

PROJETO MECÂNICO (SEM 0347)

Notas de Aulas v.2016

Aula 11 – Tribologia – Lubrificação/Eng. de Superfícies

Professores: Benedito de Moraes Purquerio
Carlos Alberto Fortulan

Colaboradores: Monaco LL
Souza MC

Lubrificação

“Lubrificação é o processo ou técnica empregada para reduzir o desgaste de uma ou ambas superfícies em contato relativo, pela interposição de uma substância chamada lubrificante entre as superfícies. Aplicada para transporte ou para suportar carga (pressão gerada) entre as superfícies opostas.”

Lubrificantes
Lubrificação



Propriedades, comportamento operacional,
Materiais, controle qualidade,
Manuseio, administração, organização

LUBRIFICAÇÃO



LUBRIFICANTE



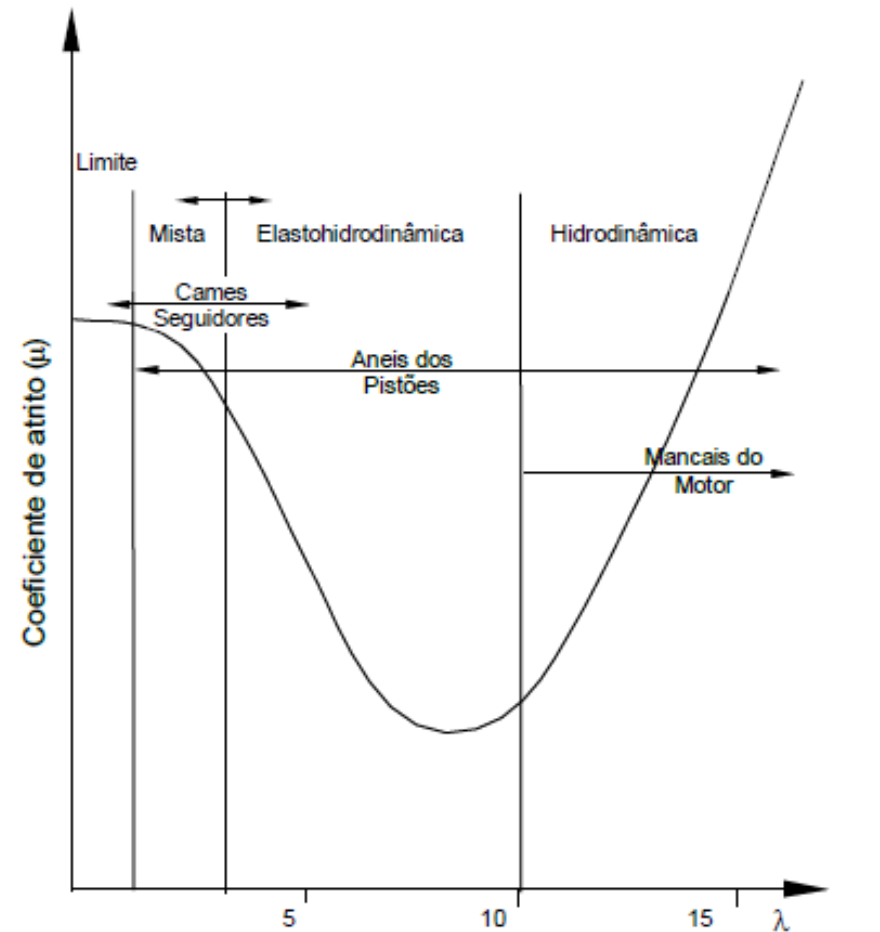
Redução da resistência ao atrito e desgaste ou outras formas de deteriorização entre duas superfícies pela aplicação de um **LUBRIFICANTE**.



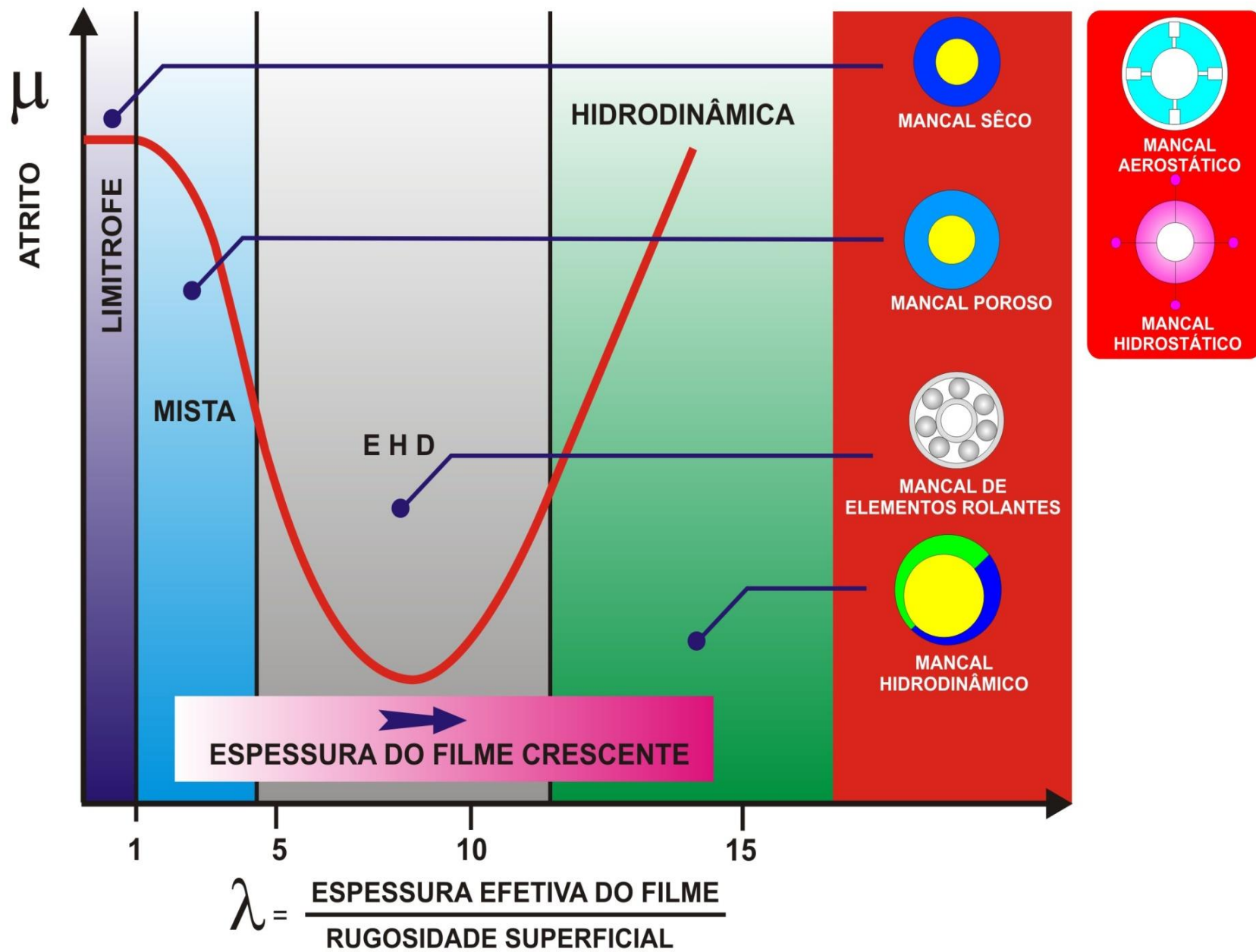
Toda substância interposta entre duas superfícies em movimento relativo com o propósito de reduzir o atrito e o desgaste entre elas, e de protegê-las e refrigerá-las.

Regimes de Lubrificação

- Lubrificação **Limite**;
- Lubrificação **Mista**;
- Lubrificação **Elasto hidrodinâmica**;
- Lubrificação com **Filme de fluído**;



Espessura média do Filme (λ) = Espessura efetiva do filme / Rugosidade da superfície



Lubrificação Limite

Quando as superfícies dos sólidos não são separadas pelo lubrificante e o contato ocorre em uma área comparável àquela do contato seco.

Resistência do filme:

- Camadas de lubrificantes gasosos, líquidos ou sólidos adsorvidos fisicamente;
- Camadas adsorvidas quimicamente;
- Filmes formados por reação química.

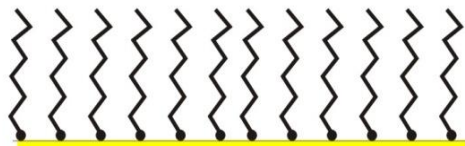
LUBRIFICAÇÃO LIMÍTROFE

Formação

Óleos lubrificantes + gorduras animal ou vegetal → ácidos adiposos

CAMADAS ADSORVIDAS QUIMICAMENTE

SABÕES METÁLICOS



Ácidos esteárico, oleico, láurico.

Resistência

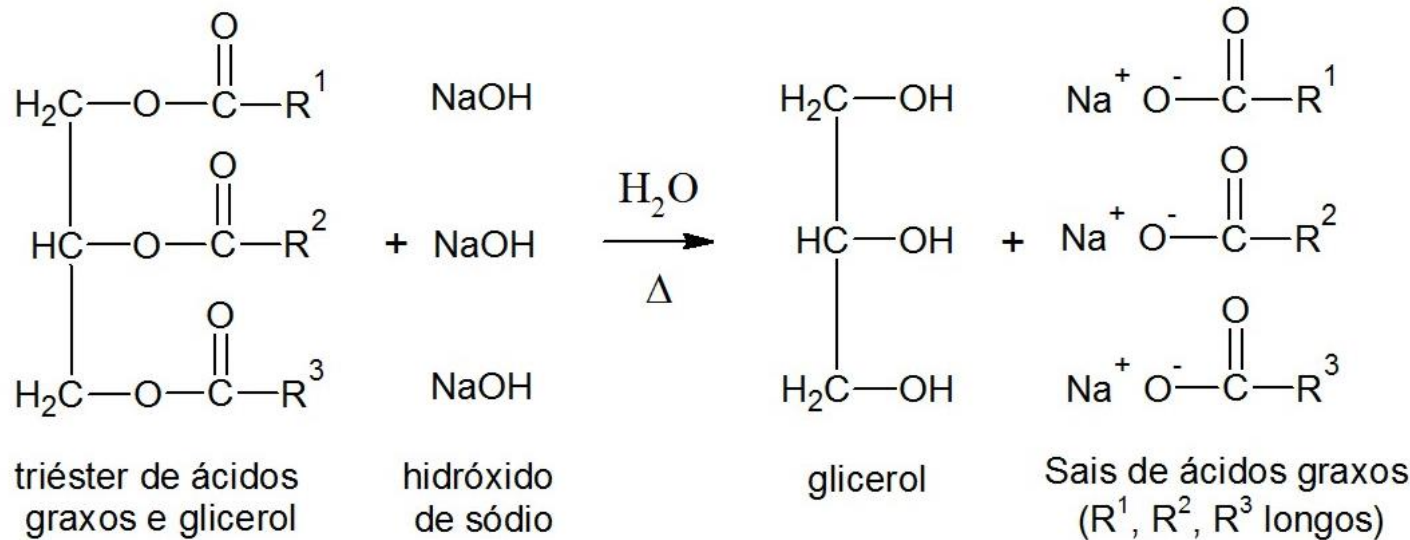
Baixa

Ponto de fusão do sabão metálico (~100 °C)

Atrito

Reduz μ de até 50% ($\mu \sim 0,1$ a $0,15$)

Saponificação Consiste na hidrólise básica de lípideos, mais precisamente triglicerídeos (óleos vegetais ou gorduras) mediante a adição de uma base forte (facilitado com o aquecimento). Cada molécula de triglicerídeo se quebra em uma molécula de glicerina e em seus três ácidos graxos correspondentes. O sabão resultante é um sal de ácido carboxílico e por possuir uma longa cadeia carbônica em sua estrutura molecular, é capaz de se solubilizar tanto em meios polares quanto em meios apolares.



R_1, R_2 e R_3
são cadeias
longas



Sabões

LUBRIFICAÇÃO LIMÍTROFE

**FILMES
FORMADOS
POR
REAÇÃO QUÍMICA**

Formação

Aditivos P.E. → S, Cl, P, Zn

Filmes resistentes → Condições operacionais severas
Cargas elevadas, Velocidade alta,
Temperatura alta.

1000°C → Início da reação (ponto de fusão)

Atrito → Baixo

LUBRIFICAÇÃO LIMÍTROFE

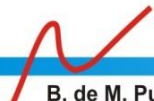
LUBRIFICANTE P.E.

Oxigênio na atmosfera

O_2 + superfície metálica → camada de óxido

menor atrito e desgaste

Polímeros (PTFE), fosfatização, sulforização



LUBRIFICAÇÃO LIMÍTROFE

COEFICIENTES DE ATRITO E LUBRIFICAÇÃO LIMITROFE

Superfícies secas e limpas quimicamente $\Rightarrow \mu \sim 1,0$

$O_2 \Rightarrow \mu \sim 0,5$

Óleo mineral $\Rightarrow \mu \sim 0,15$

Lube limítrofe $\Rightarrow \mu \sim 0,08$

**LUBRIFICAÇÃO
MISTA**

Contato  Propriedades do lube + lube limítrofe



Mancais que operam em regime intermitente

FF  MISTA  LIMÍTROFE

LUBRIFICAÇÃO ELASTOHIDRODINÂMICA

A deformação elástica local dos materiais gera retensão de filmes hidrodinâmicos na região limítrofe.

Ponto e linhas de contato



Engrenagens
Cames
Elementos rolantes
Juntas sinoviais

Viscosidade ➡ Aumenta consideravelmente devido às pressões excessivas.

Formação de filmes lubrificantes efetivos.

η_{EHD} = Milhares de vezes $\eta_{\text{atmosférica}}$

Lubrificação com Filme de fluido

Características

Filme



Espesso

Atrito



Pequeno



Cisalhamento do filme lubrificante.

Desgaste



Baixo (partidas, paradas)

Contato



Governado pelas propriedades físicas do lubrificante

É a condição em que um filme de lubrificante seja suficientemente espesso para evitar que duas superfícies sólidas opostas entrem em contato.

Regime de lubrificação
de um par tribológico



f

Propriedades do lube
Cargas
Velocidade
Temperatura
Geometria
Qualidade da superfície

Carga
Velocidade
Temperatura
Geometria



Parâmetros fixados

Lubrificante



Selecionado



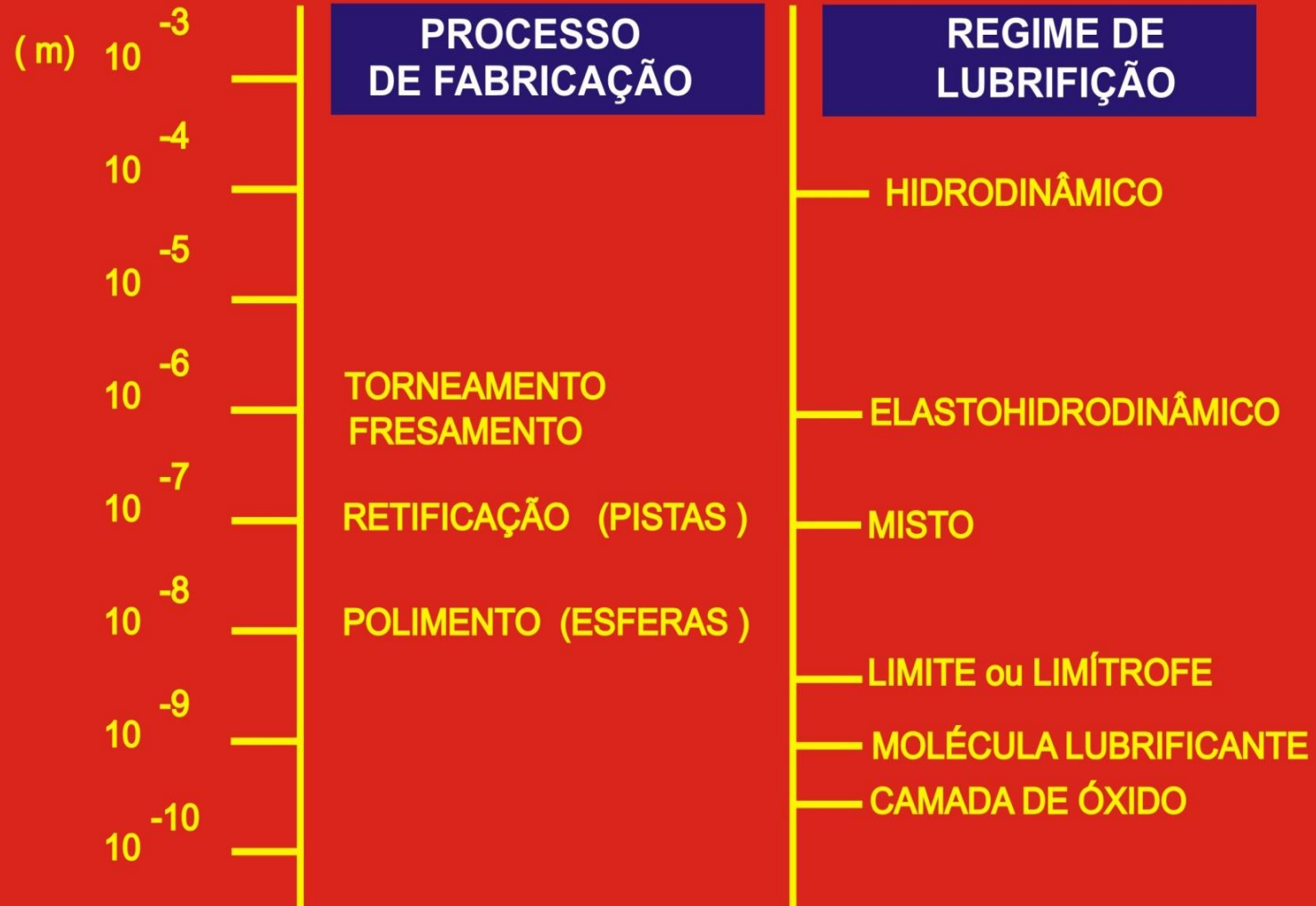
Regime de lubrificação é definido
pela qualidade superficial

TEXTURA SUPERFICIAL

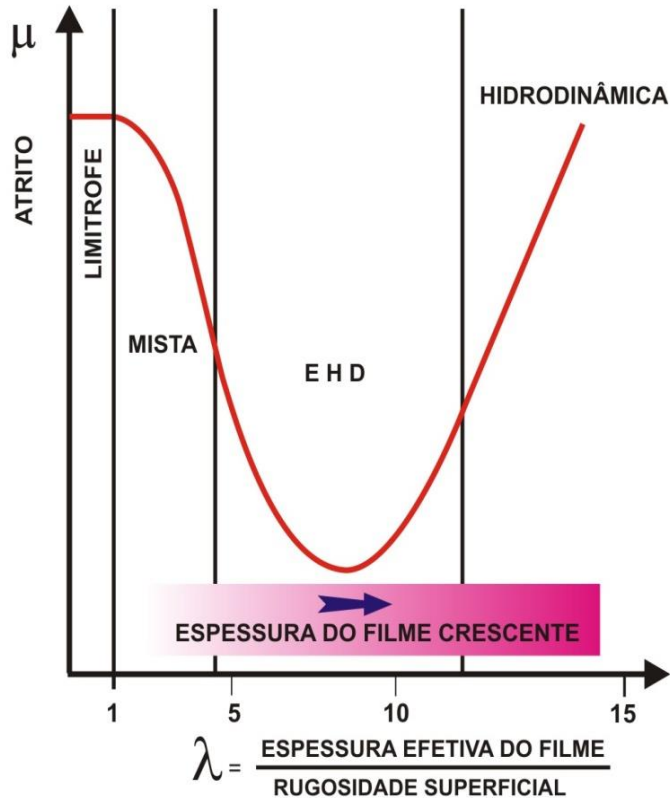
AMACIAMENTO

Pré tratamento das superfícies
pela adição do lubrificante P.E.
ou lubrificantes limítrofes,
durante os estágios do processo
de amaciamento.

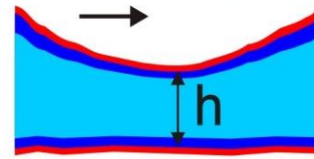
REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO E A ESCALA DE DIMENSÕES TÍPICAS DE QUALIDADE SUPERFICIAL



TRANSIÇÃO ENTRE OS REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO



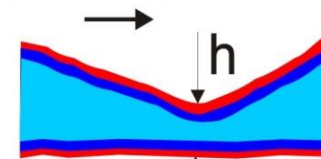
HIDRODINÂMICA



$$\lambda = 10 \text{ a } 100$$

$$h = 10^{-6} \text{ m}$$

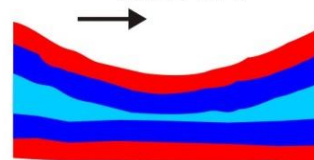
ELASTOHIDRODINÂMICA



$$\lambda = 4 \text{ a } 10$$

$$h = 10^{-7} \text{ a } 10^{-6} \text{ m}$$

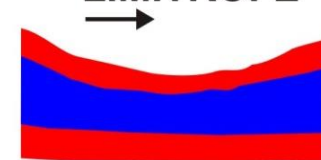
MISTA



$$\lambda = 1 \text{ a } 5$$

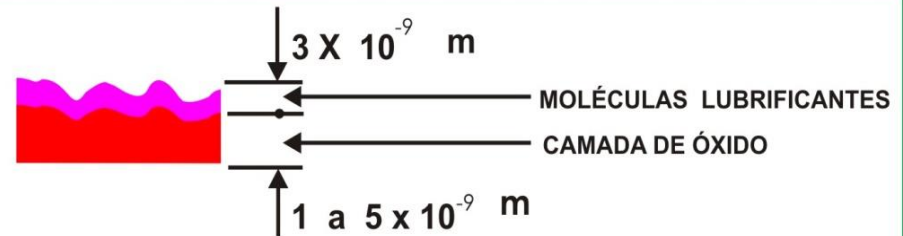
$$h = 10^{-8} \text{ A } 10^{-6} \text{ m}$$

LIMITROFE



$$\lambda < 1$$

$$h = 10^{-9} \text{ A } 10^{-8} \text{ m}$$



DIMENSÕES TÍPICAS DAS PELÍCULAS SUPERFICIAIS

Questionamentos:

06 – Em pista molhada qual pneu freia mais o careca ou o riscado?

Lubrificantes

O que se espera de um lubrificante?

- Larga faixa de viscosidade;
- Pequena variação na viscosidade com a temperatura;
- Estabilidade química;
- Suficiente calor específico para o transporte de calor devido ao atrito;
- Baixo custo;
- Disponibilidade.

CLASSES DE LUBRIFICANTES

SÓLIDO



GRAFITE
MoS₂
MATERIAIS SECOS

SEMI-SÓLIDO



GRAXAS

LÍQUIDO



ANIMAL
VEGETAL
MINERAL
SINTÉTICO

GASOSO



AR
He
N

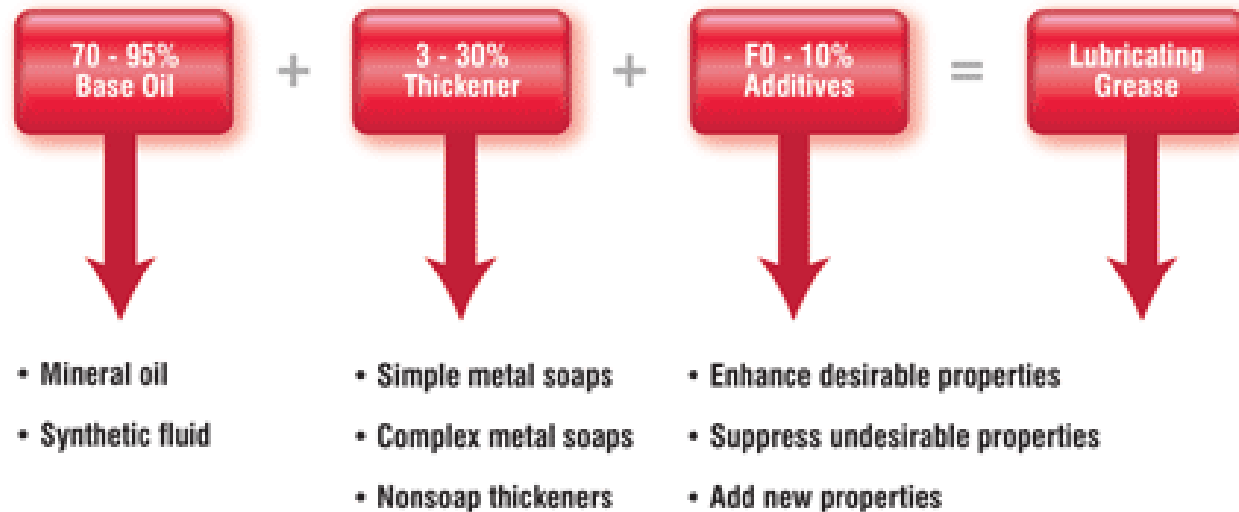
Óleos

- refrigeração e remoção dos debris;
- proteção contra o contato metal-metal;
- Lubrificação hidrodinâmica;
- Diminuição do atrito = diminuição da energia



Graxas

Óleo base + espessante + aditivos



Sal normalmente insolúvel em água formado pela interação de um ácido graxo com um metal, especialmente chumbo, alumínio, lítio.

- Emulsão de óleo
- baixa capacidade de refrigerar / sem lubrificação heterodinâmica
- Alternativa quando o óleo é impossível



- Óleo Base (velocidade, temperatura, compatibilidade com materiais)

Espessante

Sabões Metálicos

Lítio

Cálcio

Sódio

Alumínio

Sabões Metálicos Complexos

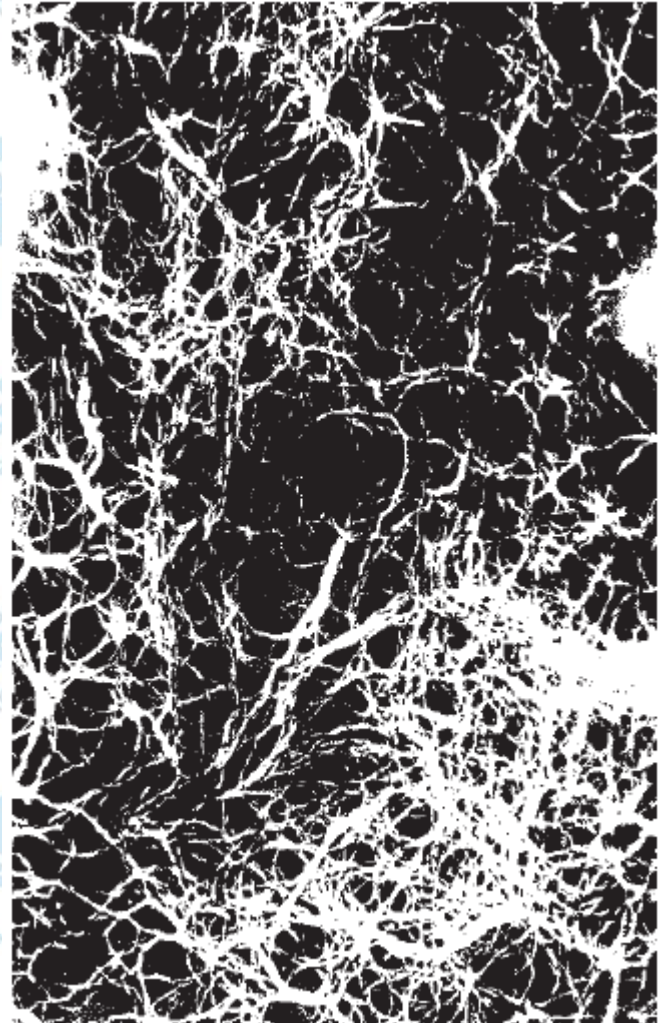
Lítio

Cálcio

Alumínio

Sem sabão

Argila



Sabão de Lítio

Aditivos

Para situações de elevada pressão e choques

Grafite

Bissulfeto de Molibidênio

Mica

Talco



Aditivos Solúveis

Compatíveis com a natureza química do óleo base

Anti oxidante

Inibidores de corrosão

Extrema pressão

Anti desgaste

ÓLEO CRU (CRUS) → Parafinicos Naftênicos → Frações → Óleos lube
: Gás

LUBRIFICANTES → **ÓLEOS LUBRIFICANTES** → (I+A)



HIDROCARBONETOS → Carbono + Hidrogênio (+ Enxôfre).



PARAFINAS → Cadeias retas, ramificadas, cíclicas.

$C_6 H_{14}$ → n-Hexano

AROMÁTICOS → Insaturados

$C_6 H$ → Benzeno

Questionamentos

O uso de um lubrificante:

- 2) pode causar um aumento do desgaste enquanto diminui o coeficiente de atrito?
- 3) pode diminuir o desgaste enquanto promove um aumento do atrito?

Óleos para motores a combustão — Classificações

Classificação SAE: estabelecida pela **Sociedade dos Engenheiros Automotivos dos Estados Unidos**, classifica os óleos lubrificantes pela sua viscosidade, que é indicada por um número. Quanto maior este número, mais viscoso é o lubrificante e são divididos em três categorias:

Viscosidade

W - Winter

Óleos de **verão**: SAE 20, 30, 40, 50, 60;

Óleos de **inverno**: SAE 0W, 5W, 10W, 15W, 20W, 25W;

Óleos multiviscosos (**inverno** e **verão**): SAE 20W-40, 20W-50, 15W-50

Baixas temp.

Altas temp.

SAE 30 - viscosidade centistokes (cSt) @ 100 °C $\rightarrow$ cSt 9.3 $> \nu >$ St 12.5.

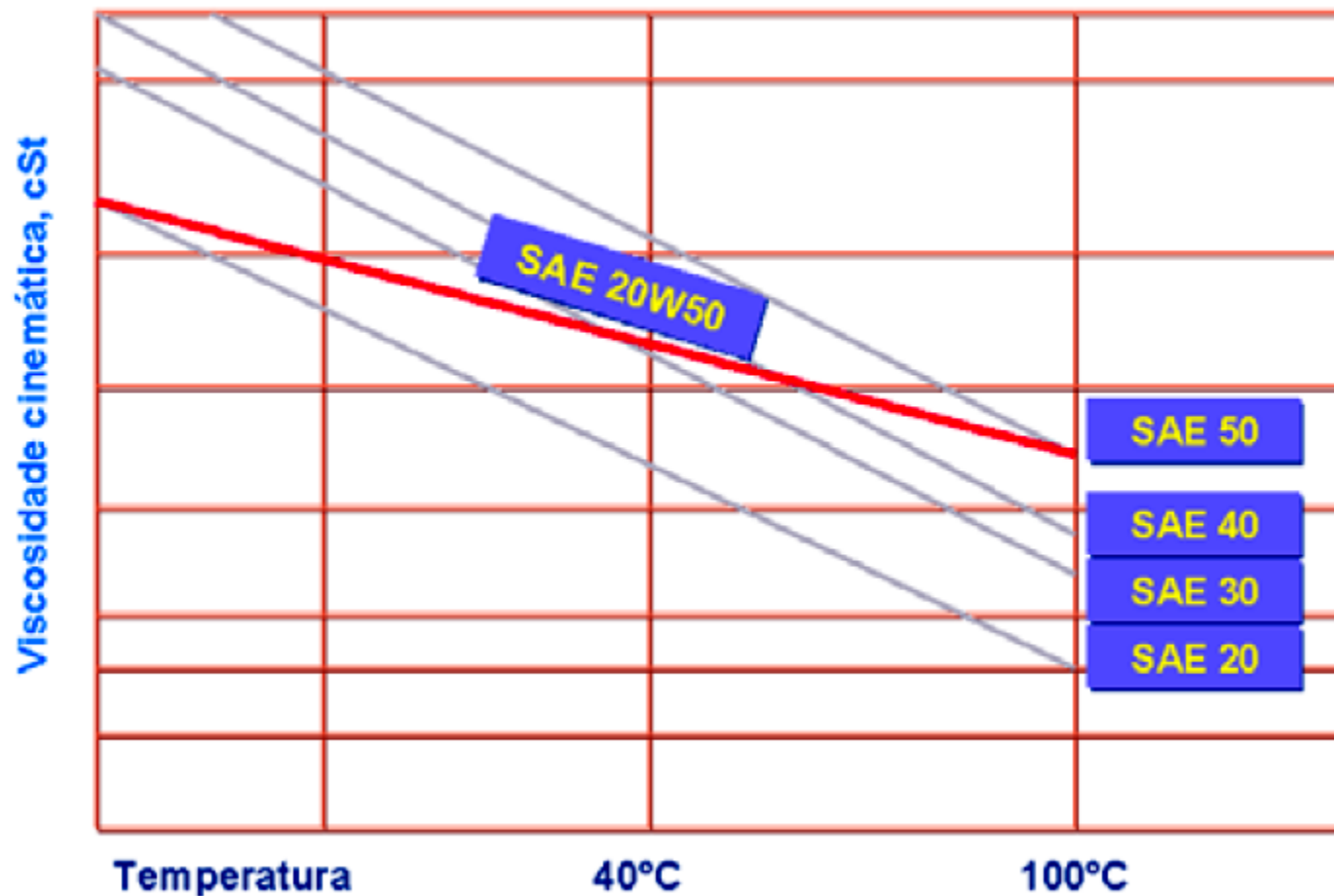
SAE 40 @ 100 °C $\rightarrow$ cSt 12,5 $> \nu >$ St 16,3

SAE 50 @ 100 °C $\rightarrow$ cSt 16,3 $> \nu >$ St 21,9

SAE 60 @ 100 °C $\rightarrow$ cSt 21,9 $> \nu >$ St 126,1

SAE Viscosity Grade	Low temp viscosities		High temp viscosities		
	Engine cranking Max. cPs at Temp (°C)	Max. Temp for pumping viscosity of 60,000 cP(°C)	Vis. at 100°C, cSt		High shear (cP) 150°C & 10 ⁶ S ⁻¹ Min
			Min	Max	
Winter Service					
0W	6200@ -35	-40	3.8	-	--
5W	6200@ -30	-35	3.8		-
10W	7000@ -25	-30	4.1		-
15W	7000@ -20	-25	5.6		-
20W	9500@ -15	-20	5.6		-
25W	13000@ -10	-15	9.3		-

Centipoise = Centistoke x Densidade



Fonte: lubrificação automotiva - Ipiranga

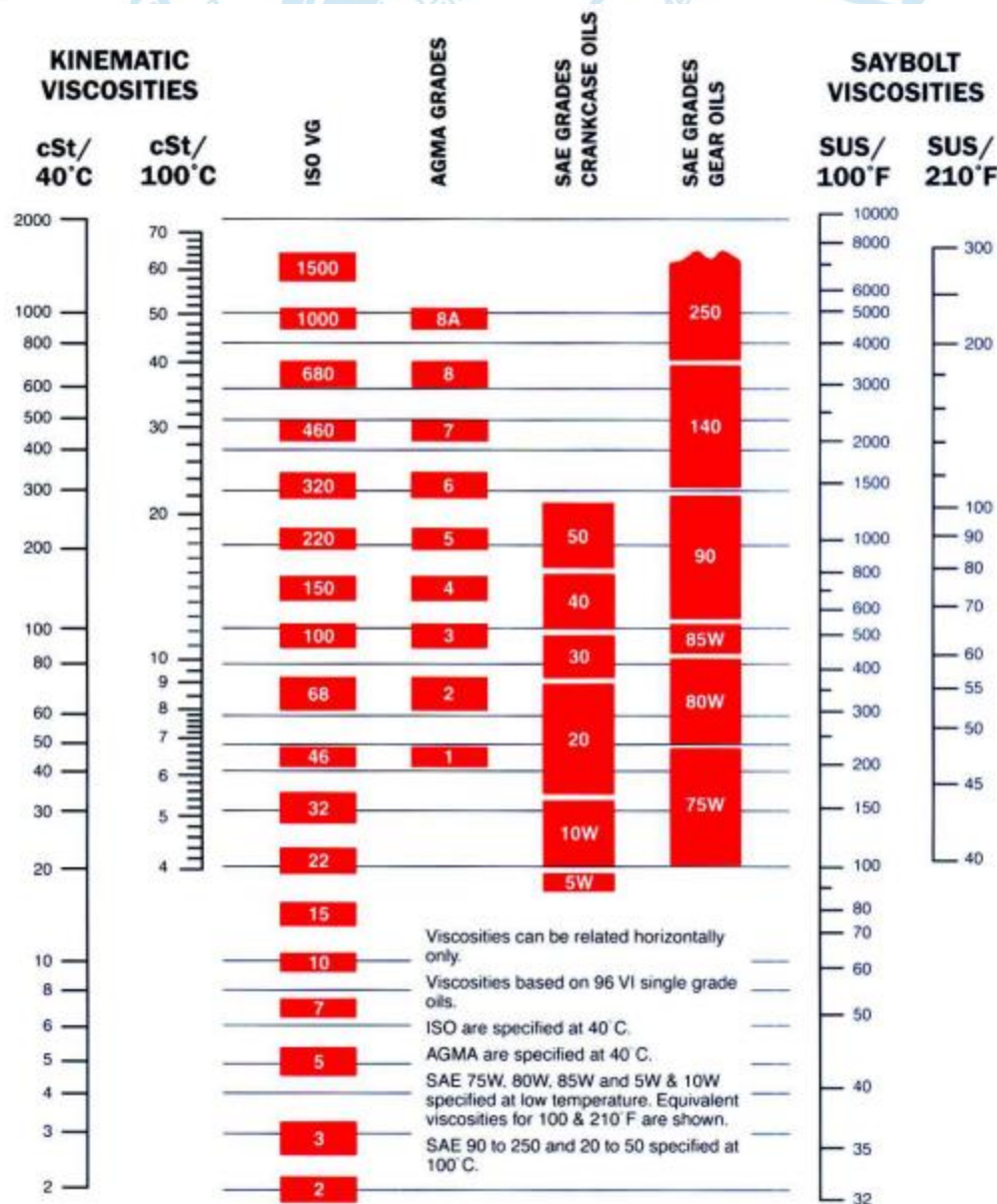
IV – Índice de viscosidade é o valor numérico que indica a variação da viscosidade em relação a variação da temperatura.

Classificado inicialmente de 0 a 100, pois o Zero era referente ao óleo aromático e 100 ao óleo parafínico, hoje ultrapassa a 250.

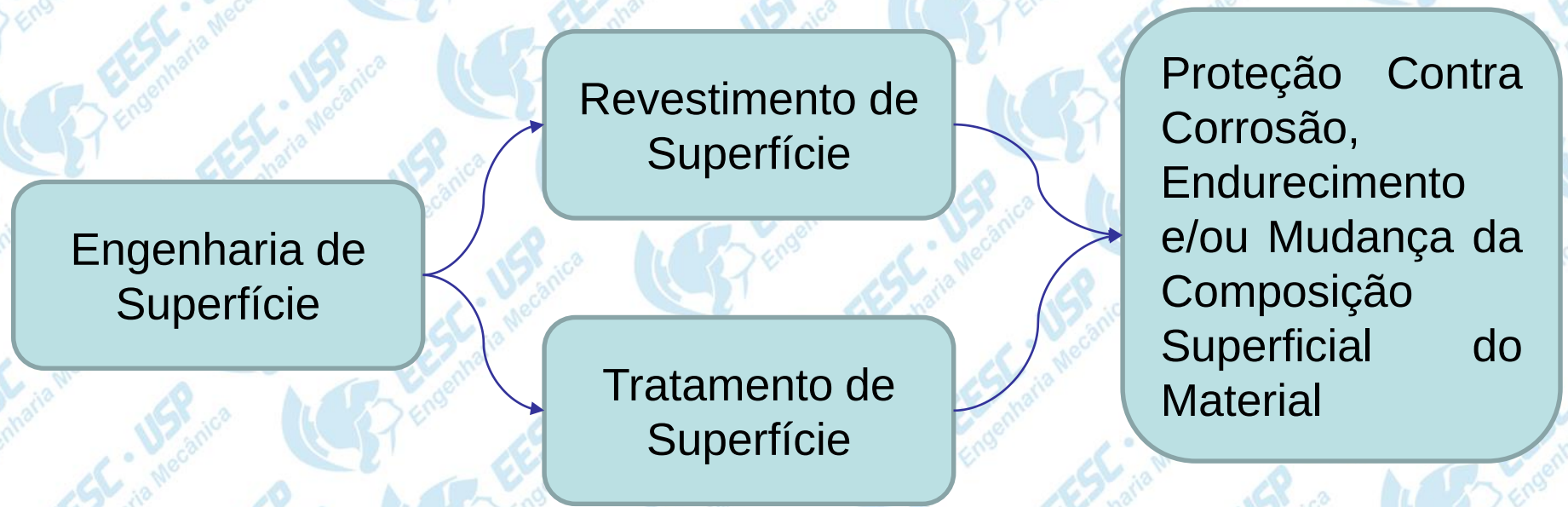
ISO 3448 – Kin Vis - CSt 40°C vs SUS 100°F (40°C)

	Midpoint	Minimum	Maximum	SUS 100°F
VG 2	2.2	1.98	2.42	
VG 3	3.2	2.88	3.52	
VG 5	4.6	4.14	5.06	
VG 7	6.8	6.12	7.48	
VG 10	10	9	11	60
VG 15	15	13.5	16.5	75
VG 22	22	19.8	24.2	105
VG 32	32	28.8	35.2	150
VG 46	46	41.4	50.6	215

	Midpoint	Minimum	Maximum	SUS 100°F
VG 68	68	61.2	74.8	315
VG 100	100	90	110	465
VG 150	150	135	165	700
VG 220	220	198	242	1000
VG 320	320	288	352	1500
VG 460	460	414	506	2150
VG 680	680	612	748	3150
VG 1000	1000	900	1100	4650
VG 1500	1500	1350	1650	7000



Engenharia de Superfícies



Engenharia de Superfícies

As propriedades superficiais em contato interferem diretamente na tribologia e portanto devem ser tema de estudo

- ✓ Ela deve reter o lubrificante?
- ✓ O atrito é uma consideração importante? Se sim qual é a causa ou requisito.
- ✓ O desgaste é um problema potencial?
- ✓ A tensão de compressão é uma preocupação relevante?
- ✓ Haverá remoção de material da superfície?
- ✓ Há necessidade de recobrimento resistente ao desgaste?
- ✓ O acabamento superficial afeta a tolerância e o ajuste?

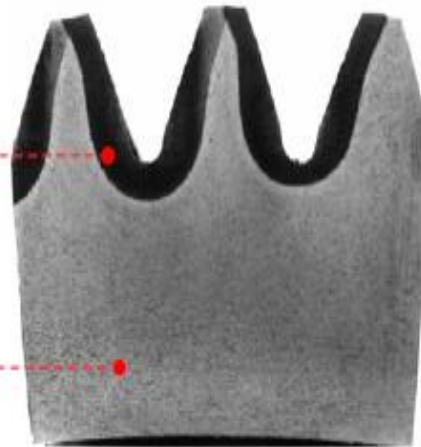
Endurecimento Superficial

- Aumenta a dureza (resistência ao risco e abrasão) em regiões específicas
- Permite manter as propriedades de ductilidade na região interior do metal

► Solicitação localizada na superfície: (abrasão por atrito) → alta dureza

+

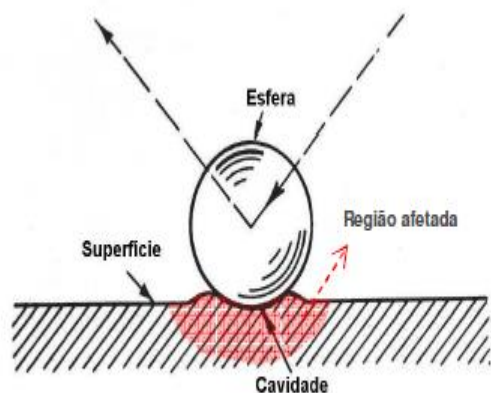
► Resto da peça: outras propriedades mais importantes → alta tenacidade



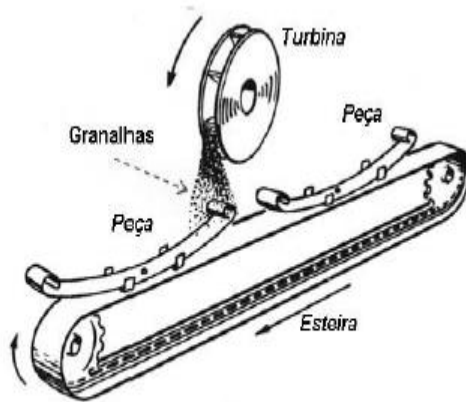
Endurecimento Superficial Mecânico

Shot peening

O impacto com o jateamento das esferas de aço gera uma deformação plástica localizada, na superfície. Portanto, gera um aumento da linhas de discordância e, então, aumenta a dureza da região do impacto. Cuidado para não haver abrasão.



Formação da cavidade devido ao impacto da esfera no jateamento

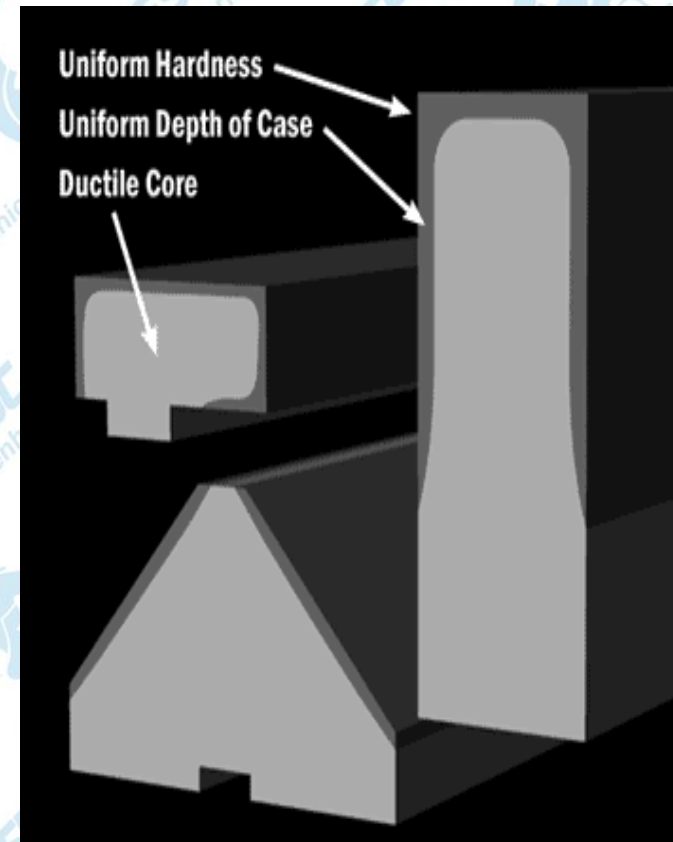


Esquema da realização do jateamento por granalhas (shot peening) –
Feixe molas carro (lamina)



Endurecimento Térmico: Têmpera

- Aquecimento rápido da superfície até a austenitização seguido de têmpera (água ou óleo) que acarreta na formação de martensita na região superficial, mantendo o interno do metal tenaz.
- Combinação perfeita de alta resistência na superfície com tenacidade no núcleo;
- Aplicável em peças de grande dimensões (2 – 3m) e/ou geometria complexa;
- Rápida de ser aplicada;
- Métodos: Chama, Indução e à laser.



Tratamentos Termoquímicos

São tratamentos que modificam a composição e/ou microestrutura da superfície do material

- Cementação ou Carbonetação
- Nitretação
- Carbonitretação
- Cianetação
- Boretação

Cementação

Objetivo: Aumentar o teor de carbono na superfície

- Consiste em aumentar a temperatura do material até que a microestrutura fique austenítica (a austenita permite um teor de carbono de até 0.8%) e então se coloca o material em uma região rica de carbono para que ocorra a difusão de carbono para a peça. O resfriamento rápido produz a martensita (hexagonal compacta).
- Quanto maior a exposição ao carbono, maior a camada de martensita.
- Após o procedimento de cementação, recomenda-se um revenimento, para reduzir a austenita retida e, assim, diminuir a dureza do núcleo. Produz um tamanho de grão mais refinado e homogêneo.

Nitretação

Tratamento químico que visa o endurecimento superficial pela difusão de nitrogênio e, conseqüente, formação de nitretos.

- A nitretação é realizada em temperaturas abaixo do campo austenítico e não é necessário um tratamento subsequente de têmpera para aumento de dureza (a camada nitretada já será muito dura).
- As peças são resfriadas ao ar.

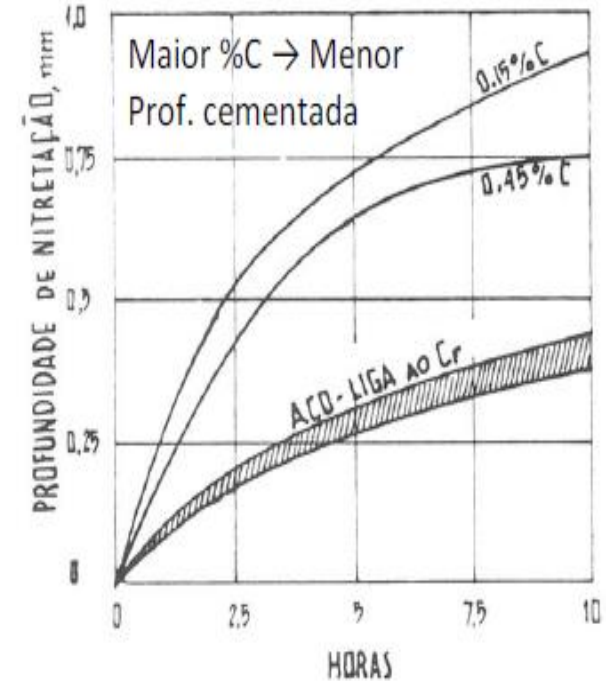


Fig. 96 – Profundidades de nitretação obtidas em alguns aços submetidos à nitretação líquida a 570°C

A nitretação promove um aumento de dimensão na peça. Caso desejado recomenda-se fazer têmpera antes da nitretação. Usinagens posteriores não são permitidas após o processo de nitretação.

Carbonitretação

Também conhecida como Nitrocarbonetação ou Cianetação Seca, ocorre a difusão simultânea de C e N para a superfície do metal. (variante de baixo custo da nitretação gasosa)

O gás admitido no forno consiste de misturas com diferentes proporções de amônia (NH_3) e gás natural ou metanol (C).

- A profundidade de camada endurecida varia entre 0,07 e 0,7 mm
- As aplicações da nitrocarbonetação são mais limitadas que os processos de cementação e/ou nitretação.
- Normalmente a nitrocarbonetação é aplicada em componentes de baixa responsabilidade submetidos a situações de desgaste leves.
- Deve-se posteriormente temperar e revenir as peças

Cianetação

Há um enriquecimento superficial de carbono e nitrogênio, simultaneamente, em temperaturas ao redor de 800 °C, ou seja, acima da linha de austenitização

- Espessura de 0,1 – 0,3 mm de camada formada
- É aplicado em aços-carbono com baixo teor de Carbono
- O resfriamento é feito em água

Vantagens em relação a cementação:

- Maior rapidez;
- Maior resistência ao desgaste e a corrosão;
- Menor temperatura de processo

Boretação

Na Boretação ocorre a difusão de átomos de boro para o interior da superfície formando um complexo de boretos (Fe_2B). O boro preenche os espaços no substrato criando uma nova liga de boro e ferro.

Por se tratar de um verdadeiro processo de difusão não há interferência mecânica entre a liga e o substrato. Consiste na introdução de Boro por difusão para que possa ser aumentada a rigidez superficial.

Aços boretados são extremamente resistentes à abrasão por conta de sua, extremamente dura será a superfície. Ocorre em meio sólido (granulado de B_4C).

Além da alta resistência à abrasão, a camada de boreto exibe a importante propriedade de ter muito pouca tendência à solda fria. Essa propriedade é extremamente importante para reduzir desgastes por aderência.

Tratamento Termoquímico

Cementação	Nitretação	Cianetação	Carbonitretação	Boretção
↓	↓	↓	↓	↓
Adição de C	Adição de N	Adição de C e N	Adição de C e N	Adição de B
↓	↓	↓	↓	↓
• Sólida • Líquida • Gasosa • Plasma	• Líquida • Gasosa • Plasma	• Líquida	• Gasosa	• Sólida
↓	↓	↓	↓	↓
• $T_{Proc} = 850-950^{\circ}C$ • Seguido de tempera • Dureza: $\sim 65 H_{RC}$ • Camada: até 10 mm	• $T_{Proc} = 500-600^{\circ}C$ • Dureza: $\sim 1000-1100 H_V$ • Camada: até 1 mm	• $T_{Proc} = 650-850^{\circ}C$ • Seguido de tempera • Camada: de 0,1 a 0,3 mm	• $T_{Proc} = 700-900^{\circ}C$ • Seguido de tempera • Camada: até 7 mm	• $T_{Proc} = 900^{\circ}C$ • Dureza: $\sim 700-2000 H_V$ • Camada: 4 h produz 0,1 mm

Tribologia na Engenharia

PIONEIROS - MANCAIS

VAUGHAN - 1794 - 1ª PATENTE DE UM MANCAL DE ESFERAS.

PETROFF - 1883 - NATUREZA DO ATRITO EM MANCAIS RADIAIS LUBRIFICADOS.

REYNOLDS - 1886 - EXPLICOU O MECANISMO DA LUBRIFICAÇÃO HIDRODINÂMICA.

HIRN - 1854 - LUBRIFICAÇÃO COM AR.

KINGSBURY - MICHEL - 1910 - MANCAL DE SAPATA ARTICULADA.

TAYLOR - 1923 - ESCOAMENTO SUPERLAMINAR.

NO BRASIL - **LAMAFE - SEM - EESC - USP**

PESQUISAS EM MANCAIS AEROSTÁTICOS DESDE **1973**.

ECONOMIA

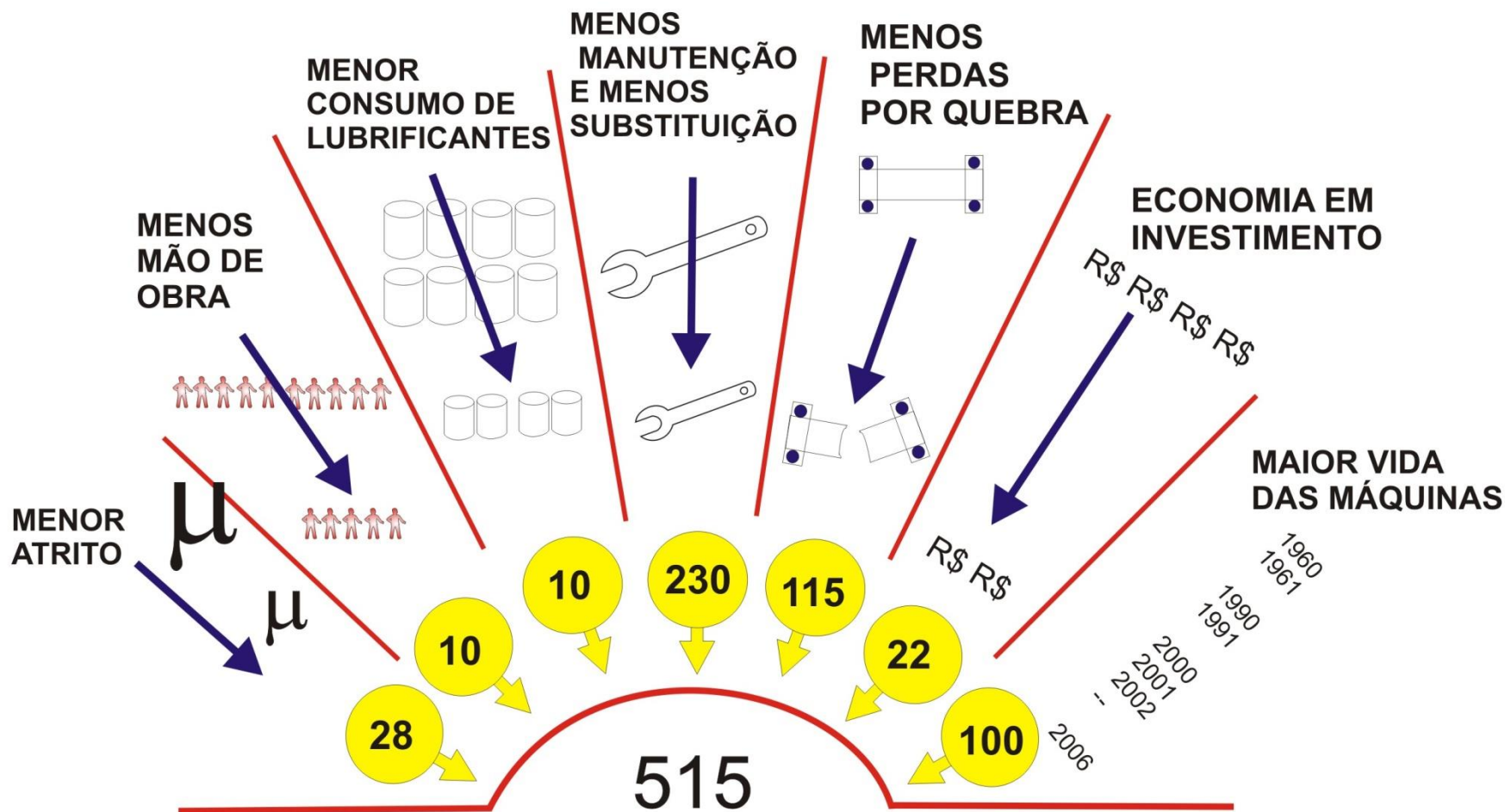
KLOTH - 1930 - 10.000 TONELADAS DE AÇO CONVERTIDAS EM PÓ NAS MÁQUINAS AGRÍCOLAS POR ANO.

WAHL - 1948 - 30.000 TONELADAS/ANO DE AÇO E FERRO FUNDIDO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO.

VOGELPOHL - 1951 - ESTIMOU QUE 1/3 A 1/2 DA PRODUÇÃO MUNDIAL DE ENERGIA ERA CONSUMIDA NA FORMA DE ATRITO.

NOS EUA - 1960 - US\$ 100 BILHÕES/ ANO DE PERDAS POR ATRITO SENDO (20 MILHÕES EM MATERIAIS).

JOST - 1960 - 515 MILHÕES DE LIBRAS EM PERDAS CAUSADAS POR PRÁTICAS TRIBOLÓGICAS INDEVIDAS



APLICAÇÕES TÍPICAS DE TRIBOLOGIA LUBRIFICAÇÃO-ATRITO-DESGASTE

PAR TRIBOLÓGICO METAL - METAL

MÁQUINAS ALTERNATIVAS.

PROJETO DE FERRAMENTAS - OPERAÇÕES DE MANUFATURA.

TREFILAÇÃO - MATRIZES - EXTRUSÃO.

CONTATOS: ENGRENAGENS - CAMES - MANCAIS DE ROLAMENTO.

APLICAÇÕES TÍPICAS DE TRIBOLOGIA LUBRIFICAÇÃO-ATRITO-DESGASTE

PAR TRIBOLÓGICO ELASTÔMERO - SUPERFÍCIE RÍGIDA

PNEUS - ESTRADA.

RETENTORES EM MÁQUINAS.

CORREIAS EM POLIAS.

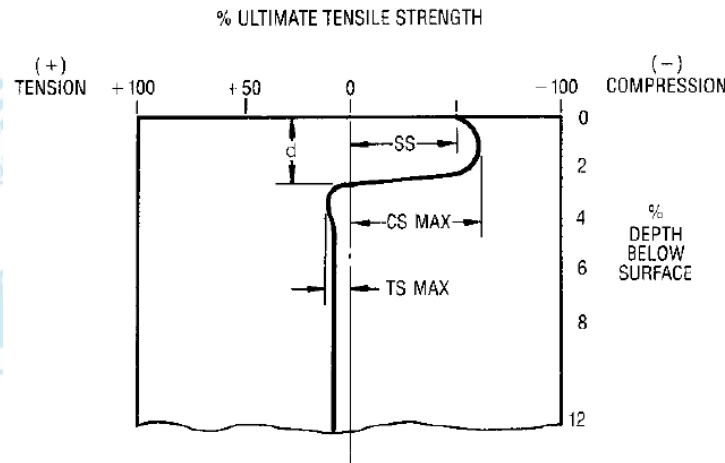
LIMPADORES DE PARA BRISAS.

FREIOS.

CONSTRUÇÃO CIVIL: AMORTECIMENTO DE VIGAS.

Questionamentos

4. Com age um lubrificante?
5. Porque fazer trocas de lubrificante?
6. Quais são os aditivos de um lubrificante?
7. Como é constituída uma graxa?
8. Observe a figura abaixo sobre o *shotpeenig* e explique seu beneficio sobre a ocorrência da fadiga.



9. O que são lubrificantes e discuta os tipos de lubrificação?
10. Discuta sobre as funções da lubrificação, seus tipos e propriedades?
11. O que são aditivos de lubrificantes?
12. O que são mancais antiatrito? Vantagens e limitações
13. Explique em detalhe o mancal hidrodinâmico e escreva a equação de distribuição de pressão;
14. Você considera importante proteger as superfícies internas de um redutor (motor) contra corrosão;
15. Porque a troca de óleo é importante para manter as boas condições operacionais de um motor.
16. Porque a eficiência de um óleo diminui com o tempo.

Estágio na Solfer Brasil Ltda

sueli@solferbrasil.com.br

tel. 16 3307 7160

16 99752 1390

Aula Prática 07

Aula 09 - Prática