2
1. Recozimento	2
1A - Recozimento Total ou Pleno	3
1B - Recozimento Isotérmico	3
1C - Recozimento para Alívio	4
1D - Esferoidização ou Coalescimento	4
2. Normalização	5
3. Têmpera - Geral	5
3A - Têmpera	5
3B - Martêmpera	6
3C - Austêmpera	6
4. Revenimento	7
5. Solubilização/Precipitação/Envelhecimento	8
6. Outros Processos	9
6A - Aços Especiais	9
6B - Têmpera por Chama	10
6C - Têmpera por Indução	10
6D - Brazagem	11

<u>ÍNDICE</u>	<u>PÁG. Nº</u>
IV- Classificação de Processos de Tratamentos Termo-Químicos	12
1. Cementação	12
1A - Cementação Sólida	13
1B - Cementação Líquida	14
1C - Cementação Gasosa	15
1D - Tratamento Térmico de Cementação	16
2. Nitretação	18
2A - Nitretação a Gás	18
2B - Nitretação Banho de Sal (TENIFER)	19
3. Carbonitretação	20
3A - Carbonitretação Gasosa	20
3B - Carbonitretação Líquida	21
4. Boretção	21
5. Atmosferas para Tratamento Térmico	23
V- Classificação de Equipamentos para Tratamento Térmico	24
1. Aquecidos a óleo ou gás	24
2. Aquecidos Eletricamente	25
VI- Bibliografia	26

Orpheu B. Cairolli

I- INTRODUÇÃO

Por definição, tratamento térmico é a sequência de operações de aquecimento e resfriamento sob determinadas condições de temperatura, tempo e atmosfera, onde, com o controle de velocidade de resfriamento, objetiva-se modificar as propriedades físicas do material tratado.

Normalmente os objetivos determinam as condições do processo que podem ser estudadas a partir de diagrama, curvas e composição dos materiais a serem tratados. Entretanto o enfoque a ser dado neste estudo é diretamente relativo ao processo de tratamento térmico em si, respeitando-se as diversas variáveis anotadas na realização dos tratamentos em escala industrial.

II- VARIÁVEIS COMUNS

Todos os processos de tratamentos térmicos estão basicamente subordinados a quatro fatores de influência, a saber:

1. Temperatura

Conjugando-se as informações de composição química, estrutura e nível de modificações estruturais que se deseja, pode-se determinar temperaturas de aquecimento, em caráter elementar, à partir do Diagrama de Equilíbrio Fe-C(Fe-Fe₃C).

2. Tempo

Deve ser estudado com bases nas proporções das peças ou cargas a serem tratadas em relação à potência de equipamento.

3. Atmosfera

Interfere nos resultados de oxidação ou descarbonetação superficial da peça, além de ser determinante nos processos termo-químicos.

4. Velocidade de Resfriamento

Normalmente orientada pelas curvas de Transformação - Tempo - Temperatura são as responsáveis pelos resultados físicos, do processo. As diferentes velocidades de resfriamento são obtidas através da utilização de diferentes meios de resfriamento (ar, óleo, água, etc.).

III- CLASSIFICAÇÃO DE PROCESSOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS

1. Recozimento

Consiste no processo de aquecimento de qualquer tipo de material a uma temperatura de transformação de fases, seguido de resfriamento lento. Os objetivos do recozimento são os seguintes:

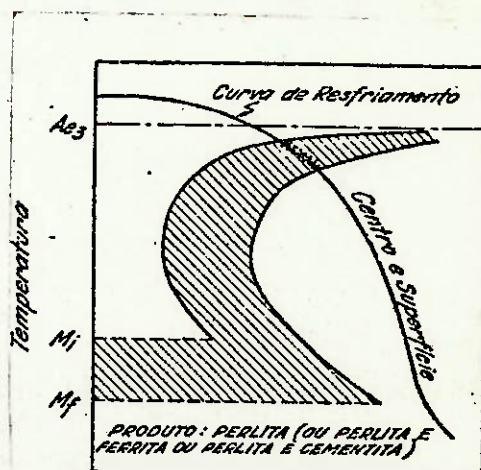
- Remover tensões
- Diminuir dureza
- Melhorar usinabilidade
- Alterar resistência mecânica
- Aumentar ductilidade
- Modificar características eletro-magnéticas
- Ajustar tamanho de grão
- Regularizar textura bruta de fusão
- Remover gases
- Eliminar tratamentos térmicos anteriores.

1A. Recozimento total ou pleno

Consiste na austenitização completa do aço seguida de um resfriamento muito lento realizado, com controle da velocidade de resfriamento.

A perlita final será grossa, uma estrutura ideal para melhorar a usinabilidade de aços de baixo e médio carbono.

Fig. 1



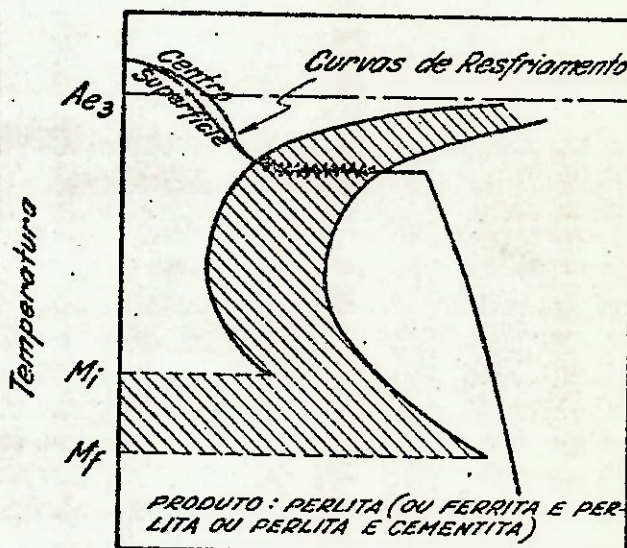
Tempo, esc. log.
Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno.

1B. Recozimento Isotérmico ou Cíclico

Consiste em aquecer o material da mesma forma que no recozimento pleno, seguido de um resfriamento rápido, até uma temperatura, de transformação polifásica, manter o tempo necessário para que toda a perlita se transforme sem alteração da temperatura e em seguida esfriar até a temperatura ambiente.

A estrutura final é mais uniforme que no recozimento pleno e o ciclo de tratamento é mais curto. É um tratamento re-

Fig. 2



Tempo, esc. log.
Diagrama esquemático de transformação para recozimento isotérmico ou cíclico.

comendado para peças pequenas, mas não vantajoso para peças grandes visto que se torna mais difícil resfriar o núcleo dessas peças rapidamente para a temperatura de transformação da perlita.

1C. Recozimento para alívio de tensões

Neste caso, também conhecido de sub-crítico, o aquecimento é feito a uma temperatura abaixo do limite inferior, da zona crítica. O objetivo específico deste tratamento é aliviar tensões originadas durante a solidificação ou produzidas em operações de transformações mecânicas, endireitamento, corte por chama, soldagem ou ainda usinagem.

Não existe o objetivo de transformação de estrutura neste tratamento.

1D. Esferoidização ou Coalescimento

Tem por objetivo produzir uma forma globular ou esferoidal dos carbonetos constantes do material. Como resultado, melhora a usinabilidade e a deformabilidade a frio dos aços de alto teor de carbono.

O processo deste tratamento pode ser realizado de três maneiras, conforme representam os gráficos abaixo:

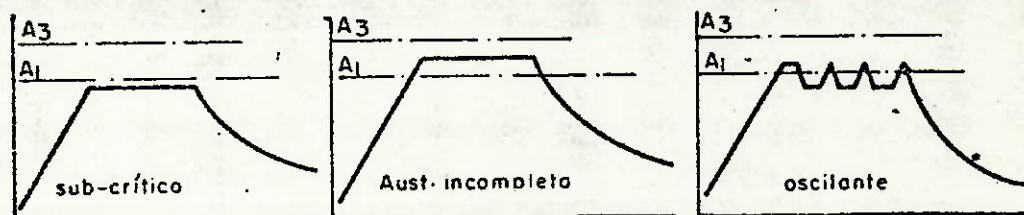


Fig. 3

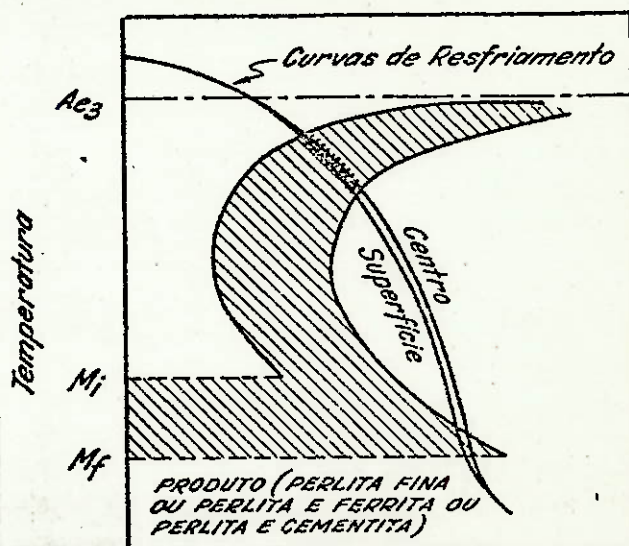
2. Normalização

Consiste na austenitização do aço seguida de um resfriamento ao ar.

Este tratamento tem por objetivo o refino da granulção grosseira do material e da perlita existente e a uniformização, da estrutura. A normalização pode ser utilizada antes da têmpera para evitar deformações em peças que necessitam ser temperadas. Também melhora a usinabilidade principalmente de aços com médio teor de carbono.

OBS.: Dependendo do tipo do material pode obter-se como produto final a bainita.

Fig. 4



Tempo, esc. log.

Diagrama esquemático de transformação para normalização.

3. Têmpera - Martêmpera - Austêmpera

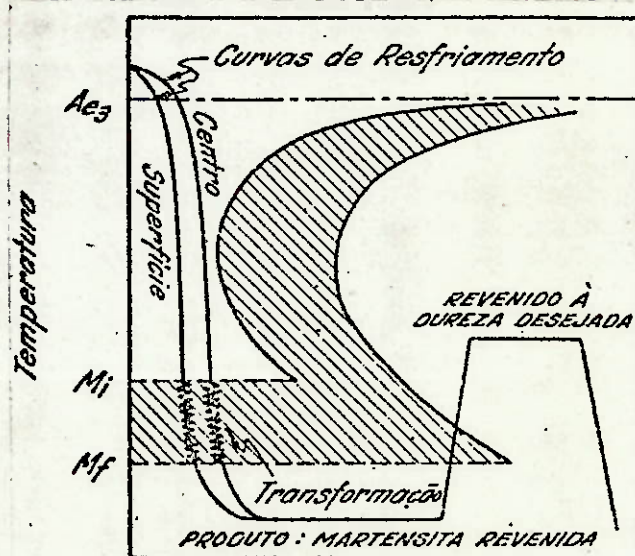
Nestes tratamentos o material deve ser austenitizado e em seguida resfriado rapidamente conforme o caso:

Fig. 5

3A. Têmpera

Neste caso o resfriamento rápido objetiva a formação da martensita (conforme diagrama) que se caracteriza como um constituinte de elevada resis

Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido.



Tempo, esc. log.

tência à tração e elevada dureza com notável resistência ao desgaste por atrito.

Em contrapartida apresenta baixa resistência ao choque e fragilidade. O material deve ser revenido.

3B. Martêmpera

Também tem como objetivo principal a formação da martensita e é aplicado, principalmente em peças onde o importante é não haver empenamento ou distorção da forma, o que é conseguido levando-se em conta que o resfriamento é controlado e mais lento. Conforme nota-se no diagrama.

Na prática, o banho de resfriamento deve estar a uma temperatura próxima de MF na curva T.T.T. do material tratado.

Os aços mais usados neste tratamento são: SAE 1090, 4130, 4140, 4150, 4340, 4640, 5140, 6150, 8630, 8640, 8740, 8745 e os de cementação SAE 3312, 4620, 5120, 8620 e 9310.

3C. Austêmpera

É um tratamento isotérmico que não visa a formação da martensita e sim da BAINITA, o que torna desnecessário o revenimento posterior.

Neste tratamento também conseguimos relativa dureza sem que

Fig. 6

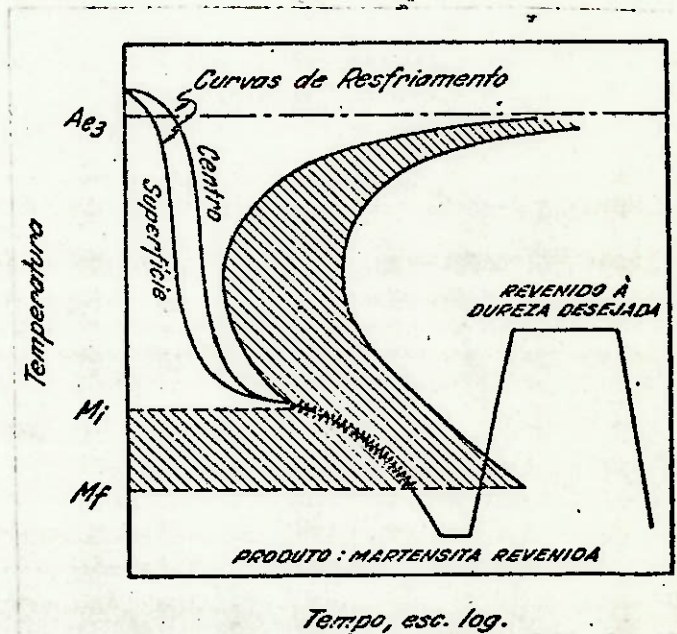


Diagrama esquemático de transformação para martêmpera

haja distorções na forma da peça, além disso, de uma forma melhor que o tenrado e revenido para beneficiamento, o aço, tem elevada resistência ao choque embora sua dureza seja aproximadamente 50-52 Rc.

O resfriamento, conforme diagrama, é feito em um banho mantido a uma temperatura constante, geralmente entre 260°C e 400°C.

Os aços mais indicados para estes processos são:

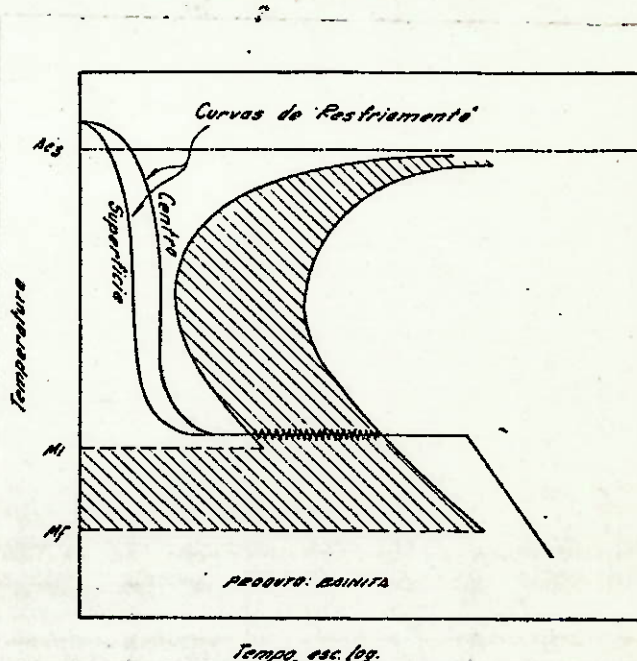
- Aços-carbono comuns contendo de 0,5 a 1,0% de C e um mínimo de 0,6% de Mn.
- Aços-carbono com mais de 0,9% de C e pouco menos de 0,6% de Mn.
- Aços-carbono com carbono abaixo de 0,5% de C mas com Mn na faixa de 1,00 a 1,65%.
- Aços com baixo teor de liga como SAE 5140, 1350, 4140, 6145 e 9440.

4. Revenimento

É importante destacar dois tipos de revenimento 1º - Para alívio de tensões, 2º para Beneficiamento.

O 1º tipo, para alívio de tensões, provoca início de precipita -

Fig. 7



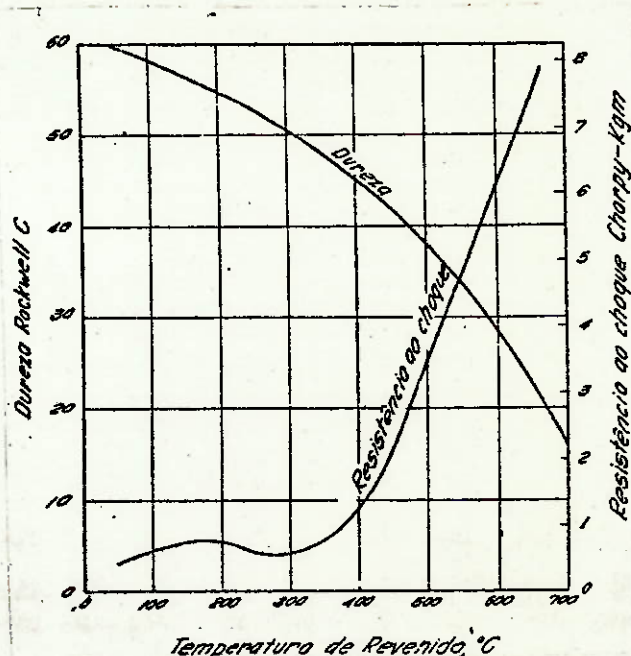
Representação esquemática do diagrama de transformação para austêmpera.

ção de carboneto de ferro, provocando o início da diminuição da dureza. Seu processo é do tipo comum: aquecimento, manutenção, em temperatura e resfriamento ao ar e, seu principal objetivo é cumprir o próprio nome: aliviar tensões, o que elimina a possibilidade de aparecimento de trincas ou fissuras futuras.

O 2º tipo, revenimento para beneficiamento, tem seu processo assemelhado ao 1º tipo, porém joga-se com temperatura diferente dependendo do resultado que se quer

chegar do ponto de vista dureza e resistência ao choque. Para melhor entendimento, segue abaixo o gráfico que analisa o efeito da temperatura de revenimento sobre a dureza e a resistência ao choque de um aço SAE 1045 temperado.

Fig. 8



Efeito da temperatura de revenimento sobre a dureza e a resistência ao choque de um aço 1045 temperado.

5. Solubilização - Precipitação - Envelhecimento

Trata-se de tratamentos normalmente aplicados em ligas não ferrosas como Al - Si, Cu - Zn, etc.

As propriedades das ligas não ferrosas normalmente se fundamentam na formação controlada de soluções sólidas provenientes da dissolução dos agentes de endurecimento (elementos de liga). As modificações destas propriedades, por tratamento térmico, baseiam-se na precipitação controlada desses agentes de endurecimento.

Com a permanência da liga a uma temperatura ligeiramente inte-

rior à temperatura EUTÉTICA, ocorre a homogenização distributiva dos agentes de endurecimento. Com o resfriamento rápido subsequente obtém-se uma solução sólida supersaturada, no estado instável à temperatura ambiente.

O envelhecimento artificial posterior, a uma temperatura abaixo da temperatura de mudança de fase (linha "solvus" no diagrama), produz a estabilização da estrutura e a precipitação de outras fases, criando zonas ricas de soluto que vão desenvolver novas propriedades mecânicas da liga.

6. Outros Processos

Além dos processos citados, algumas variações se destacam, nas atividades industriais de tratamentos térmicos:

6A. Aços Especiais

Tratamentos de peças e ferramentas de aços especiais como por exemplo SAE M2, M7, H12, D3, D6, O1, 52100, etc, requerem técnicas especiais de sequência de operações, que formam processos específicos para cada material tratado.

Isto se deve ao fato de existir nesses materiais uma quantidade considerável de elementos de liga, que alteram as formas das curvas do diagrama de equilíbrio Fe-C(Fe-Fe₃C) ou seja, o ponto eutetóide se desloca em composição e temperatura e o campo austenítico diminui, à medida que se aumenta na composição da liga, os teores de Cr, Mo, Si, etc. Nestes casos, geralmente, tanto o aquecimento como o resfriamento são escalonados.

6B. Têmpera por Chama

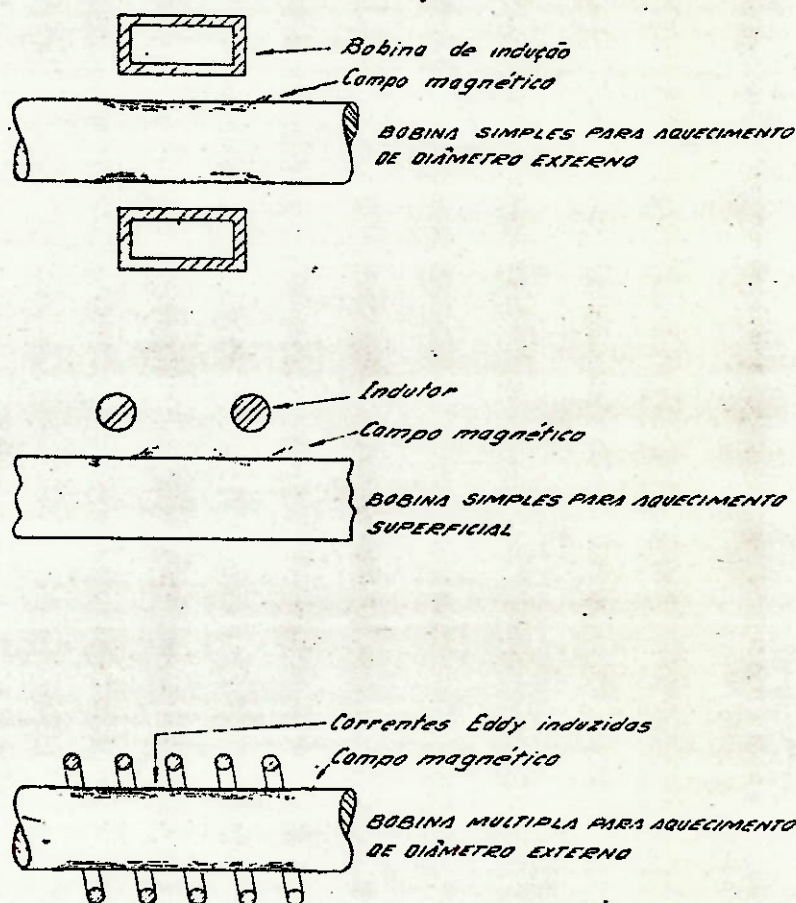
Trata-se de um processo de têmpera superficial e localizada, onde a superfície a ser aquecida sofre a ação de uma chama de oxi-acetileno até austentizar-se e logo a - pós recebe um jato de água para se obter a dureza. Existe uma infinidade de dispositivos de têmpera por cha - ma, desde maçaricos simples, até sofisticadas máquinas de dispositivo móvel horizontal ou vertical.

6C. Têmpera por Indução

Se uma corrente al - ternada flui através de um indutor ou bo - bina, estabelece-se aí um campo magnéti - co altamente concen - trado que induz um potencial elétrico , na peça a ser aqueci - da e envolvida pela bobina e, como a pe - ça representa um cir - cuito fechado, a vol - tagem induzida provo - ca o fluxo de corrente. A resis - tência da peça ao fluxo da corren - te induzida causa aquecimento por perdas $I^2 R$.

Neste processo ocorre uma particularidade quanto a esco -

Fig. 9



Exemplos de campos mag - néticos e correntes in - duzidas produzidas por bobinas de indução.

Iha da frequência a ser utilizada, como por exemplo:

Prof. Endur. mm	Seção da peça mm	Frequência
0,40 a 1,20	10 a 25	20 a 600 Kilociclos
1,30 a 2,50	15 a 50	10 a 200 Kilociclos
2,50 a 5,00	20 a 100	1000 a 3000 Ciclos
2,50 a 5,00	acima de 100	1000 Ciclos

Tabela 1

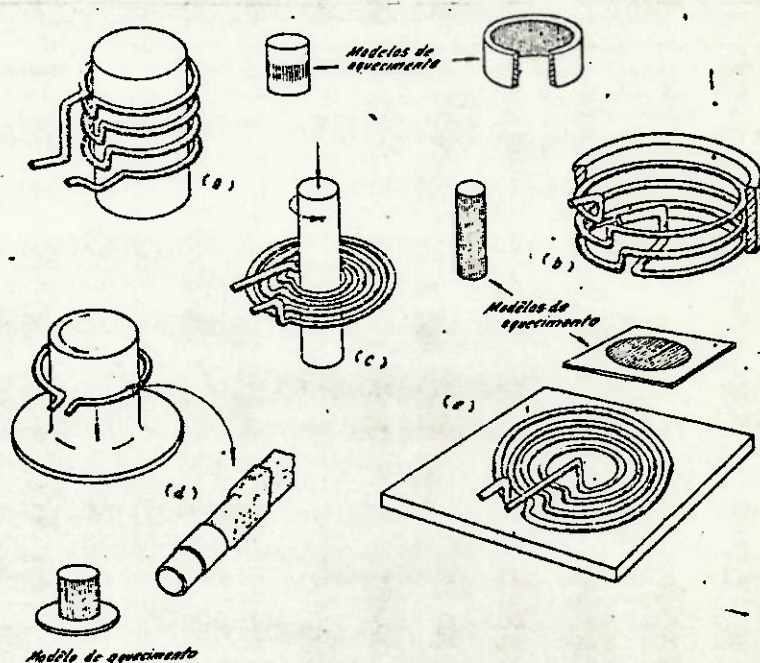
Fig. 10

O tratamento por indução não dispensa o revenimento, ao contrário, quanto mais cedo o material for revenido após a têmpera, tanto maior será

a segurança de que não ocorrerão problemas com as peças, principalmente trincas.

60. Brazagem

Não se trata de tratamento térmico propriamente dito e sim de um processo de solda forte feita com pasta ou arame de cobre ou bronze em um forno com atmosfera protetora sem oxidação.



Formas típicas de bobinas de indução para alta frequência.

O processo de Brazagem apresenta as seguintes vantagens:

- Substitui a solda prata em metais ferrosos;
- Após a solda, as peças podem ser tratadas termicamente até 950°C;
- Não necessita de fluxo para solda.
- Não ocorre oxidação.
- Não há distorções na forma e tamanho das peças porque, o aquecimento é feito por irradiação e o resfriamento é lento.

IV- CLASSIFICAÇÃO DE PROCESSOS DE TRATAMENTOS TERMO - QUÍMICOS

Fig. 11

1. Cementação

É um processo termo-químico de transformação superficial que se dá através da concessão de carbono do meio carburizante para a superfície da peça formando maior quantidade de Fe_3C .

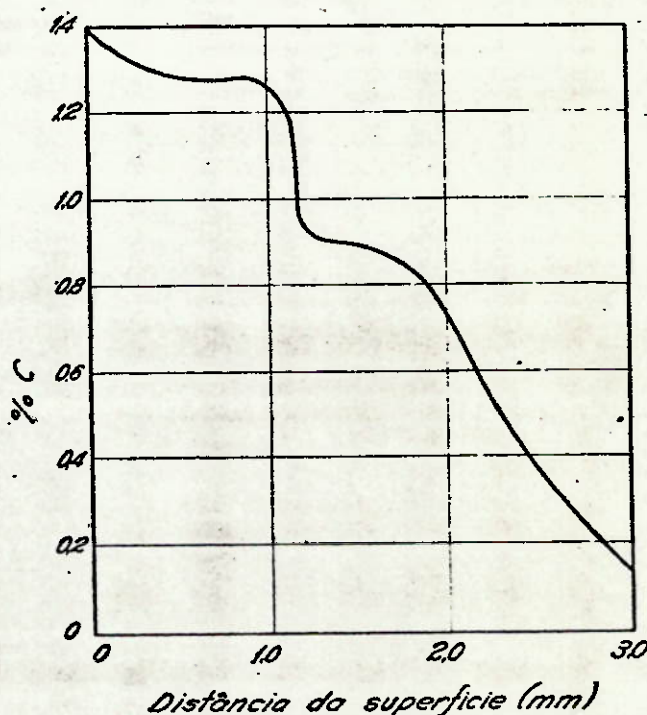
O teor de carbono é controlado pelas temperaturas e potenciais utilizados.

Estuda-se também o gradiente

que representa o teor de carbono através do material a partir da superfície em direção ao núcleo.

A cementação tem por objetivo aumentar a dureza superficial da peça sem, contudo, perder a ductilidade e tenacidade do núcleo.

Estudaremos três tipos de processos diferentes.



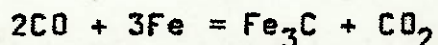
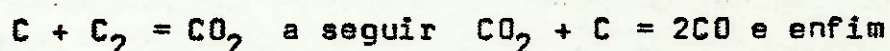
Gradiente de carbono, em cementação durante 4 horas a 1050°C com etileno.

1A. Processo de cementação sólida

Neste processo as peças são colocadas em caixas de aço Ni-Cr, em presença das misturas carburizantes. Estas misturas, quase sempre se compõe de : carvão de madeira (vegetal), aglomerado com óleo de linhaça na base de 5 a 20% . Substâncias ativadoras como carbonatos de Na, Ba, K e Ca auxiliam no início das reações e por vezes, também se coloca 20% de carvão coque que torna a mistura melhor transferente de calor.

A predominância do carvão vegetal se deve ao fato de que , este tipo de carvão, tem baixo teor de enxofre e elevada resistência ao choque e à abrasão.

As reações químicas do processo são as seguintes:



Vantagens da cementação sólida:

- Pode utilizar maior variedade de fornos. Não necessita de atmosfera.
- É eficiente e econômico para pequenos lotes de peças ou para peças de grandes dimensões.
- Exige menor experiência do operador.
- Diminui a tendência ao empenamento em razão das peças encontrarem-se apoiadas.
- Como a têmpera deve ser em uma operação separada, permite ajustes e (ou) usinagens após a carburização.

Desvantagens da cementação sólida:

- Não é um processo limpo.
- Não é recomendável para finas camadas ou camadas onde a espessura encontra-se limitada por estreitas tolerâncias.

BRASIMET

- Oferece grandes dificuldades para o controle do gradiente.
- Não é um processo adequado para têmpera direta.
- O peso das caixas e da mistura carburizante constituem-se em massa a ser aquecida, o que representa maior tempo de processo e consequente aumento de custo.

18.1. Processo de Cementação líquida

Neste caso as peças a serem cementadas são mantidas submersas em um banho de sal fundido com composição química adequada para fornecer o Carbono que deverá processar o enriquecimento superficial da peça.

Estes banhos têm aproximadamente a seguinte composição:

Constituinte Químico	Composição do Banho %	
	Camada Pequena Baixa temperatur.	Camada Grande Alta temperatur.
Cianeto de sódio	10 a 23	6 a 16
Cloreto de Bário	0 a 40	30 a 55
Outros sais Alcalinos	0 a 10	0 a 10
Cloreto de Potássio	0 a 25	0 a 20
Carbonato de Sódio	30 máx.	30 máx.
Aceleradores mixtos	0 a 5	0 a 2
Cianato de Sódio	1 máx.	0,5 máx.

As reações químicas do processo são as seguintes: Tabela 2

Exemplo: $2\text{NaCN} + \text{O}_2 = 2\text{NaNCO}$ ou $\text{NaCN} + \text{CO}_2 = \text{NaNCO} + \text{CO}$ a

seguir o CO passa a reagir com o Ferro (Fe).

Seguem algumas vantagens e considerações sobre o processo :

- É rápido, produz grandes camadas em pouco tempo.
- Dispensa o pré-aquecimento.
- Proteção efetiva contra descarbonetação e oxidação.
- Maior controle da profundidade de penetração.
- Possibilidade de operação contínua.

- Maior facilidade para operação de cementação localizada.
- As peças devem estar limpas e principalmente secas.
- Os fornos exigem exaustão em razão da condição de super venenosos que são os gases de cianetos.

1C. Processos de cementação gasosa

Neste caso a substância responsável pela oferta de carbono é um gás. Este gás normalmente chamado de gás endotérmico é produzido a partir do aquecimento à elevadas temperaturas de uma mistura de ar e gás liquefeito de petróleo (Propano, metano, butano, etano). O produto final desta operação é um gás onde o Nitrogênio (N_2) predomina com uma média de 43% da mistura, além do nitrogênio encontramos também hidrogênio (H_2) e grande quantidade de CO (monóxido de carbono) que é o agente carburizante.

Com relação às reações químicas do processo, entende-se que se assemelham aos demais processos uma vez que o produto final carburizante é o mesmo CO utilizado também nas cementações líquidas e sólidas. O N_2 e o H_2 são neutros com relação ao Ferro, porém a presença de oxigênio (O_2)² pode interferir no H_2 , formando água (H_2O) ou então interferir no CO formando CO_2 . Tanto o CO_2 como a água são prejudiciais, ao processo porque diminuem o efeito carburizante da mistura gasosa.

Vantagens:

- É um processo limpo.
- Permite melhor controle do teor de carbono e da espessura da camada.
- No cômputo geral das operações é um processo rápido le-

BRASIMET

vando-se em conta que há reais possibilidades de têmpera contínua.(direta)

Desvantagens:

- As reações da carbonetação são muito mais complexas e podem até ser prejudiciais.
- A instalação por ser especial é muito onerosa, exigindo também aparelhagem complexa de controle e segurança, o que ocasiona necessidade de pessoal mais habilitado e conseqüentemente mais caro.
- O controle, não somente da temperatura, mas também da composição da substância gasosa deve ser feito constante e ininterruptamente.

10. Tratamento Térmico da Cementação

Todos os aços cementados devem ser temperados, entretanto, deve-se lembrar que devido ao prolongado tempo na cementação desenvolve-se uma granulação grosseira e as composições do núcleo e superfície são diferentes.

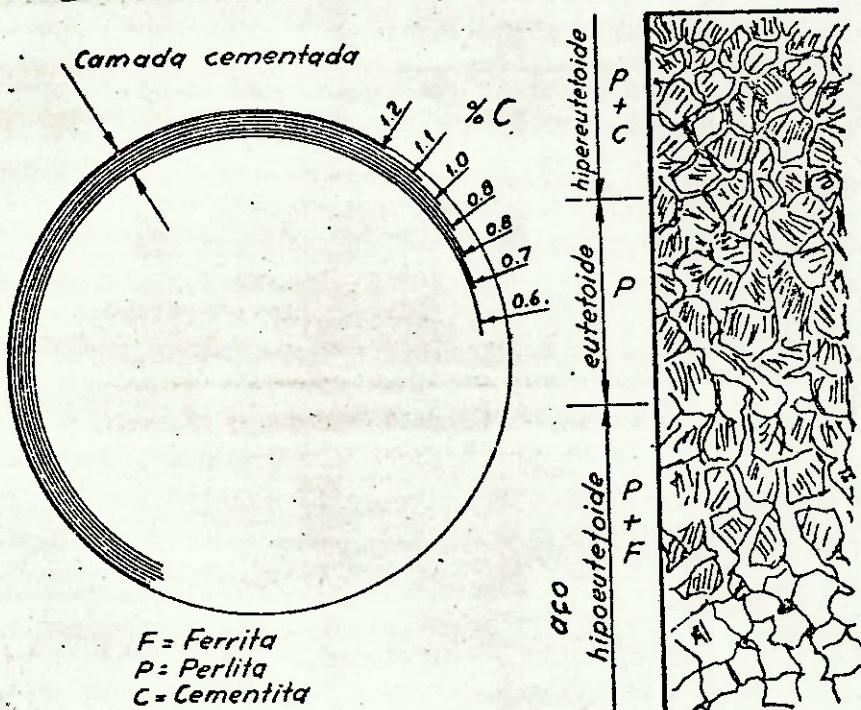
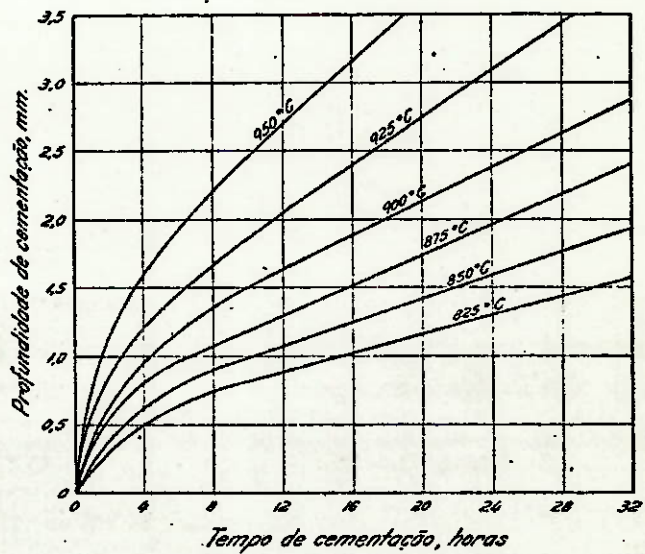
Pode-se temperar os aços cementados de três maneiras:

- Têmpera simples - Consiste em temperar o material normalmente após tê-lo cementado e resfriado ao ar.
- Têmpera direta - Somente para casos em que se tenha ainda uma granulação fina. Consiste no resfriamento rápido diretamente da temperatura de cementação. Este tratamento favorece a retenção da austenita.
- Têmpera dupla - Faz primeiramente a partir da temperatura de austenitização do núcleo, para refiná-lo, em seguida baseia-se na superfície. Resultado: camada excessivamente dura e núcleo tenaz.

Para maiores ilustrações generalizadas, apresenta-se ainda as seguintes figuras:

Fig. 12

Curvas mostrando a influência do tempo e da temperatura na penetração de carbono.



Na camada de superfície tem-se o constituinte mais duro dos aços, o carboneto de ferro ou cementita, e nas subcamadas, perlita e perlita ferrita.

A parte não atingida pela cementação é rica em ferrita.

Fig. 13

2. Nitretação

É um tratamento de endurecimento superficial em que se introduz superficialmente no aço o elemento Nitrogênio.

Objetivos:

- Obtenção de elevada dureza superficial
- Aumento à resistência ao desgaste e escoriação
- Aumento da resistência à fadiga
- Melhora da resistência à corrosão
- Melhora da resistência superficial ao calor.

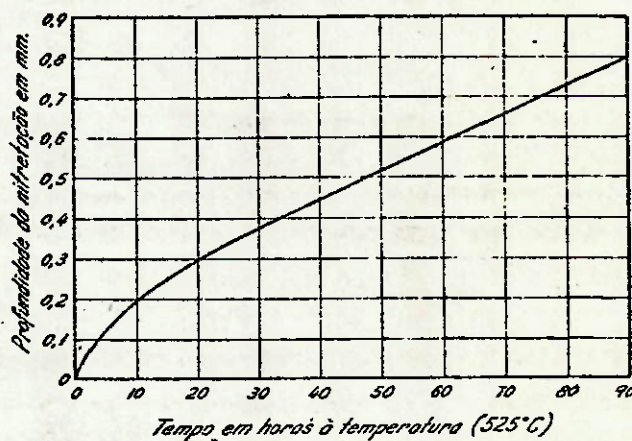
Características do processo:

- Temperatura sub-sustenítica (500 a 560°C)
- Alívio de tensões naturais
- Sem possibilidade de empenamento ou distorções
- Nenhum tratamento térmico se faz necessário após a nitretação.

2A. Nitretação a gás

É o processo que consiste em submeter-se as peças a serem nitretadas à ação de um meio gasoso contendo nitrogênio, geralmente a amônia que se compõe-se segundo a reação: $2\text{NH}_3 = 2\text{N} + 3\text{H}_2$. Este processo geralmente é lento. Já há algum tempo vêm-se estudando a aceleração do processo com e sem adição de substâncias,

Fig. 14



Influência do tempo de nitretação a gás sobre a espessura da camada nitretada.

que liberam carbono, ou endogás, ou gás natural, etc.

28. Nitretação em Banho de Sal

Trata-se de um processo que permite reduzir sensivelmente o tempo de tratamento, produzindo superfícies, muito resistentes ao desgaste, sem tendências ao equipamento, de alto limite de fadiga e elevada resistência à corrosão atmosférica.

Pode-se utilizar este processo em qualquer tipo de aço num banho fundido entre 500 e 560°C à base de sais de sódio e potássio.

Tenifer

O processo Tenifer é uma nitretação em banho de sal empregado no tratamento das mais variadas peças de máquinas, veículos e aviões.

A primeira operação é a de pré-aquecimento à cerca de 300°C. A segunda é a da imersão no banho de sal para a nitretação, durante 60 a 150 minutos a 570°C. O resfriamento ao ar, se conveniente, constitui a terceira fase. Segue-se o resfriamento em água até a temperatura ambiente. A quinta e última operação é a de limpeza em tanque de água quente.

O forno para nitretação é de aquecimento elétrico, possuindo um cadinho de aço Cromo-Níquel, revestido com camisa de Titânio.

O componente ativo do banho é o cianeto de potássio, que fornece o nitrogênio e o carbono, essenciais para o processo. A superfície do aço cataliza a decomposi

ção das moléculas do cianeto. Grande parte do nitrogênio e menor de carbono, liberadas, penetram na superfície do aço. Da reação desprende-se o monóxido de carbono enquanto o óxido alcalino precipita.

No prosseguimento da reação, e devido à maior oferta, de nitrogênio, este difunde-se no material enquanto o carbono é retido na zona periférica.

Assim surge, nitidamente delimitada, a chamada zona de ligação, formada de uma liga - ferro - carbono e nitrogênio. Adiante constitui-se a zona de difusão, na qual o teor de nitrogênio decresce em direção ao núcleo em forma de curva de difusão.

Já se desenvolveu um novo processo Tenifer que evita a poluição ambiental, porque o banho funciona sem sobras de sais que necessitam ser neutralizados. Os produtos químicos a serem utilizados são livres de Cianeto e cria-se a possibilidade de um resfriamento em banho de sal a 230°C, o que também reduz consideravelmente a deformação das peças tornando desnecessária uma subsequente neutralização da água.

3. Carbonitretação

Este tratamento poderia ser entendido como a somatória dos dois anteriores: cementação e nitretação.

A temperatura é intermediária, cerca de 850°C e os objetivos e resultados divididos entre a cementação e a nitretação.

3A. Carbonitretação Gasosa

É realizado numa atmosfera gasosa composta de gás de ,

gerador (de 77 a 89%), gás natural (de 9 a 15%) e amônia (de 2 a 8%).

As temperaturas podem variar de 710° a 900°C, a espessura das camadas de 0,1 a 0,7 mm e os aços mais comumente utilizados são os das classes SAE 10..., 11..., 13..., 40..., 41..., 46..., 51..., 61..., 86... e 87... com teores de carbono até 0,25%.

38. Carbonitretação Líquida (ou Cianetação)

O meio de oferta de elementos é um banho de sal cianeto fundido à temperaturas entre 760° e 870°C onde se consegue de 30 minutos a uma hora camadas de 0,1 a 0,3 mm.

É um tratamento mais comumente aplicado em aços - carbonos de baixo teor de carbono.

É interessante notar que a camada cianetada do material tratado apresenta duas zonas distintas: uma mais externa martensítica e outra mais interna bainítica apresentando teor de carbono mais baixo.

4. Boretação

É um processo termoquímico de difusão, onde o elemento boro se difunde na superfície do material tratado, formando boreto de ferro com dureza HV 1700 a 2000 kp/mm². Podem ser tratados pelo processo de boretação os aços-liga, com baixo e alto teor, aços-ferramenta, aços para cementação, ferro fundido comum e nodular, aço fundido e material sinterizado. Em comparação aos tratamentos convencionais, as peças tratadas pelo processo da boretação adquirem camadas com dureza mais elevada, como também maior resistência ao desgaste.

O processamento pode ser comparado com a cemeptação em meios sólidos, pois normalmente necessita-se de um forno que tenha um controle de temperatura homogêneo em todo o seu interior. As peças devem ser acondicionadas em caixas confeccionadas, em aço resistente ao calor, colocando-se uma camada de 10 a 20 mm de granulado de boretação ao seu redor, e sobre as mesmas uma camada de 50 a 100 mm de granulado. Uma tampa deve ser colocada em cima da caixa. A temperatura de boretação, vai de 800 a 1050°C, sendo a mais recomendável 900°C.

Devido à alta dureza da camada boretada, a resistência ao desgaste é excelente. Contudo, esta propriedade das peças boretadas nem sempre pode ser comprovada por ensaios de laboratório, uma vez que na prática a resistência ao desgaste é influenciada por fatores que distorcem os resultados de laboratório, tais como: dureza, rugosidade superficial, velocidade de deslizamento, carga superficial localizada, carga total e grau de lubrificação.

A camada boretada determina uma grande diminuição na tendência de colagem e de caldeamento.

Exemplos de Aplicação da Boretação:

- Calibres

- Matrizes de material DIN 2365, destinadas à estampagem de elos, confeccionados em material 50 Cr V 4, foram boretadas durante 6 h e a seguir resfriadas em caixa. Observou-se que para matrizes apenas beneficiadas eram produzidos, cerca de 3.500 a 4.500 elos; já em matrizes teniferizadas, esta produção subia para 8.000, enquanto que as mesmas matrizes boretadas alcançavam uma produção de 29.000 elos.



- Na fabricação de peças para macacos de automóveis.
- As peças de metal duro com maior porcentagem de cobalto são submetidas à boretação, obtendo-se durezas de 2900HV.

5. Atmosferas e Meios para Tratamentos Térmicos e Termo-Químicos

Alem do que se desenvolve hoje nos equipamentos modernos como, por exemplo os tratamentos a vácuo de recozimento e os de condição mista de vácuo e atmosfera carburizante para cementação, resumimos abaixo algumas das atmosferas convencionais.

Tabela 3

Tipo	Composição Nominal % em Volume					Relação Ar/Gás
	N ₂	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄	
Exotérmica pobre	86,8	1,5	10,5	1,2	-	9,0
Exotérmica rica	71,5	10,5	5,0	12,5	0,5	6,0
Nitrogênio preparado pobre	97,1	1,7	-	1,2	-	9,0
Nitrogênio preparado rico	75,3	11,0	-	13,2	0,5	6,0
Endotérmica pobre	45,1	19,6	0,4	34,6	0,3	2,6
Endotérmica rica	39,8	20,7	-	38,7	0,8	2,5
A carvão de madeira	64,1	34,7	-	1,2	-	-
Exotérmica-endotérmica pobre	53,0	17,0	-	20,0	-	7,5
Exotérmica-endotérmica rica	60,0	19,0	-	21,0	-	7,2
Amônia dissociada	25,0	-	-	75,0	-	-
Amônia queimada pobre	99,0	-	-	1,0	-	3,7
Amônia queimada rica	80,0	-	-	20,0	-	1,9

Classificação das principais atmosferas controladas.
Tabela 4

Tipos	Aplicações Comuns
Exotérmica pobre	Revestimento de óxido em aço
Exotérmica rica	Recozimento brilhante; brassagem de cobre; sinterização
Nitrogênio preparado pobre	Aquecimento neutro
Nitrogênio preparado rico	Recozimento e brassagem de aços inoxidáveis
Endotérmica pobre	Têmpera
Endotérmica rica	Cementação a gás
A carvão de madeira	Cementação a gás
Exotérmica-endotérmica pobre	Têmpera
Exotérmica-endotérmica rica	Cementação a gás
Amônia dissociada	Brassagem; sinterização
Amônia queimada pobre	Aquecimento neutro
Amônia queimada rica	Sinterização de pós de aço inoxidável.

Aplicações comuns das principais atmosferas controladas.

V- CLASSIFICAÇÃO DOS FORNOS INDUSTRIAIS PARA TRATAMENTO TÉRMICO

POR SISTEMAS DE AQUECIMENTO

1. Aquecimento a óleo ou gás:-

DETALHES DO AQUECIMENTO	FORMAS CONSTRUTIVAS	PROCESSOS
Para tratamento térmico de aços em banhos de sais, ativos ou neutros, em cadinhos metálicos com aquecimento indireto-temp.máxima 950°C. Geralmente possuem uma câmara de pré-aquecimento acoplada.	Geralmente cilíndrica tipo - poço.	Aquecimento à temperatura de cementação, têmpera, beneficiamento, normalização, etc.
Aquecimento direto por queimadores. A carga fica exposta diretamente à ação da chama. Para temperaturas de 600°C a 1100°C e de forja. Não operam com atmosfera controlada.	Soleira móvel sobre vagoneta, empuxo, soleira rotativa, soleira de rolos, etc.	Recozimento, normalização, têmpera, alívio de tensões e rea aquecimento de lingotes ou palanquilha.
Queimadores acoplados a tubos radiantes montados no interior da câmara quente. Incluem-se nesta categoria os fornos com mufla ou campanulas de proteção para temperaturas até 950°C.	Contínuo por soleira de rolos, empuxo, soleira rotativa, autômatos, etc.	Que requerem atmosfera protetora ativa tais como: recozimento brilhante, normalização, cementação, têmpera, carbonitretação, etc.

2. Aquecimento Elétrico:-

DETALHES DE AQUECIMENTO	FORMAS CONSTRUTIVAS	PROCESSOS
Para tratamento térmico de metais em banhos de sais, ativados ou neutros, em cadinhos metálicos ou cerâmicos aquecidos com eletrodos imersos ou resistências montadas nas paredes do forno. Para temperatura de 150°C a 1350°C.	Cilíndrica, retangular ou oval tipo poço.	Têmpera, cementação, carbonitretação, têmpera de ferramentas de aço rápido e trabalho a quente, mar-têmpera, etc.
Fornos de câmara aquecidas por resistências metálicas ou cerâmicas expostas, podendo ser equipados com muflas. Podem trabalhar também com atmosferas neutras e redutoras. Para temperaturas até 1350°C.	Câmara com soleira fixa, soleira móvel sobre vagoneta, contínuos com calha de percussão, contínuos com esteira transportadora, fornos tipo poço e sino, etc.	Aquecimento para têmpera, cementação em caixas fechadas, revenimento, recozimento, normalização, alívio de tensões, brazagem, etc.
Fornos de câmara aquecidos por elementos montados em tubos radiantes metálicos ou fornos equipados com campanulas de proteção. Temperatura até 950°C.	Fixo onde a carga é movimentada normalmente ou com auxílio de uma máquina de carga e descarga, calha de percussão, soleira rotativa, poço, sino, etc.	Cementação, carbonitretação, têmpera, etc- sob atmosfera controlada e esferoidização, recozimento brilhante, etc sob alto vácuo.

VI- BIBLIOGRAFIA

- 1.- Chiaverini, V. - " AÇOS E FERROS FUNDIDOS "
- 2.- Rothery, H.W. - " ESTRUTURA DAS LIGAS DE FERRO "
- 3.- Pohlmann, K. - " BORETAÇÃO EM METAIS FERROSOS "
- 4.- Hirschheimer, L.R. - " ASPECTOS MATEMÁTICOS DA CEMENTAÇÃO GASOSA "
- 5.- Cairolli, O.B. - " SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO DA LIGA EUTÉTICA DE AL - SI "
- 6.- Mazon, P.R.F.- " COALESCIMENTO DOS AÇOS DE MÉDIO CARBONO "
- 7.- Targa, C.A. - " RECOZIMENTO DE UM AÇO MÉDIO CARBONO "
- 8.- ASM - " METALS HANDBOOK - Vol.1 "
- 9.- ASM - " METALS HANDBOOK - Vol.7 "
- 10.- ABNT - " METALOGRAFIA TERMINOLOGIA "
P - TB - 67
- 11.- Cairolli, O.B. - " TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS "
- 12.- BRASIMET - DIVERSOS FOLHETOS, APOSTILAS, TRABALHOS e CATÁLOGOS.

12 IRONS and STEELS

Low-Temperature Impact Properties of
Selected Quenched and Tempered Alloy Steels⁽¹⁾

AISI No.	Composition, %					Heat Treatment		Hardness, Rc	Impact energy, ft.-lb. (J)					Transition temperature (50% brittle) F
	C	Mn	P	S	Mo	Quenching temperature, F (°C)	Tempering temperature, F		-300 F	-200 F	-100 F	0 F	100 F	
2320 ⁽¹⁾	0.18	0.91	3.47	—	—	1650	300	43.5	17	24	30	30	30	—
							800	30	10	19	35	54	59	-120
							1000	22	19	24	65	75	75	-140
2330 ⁽¹⁾	0.33	0.86	3.50	—	—	1575	800	35	15	20	30	41	46	-115
							1000	26	10	24	49	59	60	-160
2340 ⁽¹⁾	0.43	0.83	3.38	—	—	1550	800	39	10	18	24	30	35	-65
							1000	30	15	19	37	44	45	-150
2360 ⁽¹⁾⁽²⁾	0.57	0.91	3.50	—	—	1475	800	40	5	9	10	19	24	—
							1000	32	8	11	18	30	35	-65
2380 ⁽¹⁾⁽²⁾	0.75	1.00	3.50	—	—	1450	800	45	5	6	10	12	14	—
							1000	35	8	10	12	14	20	40
3120 ⁽¹⁾	0.23	0.75	1.26	0.58	—	1650	300	43	10	15	23	28	30	—
							800	35	11	15	25	44	50	—
							1000	26	5	13	33	76	78	—
							1200	19	13	35	95	96	96	—
3140 ⁽¹⁾	0.38	0.77	1.26	0.64	—	1550	800	43	10	15	21	26	30	-185
							1000	30	13	16	35	45	48	-200
							1200	25	14	25	55	63	66	-200
3180 ⁽¹⁾⁽²⁾	0.72	0.92	1.34	0.63	—	1450	800	47	4	5	10	14	14	—
							1000	40	10	10	12	16	20	—
							1200	31	—	18	19	40	45	—
4320	0.21	0.74	1.53	1.09	0.19	1650	400	43	9	17	25	27	28	—
							800	37	5	10	16	25	30	30
							1000	33	8	16	28	40	45	-65
							1200	21	19	35	40	90	90	-175
4330	0.30	0.84	1.69	1.10	0.20	1575	400	50	5	14	16	20	20	—
							600	47	5	6	10	14	17	—
							800	43	6	10	14	19	21	70
							1000	35	17	17	23	30	34	-110
							1200	27	17	35	45	53	56	-135
4340	0.38	0.77	1.65	0.93	0.21	1550	400	52	11	15	20	21	21	—
							600	48	10	14	15	15	16	—
							800	44	9	13	16	21	25	—
							1000	38	15	18	28	35	36	-130
							1200	30	15	28	55	55	55	-135
4360 ⁽¹⁾	0.57	0.87	1.62	1.08	0.22	1475	800	48	5	5	10	11	14	—
							1000	40	9	10	13	18	23	-10
							1200	30	12	15	25	42	43	-110
4380 ⁽¹⁾	0.76	0.91	1.67	1.11	0.21	1450	800	49	4	5	8	9	10	—
							1000	42	8	8	10	12	15	60
							1200	31	5	11	19	33	38	-50
4620 ⁽¹⁾	0.20	0.67	1.85	0.30	0.18	1650	300	42	14	20	28	35	35	—
							800	34	11	16	33	55	55	—
							1000	29	16	34	55	78	78	—
							1200	19	17	48	103	115	117	—
4640 ⁽¹⁾	0.43	0.69	1.78	0.29	0.20	1550	800	42	16	17	20	25	27	—
							1000	37	17	22	35	39	39	-190
							1200	29	17	30	55	67	67	-140
4680 ⁽¹⁾⁽²⁾	0.74	0.77	1.51	0.30	0.21	1450	800	46	5	8	13	15	16	—
							1000	41	11	12	15	19	22	—
							1200	31	11	13	17	39	43	—
8620	0.20	0.89	0.60	0.64	0.20	1650	300	43	11	16	23	35	35	—
							800	36	8	13	20	35	45	-29
							1000	29	25	33	65	6	76	-150
							1200	21	10	85	107	115	117	-195
8630	0.34	0.77	0.66	0.62	0.22	1575	800	41	7	12	17	25	31	0
							1000	34	11	20	43	53	54	-155
							1200	27	18	28	74	80	82	-165
8640	0.45	0.78	0.65	0.61	0.20	1550	800	46	5	10	14	20	23	—
							1000	38	11	15	24	40	40	-110
							1200	30	18	22	49	63	66	-145
8660 ⁽¹⁾	0.56	0.81	0.70	0.56	0.25	1475	800	47	4	6	10	13	16	—
							1000	41	10	12	15	20	30	-10
							1200	30	16	18	25	54	60	-90
8680 ⁽¹⁾	0.76	0.81	0.67	0.60	0.22	1450	800	50	3	4	5	9	10	—
							1000	42	4	5	10	14	17	—
							1200	32	3	6	11	25	40	-30

(1) Induction furnace laboratory heats, normalized before hardening and tempering.

(2) Specimens (0.45 in. square bars) quenched in oil.

(3) Charpy V-notch values scaled from curves.

(4) Not currently standard.

(5) Higher than standard carbon content.

Source: International Nickel Co. Inc.

AISI No.*	Tempering Temperature, F	Tensile Strength, Psi	Yield Strength, Psi	Elongation, %	Reduction in Area, %	Hardness, Bhn
5150	400	282,000	251,000	5	37	525
	600	252,000	230,000	6	40	475
	800	210,000	190,000	9	47	410
	1,000	163,000	150,000	15	54	340
	1,200	117,000	118,000	20	60	270
5160	400	322,000	260,000	4	10	627
	600	290,000	257,000	9	30	555
	800	233,000	212,000	10	37	461
	1,000	169,000	151,000	12	47	341
	1,200	130,000	116,000	20	56	269
51860	400	—	—	—	—	600
	600	—	—	—	—	540
	800	237,000	216,000	11	36	460
	1,000	175,000	160,000	15	44	355
	1,200	140,000	126,000	20	47	290
6150	400	280,000	245,000	8	38	538
	600	250,000	228,000	8	39	483
	800	208,000	193,000	10	43	420
	1,000	168,000	155,000	13	50	345
	1,200	137,000	122,000	17	58	282
81845	400	295,000	250,000	10	33	550
	600	256,000	228,000	8	42	475
	800	204,000	190,000	11	48	405
	1,000	160,000	149,000	16	53	338
	1,200	130,000	115,000	20	55	280
8630	400	238,000	218,000	9	38	465
	600	215,000	202,000	10	42	430
	800	185,000	170,000	13	47	375
	1,000	150,000	130,000	17	54	310
	1,200	112,000	100,000	23	63	240
8640	400	270,000	242,000	10	40	505
	600	240,000	220,000	10	41	460
	800	200,000	188,000	12	45	400
	1,000	160,000	150,000	16	54	340
	1,200	130,000	116,000	20	62	280
86845	400	287,000	238,000	9	31	525
	600	246,000	225,000	9	40	475
	800	200,000	191,000	11	41	395
	1,000	160,000	150,000	15	49	335
	1,200	131,000	127,000	19	58	280
8650	400	281,000	243,000	10	38	525
	600	250,000	225,000	10	40	490
	800	210,000	192,000	12	45	420
	1,000	170,000	153,000	15	51	340
	1,200	140,000	120,000	20	58	280
8660	400	—	—	—	—	580
	600	—	—	—	—	535
	800	237,000	225,000	13	37	460
	1,000	190,000	176,000	17	46	370
	1,200	155,000	138,000	20	53	315
8740	400	290,000	240,000	10	41	578
	600	249,000	225,000	11	46	495
	800	208,000	197,000	13	50	415
	1,000	175,000	165,000	15	55	363
	1,200	143,000	131,000	20	60	302
9255	400	305,000	297,000	1	3	601
	600	281,000	260,000	4	10	578
	800	233,000	216,000	8	22	477
	1,000	182,000	160,000	15	32	352
	1,200	144,000	118,000	20	42	285
9260	400	—	—	—	—	600
	600	—	—	—	—	540
	800	255,000	218,000	8	24	470
	1,000	192,000	164,000	12	30	390
	1,200	142,000	118,000	20	43	295
94B30	400	250,000	225,000	12	46	475
	600	232,000	206,000	12	49	445
	800	195,000	175,000	13	57	382
	1,000	145,000	135,000	16	65	307
	1,200	120,000	105,000	21	69	250

Properties of Selected Carbon and Alloy Steels (Continued)

Part II — Quenched and Tempered

AISI No.*	Tempering Temperature, F	Tensile Strength, Psi	Yield Strength, Psi	Elongation, %	Reduction in Area, %	Hardness, Bhn	AISI No.*	Tempering Temperature, F	Tensile Strength, Psi	Yield Strength, Psi	Elongation, %	Reduction in Area, %	Hardness, Bhn
1030†	400	123,000	94,000	17	47	495	1330†	400	232,000	211,000	9	39	459
	600	116,000	90,000	19	53	401		600	207,000	186,000	9	44	402
	800	106,000	84,000	23	60	302		800	168,000	150,000	15	53	335
	1,000	97,000	75,000	28	65	255		1,000	127,000	112,000	18	60	253
	1,200	85,000	64,000	32	70	207		1,200	106,000	83,000	23	63	216
1040†	400	130,000	96,000	16	45	514	1340	400	262,000	231,000	11	35	505
	600	129,000	94,000	18	52	444		600	230,000	206,000	12	43	453
	800	122,000	92,000	21	57	352		800	183,000	167,000	14	51	375
	1,000	113,000	86,000	23	61	269		1,000	140,000	120,000	17	58	255
	1,200	97,000	72,000	28	68	201		1,200	116,000	90,000	22	66	252
1040	400	113,000	85,000	19	48	262	4037	400	149,000	110,000	6	33	310
	600	113,000	86,000	20	53	255		600	138,000	111,000	14	53	255
	800	110,000	80,000	21	54	241		800	127,000	106,000	20	63	270
	1,000	104,000	71,000	26	57	212		1,000	115,000	95,000	23	63	247
	1,200	92,000	63,000	29	65	192		1,200	101,000	61,000	29	60	220
1050†	400	163,000	117,000	9	27	514	4042	400	261,000	241,000	12	37	516
	600	158,000	115,000	13	36	444		600	234,000	211,000	13	42	455
	800	145,000	110,000	19	48	375		800	187,000	170,000	15	51	350
	1,000	125,000	95,000	23	58	293		1,000	143,000	128,000	20	59	300
	1,200	104,000	78,000	28	65	235		1,200	115,000	100,000	28	66	238
1050	400	—	—	—	—	—	4130†	400	236,000	212,000	10	41	457
	600	142,000	105,000	14	47	321		600	217,000	200,000	11	43	435
	800	136,000	95,000	20	50	277		800	186,000	173,000	13	49	350
	1,000	127,000	84,000	23	53	262		1,000	150,000	132,000	17	57	315
	1,200	107,000	68,000	29	60	223		1,200	118,000	102,000	22	64	245
1060	400	160,000	113,000	13	40	321	4140	400	257,000	238,000	8	38	510
	600	160,000	113,000	13	40	321		600	225,000	208,000	9	43	445
	800	156,000	111,000	14	41	311		800	181,000	165,000	13	49	370
	1,000	140,000	97,000	17	45	277		1,000	138,000	121,000	18	58	255
	1,200	116,000	76,000	23	54	229		1,200	110,000	95,000	22	63	230
1080	400	190,000	142,000	12	35	388	4150	400	280,000	250,000	10	39	539
	600	189,000	142,000	12	35	388		600	256,000	231,000	10	40	455
	800	187,000	138,000	13	36	375		800	220,000	200,000	12	45	440
	1,000	164,000	117,000	16	40	321		1,000	175,000	160,000	15	52	370
	1,200	129,000	87,000	21	50	255		1,200	139,000	122,000	19	60	290
1095†	400	216,000	152,000	10	31	601	4340	400	272,000	243,000	10	38	500
	600	212,000	150,000	11	33	534		600	250,000	230,000	10	40	425
	800	199,000	139,000	13	35	388		800	213,000	198,000	10	44	420
	1,000	165,000	110,000	15	40	293		1,000	170,000	156,000	13	51	350
	1,200	122,000	85,000	20	47	235		1,200	140,000	124,000	19	60	250
1095	400	187,000	120,000	10	30	401	5046	400	253,000	204,000	9	25	452
	600	183,000	118,000	10	30	375		600	205,000	168,000	10	37	421
	800	176,000	112,000	12	32	363		800	165,000	135,000	13	50	335
	1,000	158,000	95,000	15	37	321		1,000	136,000	111,000	18	61	232
	1,200	130,000	80,000	21	47	269		1,200	114,000	95,000	24	66	225
1137	400	157,000	136,000	5	22	352	50B46	400	—	—	—	—	550
	600	143,000	122,000	10	33	285		600	258,000	235,000	10	37	505
	800	127,000	106,000	15	48	262		800	202,000	181,000	13	47	405
	1,000	110,000	88,000	24	62	229		1,000	157,000	142,000	17	51	322
	1,200	95,000	70,000	28	69	197		1,200	128,000	115,000	22	60	273
1137†	400	217,000	169,000	5	17	415	50B60	400	—	—	—	—	600
	600	199,000	163,000	9	25	375		600	273,000	257,000	8	32	525
	800	160,000	143,000	14	40	311		800	219,000	201,000	11	34	435
	1,000	120,000	105,000	19	60	262		1,000	163,000	145,000	15	38	350
	1,200	94,000	77,000	25	69	187		1,200	130,000	113,000	19	50	290
1141	400	237,000	176,000	6	17	461	5130	400	234,000	220,000	10	40	475
	600	212,000	186,000	9	32	415		600	217,000	204,000	10	45	440
	800	169,000	150,000	12	47	331		800	185,000	175,000	12	51	379
	1,000	130,000	111,000	18	57	262		1,000	150,000	136,000	15	56	305
	1,200	103,000	86,000	23	62	217		1,200	115,000	100,000	20	63	245
1144	400	127,000	91,000	17	36	277	5140	400	260,000	238,000	9	38	450
	600	126,000	99,000	17	40	262		600	229,000	210,000	10	43	450
	800	123,000	68,000	18	42	248		800	190,000	170,000	13	50	365
	1,000	117,000	83,000	20	46	235		1,000	145,000	125,000	17	58	260
	1,200	105,000	73,000	23	55	217		1,200	110,000	96,000	25	66	235

* All grades are fine-grained except for those in the 1100 series which are coarse-grained. Normalizing and annealing temperatures are given in parentheses. †Water quenched.

Properties of Selected Carbon and Alloy Steels

Part I — Hot Rolled, Normalized, and Annealed

AISI No.	Treatment	Yield Strength, Psi	Tensile Strength, Psi	Elongation, %	Reduction in Area, %	Hardness, Bhn	Impact Strength (Izod), Ft-Lb	Treatment	AISI No.	Yield Strength, Psi	Tensile Strength, Psi	Elongation, %	Reduction in Area, %	Hardness, Bhn	Impact Strength (Izod), Ft-Lb	
1015	As-rolled	45,500	61,000	39.0	61.0	126	81.5	Normalized (1,600 F)	1340	81,000	121,250	22.0	62.9	248	68.2	
	Normalized (1,700 F)	47,000	61,500	37.0	69.6	121	85.2	Annealed (1,475 F)		83,250	102,000	25.5	57.3	207	52.0	
	Annealed (1,600 F)	41,250	56,000	37.0	69.7	111	84.8	Normalized (1,600 F)	3140	87,000	129,250	19.7	57.3	262	39.5	
1020	As-rolled	48,000	65,000	36.0	59.0	143	64.0	Annealed (1,500 F)		61,250	100,000	24.5	50.8	197	34.2	
	Normalized (1,600 F)	50,250	64,000	35.8	67.9	131	86.8	Normalized (1,600 F)	4130	63,250	97,000	25.5	59.5	197	63.7	
	Annealed (1,600 F)	42,750	57,250	36.5	66.0	111	91.0	Annealed (1,585 F)		52,250	81,250	28.2	55.6	156	45.5	
1022	As-rolled	52,000	73,000	35.0	67.0	149	60.0	Normalized (1,600 F)		95,000	148,000	17.7	46.8	302	16.7	
	Normalized (1,700 F)	52,000	70,000	34.0	67.5	143	86.5	Normalized (1,500 F)		60,500	95,000	25.7	56.9	197	40.2	
	Annealed (1,600 F)	46,000	65,250	35.0	63.6	137	89.0	Normalized (1,600 F)	4150	106,500	167,500	11.7	30.8	321	8.5	
1030	As-rolled	50,000	80,000	32.0	57.0	179	55.0	Annealed (1,500 F)		55,000	105,750	20.2	40.2	197	18.2	
	Normalized (1,700 F)	50,000	75,500	32.0	60.8	149	69.0	Normalized (1,640 F)		67,250	115,000	20.8	50.7	235	53.8	
	Annealed (1,550 F)	49,500	67,250	31.2	57.9	126	51.2	Annealed (1,560 F)		61,625	84,000	29.0	58.4	163	81.0	
1040	As-rolled	60,000	90,000	25.0	50.0	201	36.0	Normalized (1,600 F)		125,000	185,500	12.2	36.3	363	11.7	
	Normalized (1,650 F)	54,250	85,500	28.0	54.9	170	48.0	Annealed (1,490 F)		68,500	108,000	22.0	49.9	217	37.7	
	Annealed (1,450 F)	51,250	75,250	30.2	57.2	149	32.7	Normalized (1,575 F)	4620	53,125	83,250	29.0	66.7	174	98.0	
1050	As-rolled	60,000	105,000	20.0	40.0	229	23.0	Annealed (1,500 F)		70,250	109,500	24.0	59.2	229	31.0	
	Normalized (1,650 F)	62,000	109,500	20.0	39.4	217	20.0	Normalized (1,580 F)	4820	67,250	98,750	22.3	58.8	197	68.5	
	Annealed (1,450 F)	53,000	92,250	23.7	39.9	187	12.5	Normalized (1,600 F)	5140	68,500	115,000	22.7	59.2	229	28.0	
1060	As-rolled	70,000	118,000	17.0	34.0	241	13.0	Annealed (1,525 F)		42,500	83,000	28.6	57.3	167	30.0	
	Normalized (1,650 F)	61,000	112,500	18.0	37.2	229	9.7	Normalized (1,600 F)	5150	76,750	126,250	20.7	58.7	255	23.2	
	Annealed (1,450 F)	54,000	90,750	22.5	38.2	179	8.3	Annealed (1,520 F)		51,750	98,000	22.0	43.7	197	18.5	
1080	As-rolled	85,000	140,000	12.0	17.0	293	5.0	Normalized (1,575 F)		77,000	138,750	17.5	44.8	269	8.0	
	Normalized (1,650 F)	76,000	146,500	11.0	20.6	293	5.0	Normalized (1,495 F)	5160	40,000	104,750	17.2	30.6	197	7.4	
	Annealed (1,450 F)	54,500	89,250	24.7	45.0	174	4.5	Normalized (1,600 F)	6150	89,250	136,250	21.8	61.0	269	26.2	
1095	As-rolled	83,000	140,000	9.0	18.0	293	3.0	Annealed (1,500 F)		59,750	96,750	23.0	48.4	197	20.2	
	Normalized (1,650 F)	72,500	147,000	9.5	13.5	293	4.0	Normalized (1,675 F)	8620	51,750	91,750	26.3	59.7	183	73.5	
	Annealed (1,450 F)	55,000	95,250	13.0	20.6	192	2.0	Annealed (1,600 F)		55,875	77,750	31.3	62.1	149	82.8	
1117	As-rolled	44,300	70,600	33.0	63.0	143	60.0	Normalized (1,600 F)	8630	62,250	94,250	23.5	53.5	187	69.8	
	Normalized (1,650 F)	44,000	67,750	33.5	63.8	137	62.8	Annealed (1,550 F)		54,000	81,750	29.0	58.9	156	70.2	
	Annealed (1,575 F)	40,500	62,250	32.8	58.0	121	69.0	Normalized (1,600 F)	8650	99,750	148,500	14.0	40.4	302	10.0	
1118	As-rolled	45,900	75,600	32.0	70.0	149	80.0	Annealed (1,465 F)		56,000	103,750	22.5	46.4	212	21.7	
	Normalized (1,700 F)	46,250	69,250	33.5	65.9	143	76.3	Normalized (1,600 F)	8740	88,000	134,750	16.0	47.9	269	13.0	
	Annealed (1,450 F)	41,250	65,250	34.5	66.8	131	78.5	Annealed (1,500 F)		60,250	100,750	22.2	46.4	201	29.5	
1137	As-rolled	55,000	91,000	28.0	61.0	192	61.0	Normalized (1,650 F)	9255	84,000	135,250	19.7	43.4	269	10.0	
	Normalized (1,650 F)	57,500	97,000	22.5	48.5	197	47.0	Annealed (1,550 F)		70,500	112,750	21.7	41.1	229	6.5	
	Annealed (1,450 F)	50,000	84,750	26.8	53.9	174	36.8	Normalized (1,630 F)	9310	82,750	131,500	18.8	58.1	269	28.0	
1141	As-rolled	52,000	98,000	22.0	38.0	192	8.2	Annealed (1,550 F)		63,750	119,600	17.3	42.1	241	52.0	
	Normalized (1,650 F)	58,750	107,500	27.7	55.5	201	38.8									
	Annealed (1,500 F)	51,200	86,800	25.5	49.3	163	25.3									
1144	As-rolled	61,000	107,000	21.0	41.0	212	39.0									
	Normalized (1,650 F)	58,000	96,750	21.0	40.4	197	37.0									
	Annealed (1,450 F)	50,250	81,750	24.8	41.3	167	48.0									

These Datasheets (Part I and Part II) are offered as a guide to show the potential user what to expect of a given grade of steel in the indicated condition. Data were obtained from specimens 0.505 in. in diameter which were machined from 1 in. round; gauge lengths were 2 in. Average properties of hot-rolled, normalized, and annealed material are listed (Part I), while properties of quenched and tempered grades are for single heats (Part II). Sources of the data are Bethlehem Steel Corp. and Republic Steel Corp.

Because of the many variables that affect a steel's properties, however, these listed properties should not be considered either as average or typical. Both strengths and ductilities may range up and down from the values given, depending on the compositions of individual heats of the same grade, section sizes, and internal structures. Properties of carbon steels and many alloy steels are also affected by residual elements (particularly nickel, chromium and molybdenum), even though their amounts are limited to maximums by AISI and SAE specifications.

Fine grained steels normally have better impact strength than coarse-grained types, a factor which should be considered when reviewing the results of tests. Hardness values are not always related to load tests. Hardness values are, in particular, this effect occurs with carbon steels because they are shallow hardening. Hardness tests were made on surfaces, and these hardnesses will not reflect the tensile strengths obtained with specimens representing bar centers. (Center hardnesses are usually lower than surface hardnesses.)

Hot rolled properties for alloy steels are not given because these grades are customarily heat treated. Because the samples were small enough to assure full quenching, values indicate strengths and ductilities which may be obtained with hardened, fine-grained steels of a similar section size at room temperatures.

* All grades are line grained except for those in the 1100 series which are coarse grained. Normalizing and annealing temperatures are given in parentheses. Water quenched.

(Continued on p. 22)

These Datasheets (Part I and Part II) are offered as a guide to show the potential user what to expect of a given grade of steel in the indicated condition. Data were obtained from specimens 0.505 in. in diameter which were machined from 1 in. rounds; plate lengths were 2 in. Average properties of hot-rolled, normalized, and annealed material are listed (Part I). While properties of quenched and tempered grades are for single heats (Part II). Sources of the data are Bethlehem Steel Corp. and Republic Steel Corp.

Because of the many variables that affect a steel's properties, however, these listed properties should not be considered either as average or typical. Both strengths and ductilities may range up and down from the values given, depending on the composition of individual heats of the same grade, section sizes, and internal structures. Properties of carbon steels and many alloy steels are also affected by residual elements (particularly nickel, chromium and molybdenum), even though their amounts are limited to maximums by AISI and SAE specifications.

Fine grained steels normally have better impact strength than coarse-grained types, a factor which should be considered when reviewing the results of Izod tests. Hardness values are not always related to corresponding tensile strengths. In particular, this effect occurs with carbon steels because they are shallow hardened. Hardness tests were made on surfaces, and these hardnesses will not reflect the tensile strengths obtained with specimens representing bar centers. (Center hardnesses are usually lower than surface hardnesses.)

Hot rolled properties for alloy steels are not given because these grades are customarily heat treated. Because the samples were small enough to assure full quenching, values indicate strengths and ductilities which may be obtained with hardened, line-grained steels of a similar section size at room temperatures.

(Continued on p. 34)

* All grades are line-grained except for those in the 1100 series which are coarse-grained. Normalizing and annealing temperatures are given in parentheses. Water quenched.

TABLE 1—APPROXIMATE EQUIVALENT HARDNESS NUMBERS^a FOR DIAMOND PYRAMID HARDNESS NUMBERS (VICKERS, DPH), FOR STEEL

Diamond Pyramid Hardness No.	Brinell Hardness No. 10-mm Ball, 3000-kg Load			Rockwell Hardness No. ^b				Rockwell Superficial Hardness No., Superficial Brinell Penetrator			Shore Scleroscope Hardness No.	Tensile Strength (Approximate) in 1000 psi	Diamond Pyramid Hardness No.
	Standard Ball	Multigren Ball	Tungsten- Carbide Ball	A-Scale, 60-kg Load, Brinell Penetrator	B-Scale, 100-kg Load, 1/16-in. Die Ball	C-Scale, 150-kg Load, Brinell Penetrator	D-Scale, 100-kg Load, Brinell Penetrator	15-N Scale, 15-kg Load	30-N Scale, 30-kg Load	45-N Scale, 45-kg Load			
	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 14
945	—	—	—	85.6	—	68.0	76.9	93.2	84.4	75.4	97	—	945
940	—	—	—	85.3	—	67.5	76.5	93.0	84.0	74.8	96	—	940
935	—	—	—	85.0	—	67.0	76.1	92.9	83.6	74.2	95	—	935
930	—	—	767	84.7	—	66.4	75.7	92.7	83.1	73.6	93	—	930
925	—	—	757	84.4	—	65.9	75.3	92.5	82.7	73.1	92	—	925
920	—	—	—	84.1	—	65.3	74.8	92.3	82.2	72.2	91	—	920
915	—	—	733	83.8	—	64.7	74.3	92.1	81.7	71.8	90	—	915
910	—	—	722	83.4	—	64.0	73.8	91.8	81.1	71.0	88	—	910
905	—	—	710	83.0	—	63.3	73.3	91.5	80.4	70.2	87	—	905
900	—	—	698	82.6	—	62.5	72.6	91.2	79.7	69.4	86	—	900
895	—	—	—	82.2	—	61.8	72.1	91.0	79.1	68.4	84	—	895
890	—	—	484	81.8	—	61.0	71.5	90.7	78.4	67.7	83	—	890
885	—	615	456	81.3	—	60.1	70.8	90.3	77.6	66.7	81	—	885
880	—	610	447	81.1	—	59.7	70.5	90.1	77.2	66.2	—	—	880
875	—	603	438	80.8	—	59.2	70.1	89.8	76.8	65.7	80	—	875
870	—	—	—	80.6	—	58.8	69.8	89.7	76.4	65.3	—	—	870
865	—	597	430	80.3	—	58.3	69.4	89.5	75.9	64.7	79	—	865
860	—	590	420	80.0	—	57.8	69.0	89.3	75.5	64.1	—	—	860
855	—	583	411	79.8	—	57.3	68.7	89.0	75.1	63.5	77	—	855
850	—	578	401	79.5	—	56.8	68.3	88.8	74.6	63.0	—	—	850
845	—	571	391	79.2	—	56.3	67.9	88.5	74.2	62.4	75	—	845
840	—	—	382	78.9	—	55.7	67.5	88.2	73.8	61.7	—	—	840
835	—	557	373	78.6	—	55.2	67.0	88.0	73.3	61.2	74	—	835
830	—	550	364	78.4	—	54.7	66.7	87.8	72.7	60.5	—	298	830
825	—	542	354	78.0	—	54.1	66.2	87.5	72.1	59.9	72	293	825
820	—	535	345	77.8	—	53.6	65.8	87.2	71.7	59.3	—	—	820
815	—	527	335	77.4	—	53.0	65.4	86.9	71.2	58.6	71	288	815
810	—	519	325	77.0	—	52.3	65.0	86.6	70.8	57.8	—	276	810
805	505	512	317	76.7	—	51.7	64.4	86.3	70.0	57.0	69	270	805
800	496	503	307	76.4	—	51.1	63.9	86.0	69.5	56.2	—	263	800
795	488	495	297	76.1	—	50.5	63.5	85.7	69.0	55.4	67	260	795
790	480	487	288	75.7	—	49.8	62.9	85.4	68.3	54.7	—	254	790
785	473	479	279	75.3	—	49.1	62.5	85.0	67.7	53.9	66	247	785
780	465	471	271	74.9	—	48.4	62.1	84.7	67.1	53.1	—	241	780
775	458	460	262	74.5	—	47.7	61.3	84.3	66.4	52.2	64	235	775
770	450	452	252	74.1	—	46.9	60.7	83.9	65.7	51.3	—	228	770
765	441	442	242	73.6	—	46.1	60.1	83.6	64.9	50.4	62	222	765
760	433	433	232	73.2	—	45.3	59.4	83.2	64.3	49.4	—	217	760
755	425	425	222	72.8	—	44.5	58.8	82.8	63.5	48.4	59	212	755
750	415	415	212	72.3	—	43.6	58.2	82.3	62.7	47.4	—	205	750
745	405	405	202	71.8	—	42.7	57.3	81.8	61.9	46.4	57	199	745
740	397	397	192	71.4	—	41.8	56.8	81.4	61.1	45.3	—	193	740
735	388	388	182	70.8	—	40.8	56.0	81.0	60.2	44.1	55	187	735
730	379	379	172	70.3	—	39.8	55.2	80.5	59.3	42.9	—	180	730
725	369	369	162	69.8	(110.0)	38.8	54.4	79.8	58.4	41.7	52	175	725
720	360	360	152	69.2	—	37.7	53.6	79.2	57.4	40.4	—	170	720
715	350	350	142	68.7	(109.0)	36.6	52.8	78.6	56.4	39.1	50	164	715
710	341	341	132	68.1	—	35.5	51.9	78.0	55.4	37.8	—	159	710
705	331	331	122	67.6	(108.0)	34.4	51.1	77.4	54.4	36.5	47	155	705
700	322	322	112	67.0	—	33.3	50.2	76.8	53.6	35.2	—	150	700
695	313	313	102	66.4	(107.0)	32.2	49.4	76.2	52.3	33.9	45	146	695
690	303	303	92	65.8	—	31.0	48.4	75.6	51.3	32.5	—	142	690
685	294	294	82	65.2	(105.5)	29.8	47.3	74.9	50.2	31.1	42	138	685
680	284	284	72	64.5	—	28.2	46.1	74.4	49.7	30.4	—	136	680
675	275	275	62	64.2	(104.5)	27.5	45.3	74.2	49.0	29.3	41	133	675
670	265	265	52	63.8	—	26.8	44.0	73.8	48.4	28.7	—	131	670
665	256	256	42	63.3	(103.5)	26.1	43.3	73.4	47.8	27.9	40	129	665
660	246	246	32	62.7	(102.0)	25.6	42.5	73.0	47.2	27.1	—	127	660
655	236	236	22	62.2	—	24.8	41.7	72.6	46.4	26.2	38	124	655
650	226	226	12	61.6	—	24.0	40.9	72.1	45.7	25.2	—	122	650
645	216	216	2	61.0	(101.0)	23.1	40.1	71.6	45.0	24.3	37	120	645
640	206	206	—	60.4	—	22.3	39.2	71.1	44.2	23.2	—	117	640
635	196	196	—	59.8	—	21.3	38.3	70.6	43.4	22.0	36	115	635
630	186	186	—	59.2	—	20.3	37.4	70.1	42.5	21.1	—	113	630
625	176	176	—	58.6	—	19.3	36.5	69.4	41.7	19.9	34	111	625
620	166	166	—	58.0	(100.0)	18.3	35.6	68.7	40.8	19.0	—	108	620
615	156	156	—	57.4	—	17.3	34.7	68.0	40.0	18.1	33	106	615
610	146	146	—	56.8	—	16.3	33.8	67.3	39.1	17.2	32	101	610
605	136	136	—	56.2	—	15.3	32.9	66.6	38.2	16.3	30	97	605
600	126	126	—	55.6	—	14.3	32.0	65.9	37.3	15.4	29	92	600
595	116	116	—	55.0	—	13.3	31.1	65.2	36.4	14.5	28	88	595
590	106	106	—	54.4	—	12.3	30.2	64.5	35.5	13.6	—	84	590
585	96	96	—	53.8	—	11.3	29.3	63.8	34.6	12.7	—	79	585
580	86	86	—	53.2	—	10.3	28.4	63.1	33.7	11.8	—	75	580
575	76	76	—	52.6	—	9.3	27.5	62.4	32.8	10.9	—	71	575
570	66	66	—	52.0	—	8.3	26.6	61.7	31.9	10.0	—	66	570
565	56	56	—	51.4	—	7.3	25.7	61.0	31.0	9.1	—	62	565
560	46	46	—	50.8	—	6.3	24.8	60.3	30.1	8.2	—	57	560
555	36	36	—	50.2	—	5.3	23.9	59.6	29.2	7.3	—	53	555
550	26	26	—	49.6	—	4.3	23.0	58.9	28.3	6.4	—	48	550
545	16	16	—	49.0	—	3.3	22.1	58.2	27.4	5.5	—	44	545
540	6	6	—	48.4	—	2.3	21.2	57.5	26.5	4.6	—	40	540
535	—	—	—	47.8	—	1.3	20.3	56.8	25.6	3.7	—	36	535
530	—	—	—	47.2	—	0.3	19.4	56.1	24.7	2.8	—	32	530
525	—	—	—	46.6	—	—	18.5	55.4	23.8	1.9	—	28	525
520	—	—	—	46.0	—	—	17.6	54.7	22.9	1.0	—	24	520
515	—	—	—	45.4	—	—	16.7	54.0	22.0	0.1	—	20	515
510	—	—	—	44.8	—	—	15.8	53.3	21.1	—	—	1	

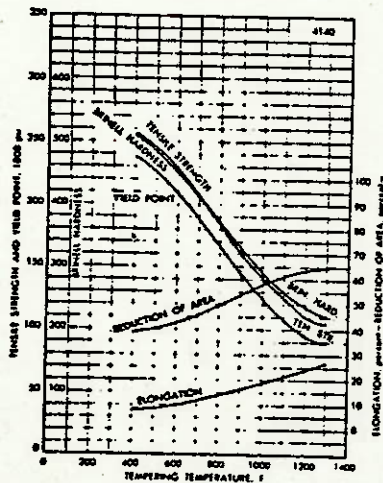
STEELS, AISI

4140

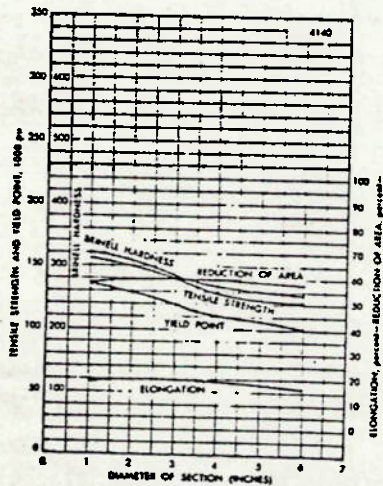
Treatment Temperatures (collected)

	Rep. Steel Co.	Ryerson
Forging	2250F	1950-2250F
Annealing	1500-1700	1500-1550
Normalizing	1600-1725	1600-1750
Quenching—oil	1500-1550	1525-1600

Fig. 1
Properties as Quenched and Drawn



Quenched and Tempered at 1000F



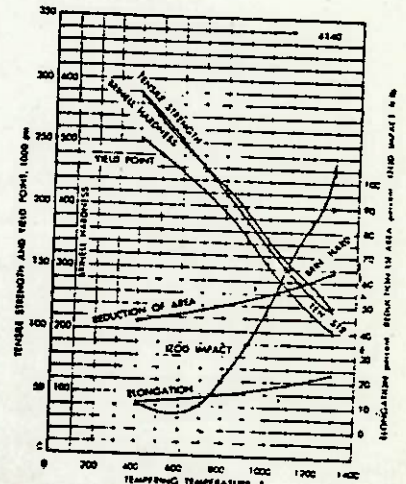
Source—Republic Steel Corp.
Size treated—1 in. to 6 in. diam.
Size tested—2 in. x .505 in. diam.
Tests over 1.5 in. at mid-radius.
Treatment—1500-1550F, Drawn
as shown, Quenched in oil.

Critical Points (collected)

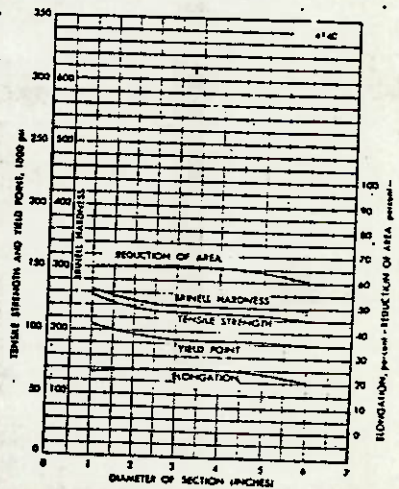
	Ryerson ²	Beth. Steel Co. ¹	Rep. Steel Co. ²	AISI
Ac ₁	1380F	1395F	1380F	1375
Ac ₃	1460	1450	1450	1450
Ar ₁	1370	1330	—	1350
Ar ₂	1280	1280	1280	1250

¹Single heat values. Analysis: .41C; .85Mn; .20Si.
².12Ni; 1.01Cr; .24Mo.
Approx values.

Fig. 2
Quenched and Tempered



Quenched and Tempered at 1200F



ANEXO B

SELEÇÃO E TRATAMENTO TÉRMICO DE LIGAS FERROSAS PARA COMPONENTES AUTOMOTIVOS.

A seguir apresentamos sugestões de materiais e tratamentos térmicos utilizados em componentes automotivos. Trata-se do resultado da experiência dos principais construtoras de automóveis, sendo que as letras A,B,C... procura caracterizá-los.

Os aços indicados referem-se aos graus AISI-SAE, e a seguinte nomenclatura é utilizada para designar o tratamento térmico adotado:

T = temperado.

R = revenido

TH = temperado em água

TO = temperado em óleo

TA = temperado ao ar

Referência: Metal Progress - MID - JUNE 1978

OBS.: Alguns materiais indicados não são normalmente produzidos no Brasil, para tanto, o equivalente deve ser pesquisado.

..../..

CARROS	ENGRENAGENS DE TRANSMISSÃO - ENGRENAGEM CÔNICA
A	
B	5120, 8620 forjado, carbonetado, TOE R ; profundidade de camada 0,50 - 0,90 mm.
C	4027 forjado; cementado , T&R para 58-62 HRC; profundidade de camada 0,8 - 1,1 mm.
D	
E	4023 ou 4118 forjado, cementado, T&R para 58-62 HRC; profundidade de camada 0,8 - 1,1mm . Encruado com jato - percussão.
F	
G	4027 forjado, cementado, TOE R para 60 HRC na superfície e 28-38 HRC no núcleo do dente , profundidade de camada 1,0 - 1,4mm.
CAMINHÕES	
A	4023 ou 4118 forjado, cementado , T&R para 58-62 HRC, profundidade de camada 0,8 - 1,1mm . Encruado com jato-percussão.
B	8620 forjado, cementado, TOE R para 58-63 HRC, profundidade de camada 0,9 - 1,1mm.
C	8620 , forjado, cementado, martemperado & R para 57 - 63 HRC, profundidade de camada 0,7 - 1,2mm.

D	8620 forjado, cementado (925°C) , T ₆ R para 58-63 HRC, profundidade de camada 0,8 - 1,0mm ou 1,0-1,2mm. 4820 forjado, cementado (925°C) , T ₆ R para 58- 63 HRC, profundidade de camada 0,8-1,0mm ou 1,0-1,2mm .
E	4027 forjado, cementado , T ₀ & R para 60 HRC na superfície e 28-38 HRC no núcleo do dente, profundidade, ' de camada 1,0-1,4mm.

CARROS	ENGRENAGENS DE TRANSMISSÃO- ENGRENAGEM CENTRAL DE SISTEMA PLANETÁRIO
A	5140H forjado, cementado, profundidade de camada 0,2 - 0,3mm; dureza na superfície de 79-82,5 HRA.
B	5140 ou 5132 forjado, carbonitretado , T ₆ R , profundidade de camada (5140) 0,13-0,40mm, (5132) 0,25 - 0,55 mm.
C	4023 a partir de tubo , cementado , T ₆ R para 58HRC mínimo , profundidade de camada 0,4-0,65mm.
D	5130 a partir de tubo, carbonitretado, TO ₆ R , profundidade de camada 0,30-0,40mm, dureza de superfície R45N 64 mínimo, dureza do núcleo 42-51 HRC.
E	4023 a partir de tubo, cementado , T ₆ R para 58 HRC mínimo, profundidade de camada 0,38-0,60mm.
F	5140 H a partir de tubo, cementado , T ₆ R (190°C); profundidade de camada 0,2 - 0,3 mm.
G	5130 usinado, carbonitretado, TO ₆ R para 60 HRC na superfície e 42-48 HRC no núcleo , profundidade de camada 0,25-0,40mm.
CAMINHÕES	
A	4023 a partir de tubo, cementado , T ₆ R para 58 HRC mínimo , profundidade de camada 0,38-0,60mm.

CARROS	ENGRENAGENS DE TRANSMISSÃO - ENGRENAGEM SATÉLITE
A	5140 H (forjado), carbonitretado para 0,17-0,25mm de profundidade , 79-82,5 HRA na superfície.
B	4027 forjado, carbonitretado, T&R , profundidade de camada 0,20 - 0,40 mm.
C	4024 usinado, cementado , T&R para 58 HRC mínimo , profundidade 0,4 - 0,6 mm.
D	5130 (forjado), carbonitretado, TO&R , profundidade de camada 0,25-0,40mm, dureza de superfície R 45N 64 <u>m</u> í nimo (núcleo , 42-51 HRC).
E	4024 usinado, cementado , T&R para 58 HRC mínimo , profundidade de camada 0,38-0,60 mm.
F	5140 H usinado, cementado, T&R (190°C), profundidade de camada 0,20 - 0,30mm.
G	5130 usinado, carbonitretado, TO&R para 60 HRC na superfície e 42-48 HRC no núcleo, profundidade de cam <u>a</u> da 0,25-0,40mm.
CAMINHÕES	
A	4024 usinado, cementado , T&R para 58 HRC mínimo na superfície , profundidade de camada 0,38-0,60mm.

CARROS	DIFERENCIAL : COROA E PINHÃO
A	<u>Coroa</u>: 1527 mod.(022-0,30C; 0,06-0,09S) forjado; cementado (900°C) , temperado em óleo (160°C); profundidade de camada 0,9-1,3mm, dureza da superfície 60HRC mínimo. <u>Pinhão</u>: 4130 forjado, cementado (900°C) , temperado em óleo (160°C), profundidade de camada 0,9-1,3mm , dureza da superfície 60 HRC mínimo.
B	1527,4023,4028H forjado, cementado, T&R , profundidade de de camada 1,0-1,3mm.
C	<u>Pinhão</u>: 4027 forjado, cementado (915°C) , TO a partir de 825°C, profundidade de camada 1,0-1,15mm. <u>Coroa</u>: 1527 mod.
D	<u>Pinhão</u>: 1527 mod. (1,35-1,65Mn, 0,06-0,09 S), forjado, cementado , TO , profundidade de camada 1,0-1,3mm, dureza da superfície 60 HRC mínimo. <u>Coroa</u>: 1527 mod. (1,10-1,40Mn, 0,06-0,09S), forjado, cementado, TO, profundidade de camada 1,0-1,3mm.
E	4023 ou 4422 forjado, cementado, T&R para 58 HRC mínimo, profundidade de camada 1,0-1,4mm.
F	Fofo modular 418-475 BEN, microestrutura de nódulos ' de grafita em matriz de bainita fina e mortensita ' auto - revenida. Tratamento de jato-percussão para adquirir 50Ksi de tensão residual de compressão na raiz do dente.
G	1527 forjado, cementado para 60 HRC mínimo , profundidade de camada 1,15-1,5mm.

CAMINHÕES	
A	4422 forjado, cementado, T & R para 58 HRC mínimo, profundidade de camada 1,0-1,4mm.
B	4620, 4817, 8620, 94B 17, ou 94B20 forjado, cementado T & R para 61-65 HRC.
C	<u>Pinhão</u> : 4820 forjado, cementado, martempera e revenido para 57-63HRC, profundidade de camada efetiva 1,2 - 1,9mm. <u>Coroa</u> : 8622 forjado, cementado, martempera e revenido para 57-63HRC, profundidade de camada efetiva 0,9 - 1,5mm.
D	<u>Pinhão</u> : 4718 ou 4820 forjado, cementado (925°C), T & R para 58-63 HRC , profundidade de camada 1,5-2,2mm. <u>Coroa</u> : 4718 forjado, cementado (925°C) , T & R para 58-63HRC , profundidade de camada 1,5-2,2 mm.
E	<u>Pinhão</u> : 8622 forjado, cementado para 60 HRC mínimo , profundidade de camada 1,4-1,8mm. <u>Coroa</u> : 4118 forjado, cementado para 60 HRC mínimo, profundidade de camada 1,3-1,65 mm.

CARROS	RIXO DE SAÍDA
A	1552 mod. (1,35-1,65mm) forjado , normalizado ϵ R para 197-229 BHN, temperado por indução, dureza na superfície 50-56 HRC.
B	4027 forjado, cementado, TO ϵ R, profundidade de camada 0,9 - 1,4mm. 1042 forjado, temperado por indução, TH ϵ R (150°C), profundidade de camada 2,2 - 4,0mm.
C	1038 mod.(0,40-0,60 Si) extrudado a frio, temperado por indução e aliviado a tensão.
D	1141 usinado, temperado por indução ϵ R , dureza da superfície 48 HRC mínimo.
E	1038 mod.(0,80-1,10Mn) extrudado a frio, temperado por indução e aliviado a tensão.
F	1052 mod. , forjado, temperado seletivamente.
CAMINHÕES	
A	1038 mod.(0,80-1,10Mn) extrudado a frio, temperado por indução e aliviado a tensão.
B	8625 forjado, cementado, TO ϵ R para 58-63 HRC profundidade de camada 1,0-1,3mm.
C	8625 ou 4118, cementado, martempera ϵ R para 57-63 HRC, profundidade de camada 0,65-1,2mm.

D	8620 forjado, cementado (925°C) T&R para 58-63HRC , profundidade de camada 1,0-1,3mm. 4815 forjado, cementado (925°C) T&R para 58-63 HRC , profundidade de camada 1,0-1,3mm.
E	1132 forjado, carbonitretado, T&R, profundidade de camada 0,25-0,50mm.

CARROS	SEMI - EIXOS
A	1050 mod.(0,80-1,10in) extrudado a frio, flange forjada, temperado por indução e revenido , 60 HRC na superfície mínima, 50HRC mínimo a 3,0mm de profundidade.
B	1039 extrudado a frio, temperado por indução, 45-55 HRC na superfície. Semi-eixos que possuam assento direto:1050mod. extrudado a frio, temperado por indução, aliviado a tensão, 60 HRC na superfície no mínimo.
C	1038 extrudado a frio, temperado por indução e revenido a 230°C.
D	1038 mod. (0,70-1,00in) , extrudado a frio e forjada a flange a quente, temperado por indução e revenido , 50-58 HRC na superfície , 45 HRC mínimo a 3,0mm de profundidade.
E	1038 mod.(0,40-0,60 Si) , extrudado a frio, temperado por indução , aliviado a tensão , profundidade de camada com 4,0mm mínimo de 35 HRC, 46-53 HRC na superfície. Semi-eixos que possuam assento direto:1050 mod;extrudado a frio, temperado por indução , aliviado a tensão ' 60HRC mínimo na superfície, 50 HRC mínimo a 3,0mm de profundidade.
F	1050 mod. forjado, temperado por indução, na região do assento 60 HRC mínimo a 3,3 mm de profundidade, dureza do núcleo 170 BHN mínimo.
G	1050 forjado, temperado por indução para 59 HRC mínimo

CAMINHÕES	
A	1038 mod.(0,40-0,60 Si) forjado, temperado por indução e aliviado a tensão , profundidade de camada com 4,0 mm mínimo de 35 HRC, 46-53 HRC na superfície.
B	1046 forjado, THÉR para 541-601 BHN na superfície , núcleo com 250-350 BHN. 41B50H ou 50B50H forjado, TOÉR para 285-321 BHN, temperado por indução e revenido para 495-555 BHN.
C	<u>Semi-eixo traseiro-</u> 1041 ou 10B41 forjado, temperado por indução e revenido para 52-59 HRC. <u>Semi-eixo dianteiro-</u> 15B37H, TOÉR para 255-302 BHN
D	4150 forjado, temperado para 388-444 BHN.
E	1041 forjado, temperado por indução para 55 HRC mínimo.

CARROS	SUSPENSÃO
A	<u>Molas helicoidais</u>: 5160, aquecido a 870°C, espiralado, TO&R para 461-514 BHN, encruado por jato-percussão (shotpeened). <u>Barras de torção</u>: 5160H (RENFICADO SEM CENTROS) centerless ground, aquecido a 870°C, TO&R para 444-495 BHN, encruado por jato-percussão. <u>Articulação da direção</u>: Fofa nodular ferrítico, 126 - 179 BHN, 80% grafite esferoidal. <u>Spindle</u>: 1038 mod. (0,38-0,45C, 0,30-1,10Mn) extrudado, (BACA DA MANGA DE EIXO) temperado por indução, dureza superficial 46-52 HRC.
B	<u>Molas Helicoidais</u>: 5160, T&R para 429-477 BHN <u>Molas de lâmina</u>: 5160, T&R para 429-477 BHN
C	<u>Molas helicoidais</u>: 5155 ou 5160, T&R para 429-477 BHN. <u>Molas de lâmina</u>: 5155, 5160 ou 9260, T&R para 415-463 BHN. <u>Pivô de direção</u>: 5145 forjado, T&R para 262-293 BHN.
D	<u>Molas helicoidais</u>: 5160 ou 9260, TO&R para 461-514 BHN, encruado por jato-percussão. <u>Articulação da direção</u>: Fofa nodular, recozido para 131-179 BHN.
E	<u>Molas de lâmina</u>: 5160, T&R para 415-461 BHN. <u>Barras de torção</u>: 5160H, T&R para 477-534 BHN, ou 5160 mod., T&R para 444-495 BHN. <u>Articulação da direção</u>: 1046 forjado, T&R para 207 - 285 BHN. <u>Molas helicoidais</u>: 5160, T&R para 461-514 BHN, encruado por jato - percussão.

F	<u>Molas helicoidais</u>: 9260, TO & R para 461 -514 BHN, encruado por jato-percussão. <u>Molas de lâmina</u>: 5160 , T & R para 415-461 BHN ou 430 - 477 BHN, encruado por jato-percussão. <u>Barras de torção</u>: 5160H, aquecido a 870°C, TO & R (482°C) para 444-495 BHN , encruado por jato percussão. <u>Articulação da direção</u>: Fofa nodular ferrítico , recozido para 126-179 BHN.
G	<u>Molas helicoidais</u>: 5160, TO & R para 429-477 BHN. <u>Molas de lâmina</u>: 5160, TO & R para 429-477 BHN.
CAMINHÕES	
A	<u>Molas de lâmina</u>: 5160, T & R para 415-461 BHN. <u>Articulação da direção</u>: 5150 ou 15B48 forjado , T & R para 255-321 BHN. <u>Molas helicoidais</u>: 5160, T & R para 461-514 BHN
B	<u>Molas de lâmina</u>: 5160, laminado a quente , T & R para 401-444 BHN. <u>Articulação da direção</u>: 5147 ou 8645 forjado, TO & R para 285-341 BHN.
C	<u>Molas</u>: 50B60, T & R para 40-47 HRC. <u>Barras de torsão</u>: 5160 ou 6150 , T & R para 47-50 HRC. <u>Articulação da direção</u>: 1050 forjado, temperado por indução e revenido para 50-55 HRC, ou 50B35H forjado, T & R para 285-341 BHN, encruado por jato-percussão.

D	<u>Molas de lâmina:</u> 5160, T&R para 388-444 BHN, ou 9260, T&R para 388-444 BHN. <u>Articulação da direção:</u> 8640 forjado, T&R para 285 - 331 BHN;
E	<u>Molas helicoidais:</u> 5160, TO&R para 429-477 BHN . <u>Molas de lâmina:</u> 5160, TO&R , para 429-477 BHN.

CARROS	Bielas
A	1140 modificado (0,80 a 1,10mm) , forjado , TA (a partir da temperatura de forja) para 192-229 BHN, "shot peened" (encruado por jato-percussão).
B	1541 H forjado , T&R , ou 1151 mod. (0,06-0,09S) forjado ; TA para 217-262 BHN.
C	Fofo maleável perlítico, T&R para 241-269 BHN 1041 forjado, T&R para 229-255 BHN.
D	Fofo maleável perlítico, TO&R para 207-255 BHN, encruado por jato-percussão.
E	1541 forjado, T&R para 229-269 BHN.
F	Fofo maleável perlítico, T&R para 241-269 BHN.
G	1038 forjado , TH&R para 229-269 BHN
CAMINHÕES	
A	1541 forjado, T&R para 229-269 BHN.
B	
C	1038 forjado, T&R para 217-269 BHN. 1541 ou 15B41 forjado, T&R para 223-262 BHN. 5145 forjado, T&R (570°C) , nitretado.
E	1038 forjado, TH&R para 229-269 BHN.

CARROS	PINOS PARA PISTÃO
A	1016 ou 1019 extrudado a frio, cementado (900°C), TH&R (175°C), dureza da camada cementada 58 HRC mínimo, núcleo 25-45 HRC, profundidade de cementação 0,6-1,0mm.
B	1016, 5015 ou 5115 extrudado a frio, cementado, T & R para 58-63 HRC, profundidade de cementação 0,4-0,8mm.
C	1016 extrudado a frio, cementado para 0,6-0,9mm, temperado por indução e revenido para 60-65 HRC.
D	1018 ou 1019 extrudado a frio, carbonitretado, TH&R, camada de 0,8 -1,1mm. Dureza da superfície, R15N 89,5 mínimo (núcleo 25-45 HRC).
E	1016 extrudado a frio, cementado, T&R para 60 HRC mínimo, profundidade de camada 0,5-0,9mm.
F	1019 extrudado a frio, carbonitretado ou cementado, TH para R15N 89-91 (núcleo 45 HRC máximo), profundidade de camada 0,9 - 1,1mm.
G	1018 tubo sem costura, cementado, TO&R para R15N 90 mín. na superfície, profundidade de camada 0,8-1,2mm.
CAMINHÕES	
A	1016 extrudado a frio, cementado, T&R para 60 HRC mínimo, profundidade de camada 0,5-0,9mm.
C	1016 (parede fina) ou 8617 (parede grossa) extrudado a frio, cementado, profundidade da camada depende da espessura de parede, revenido para 60-64 HRC.

E

1018 tubo sem costura, cementado, TO&R, profundidade
de camada 0,9-1,2mm.

CARROS	BILO COMANDO DE VÁLVULAS(VER SAE J431-AUTOMOTIVE CAMSHAFTS)
A	Fofo cinzento ligado, com ressalto endurecidos para 48 HRC mínimo, mancal dureza entre 262-311 BHN no núcleo.
B	Fofo cinzento ligado, ressalto temperado por indução para 50-60 HRC.
C	Fofo cinzento ligado(SAE G 4000d) , ressalto aquecido por chama , TO para 52 HRC mínimo.
D	Fofo cinzento ligado, material do núcleo entre 262 - 311 BHN, ressaltos temperados seletivamente no nariz para 52 HRC no mínimo.
E	Fofo cinzento ligado, material com núcleo entre 255-302 BHN, ressaltos endurecidos por indução ou chama para 50 HRC mínimo.
F	Fofo cinzento ligado (GM 120M) , ressaltos endurecidos por chama para 53 HRC mínimo, mancal entre 248-302 BHN, engrenagem entre 262-311 BHN.
G	Fofo cinzento ligado, ressalto temperado por indução para 48,5 HRC mínimo.
CAMINHÕES	
A	Fofo cinzento ligado, material com núcleo entre 255-302 BHN, ressaltos endurecidos por indução ou chama para 50 HRC mínimo.

E

1053 forjado, resfriado ao ar
Fofa nodular, dureza entre 187-241 BHN.