PROJETO MECÂNICO (SEM 0347)

Notas de Aulas v.2020

Aula 11 – Tribologia – Lubrificação/Eng. de Superfícies

Professores: Benedito de Moraes Purquerio
Carlos Alberto Fortulan

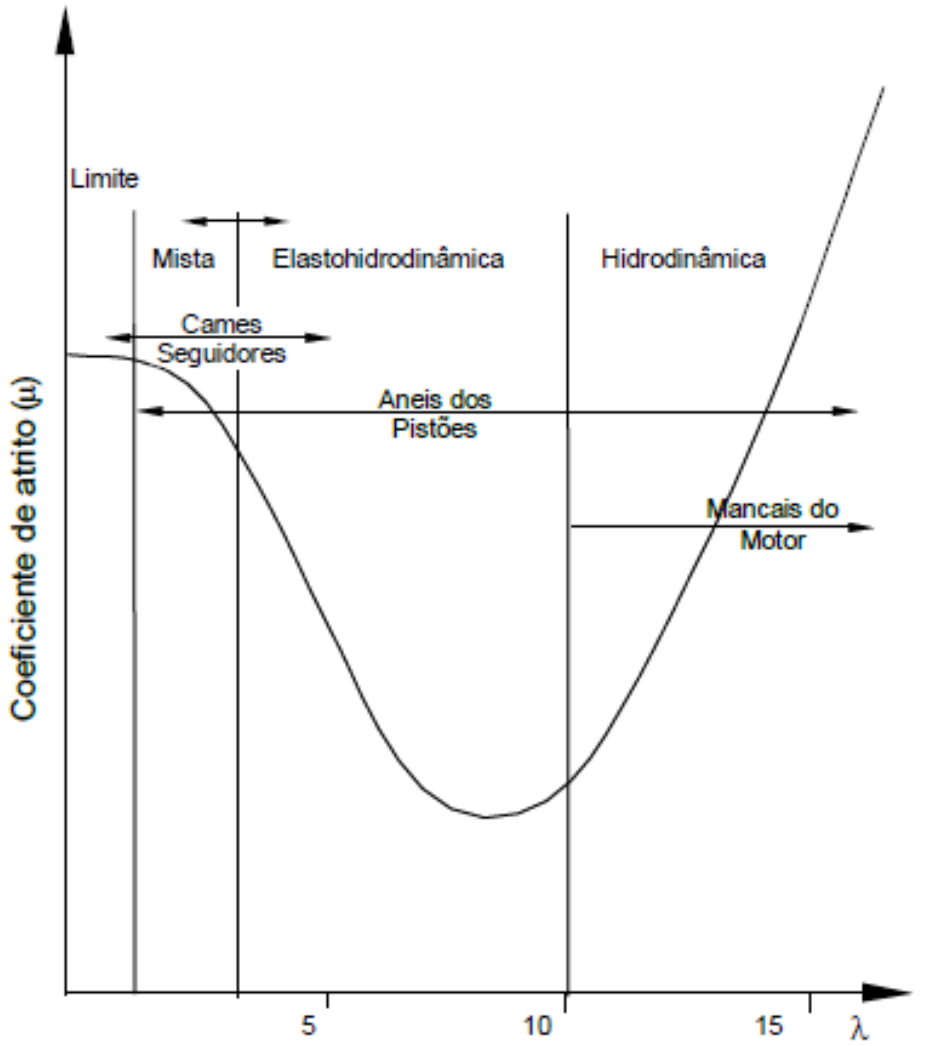
Lubrificação

"**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."

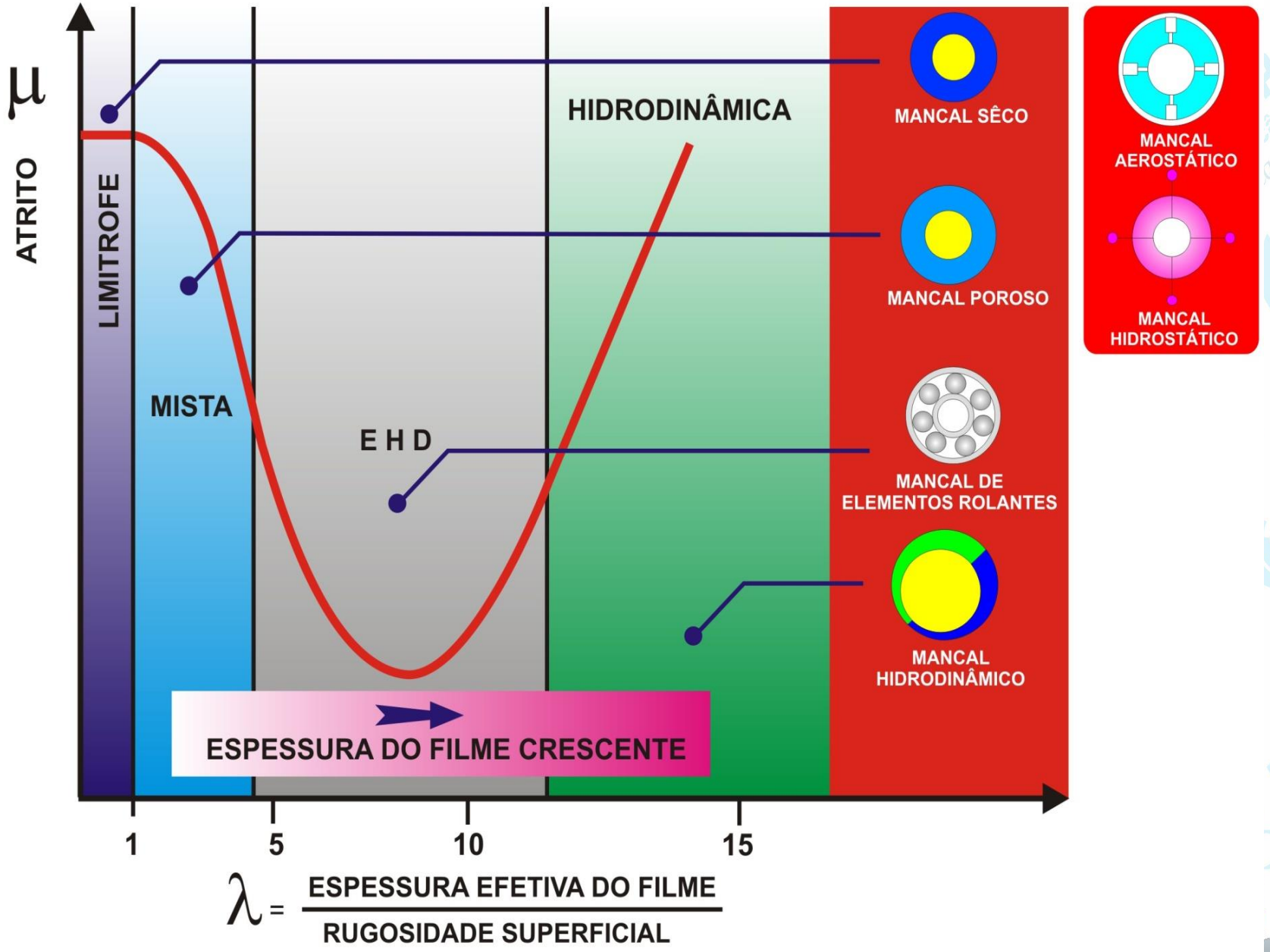
Lubrificantes
Lubrificação → Propriedades, comportamento operacional, Materiais, controle qualidade, Manuseio, administração, organização

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


μ
ATRITO
LIMITROFE
MISTA
E H D
HIDRODINÂMICA
MANCAL SÊCO
MANCAL POROSO
MANCAL DE ELEMENTOS ROLANTES
MANCAL HIDRODINÂMICO
MANCAL AEROSTÁTICO
MANCAL HIDROSTÁTICO
ESPESSURA DO FILME CRESCENTE
1
5
10
15
λ = ESPESSURA EFETIVA DO FILME / RUGOSIDADE SUPERFICIAL

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.

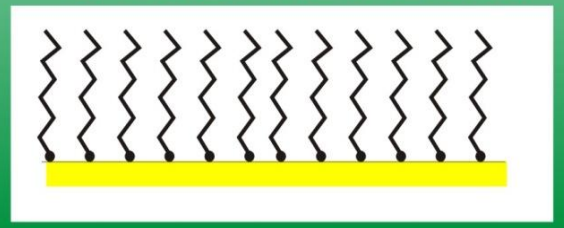
LUBRIFICAÇÃO LIMÍTROFE

Formação

Óleos lubrificantes + gorduras animal ou vegetal → ácidos adiposos

CAMADAS ADSORVIDAS QUIMICAMENTE

SABÕES METÁLICOS

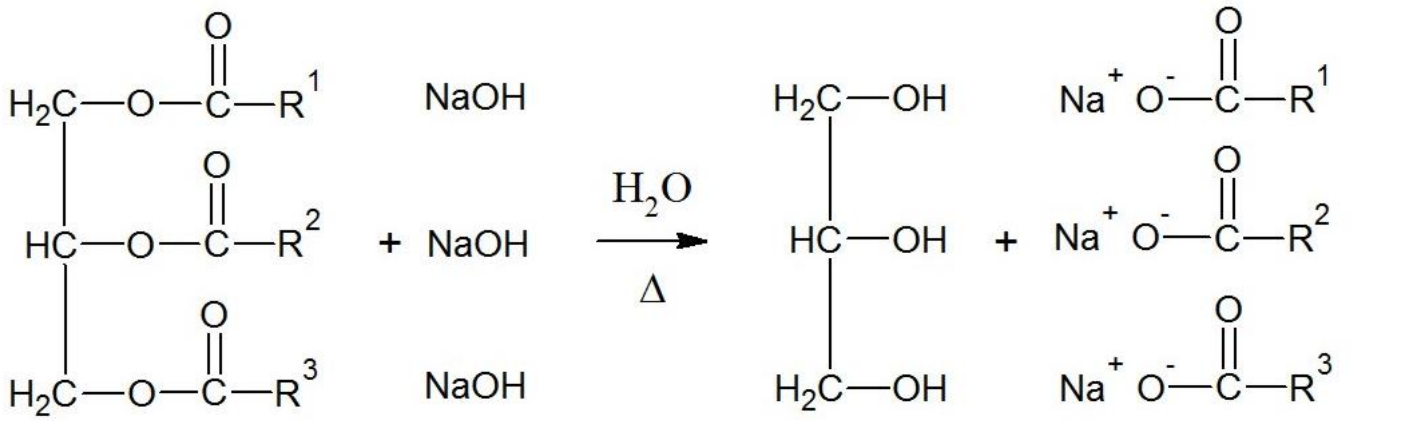


Ácidos esteárico, oleico, láurico.

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

Atrito Reduz μ de até 50% (μ ~ 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

Superficíes sêcas e limpas quimicamente → $\mu \sim 1{,}0$

O_2 → $\mu \sim 0{,}5$

Óleo mineral → $\mu \sim 0{,}15$

Lube limítrofe → $\mu \sim 0{,}08$

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 $\eta_{atmosférica}$

Lubrificação com Filme de fluído



É a condição em que um filme de lubrificante esteja 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

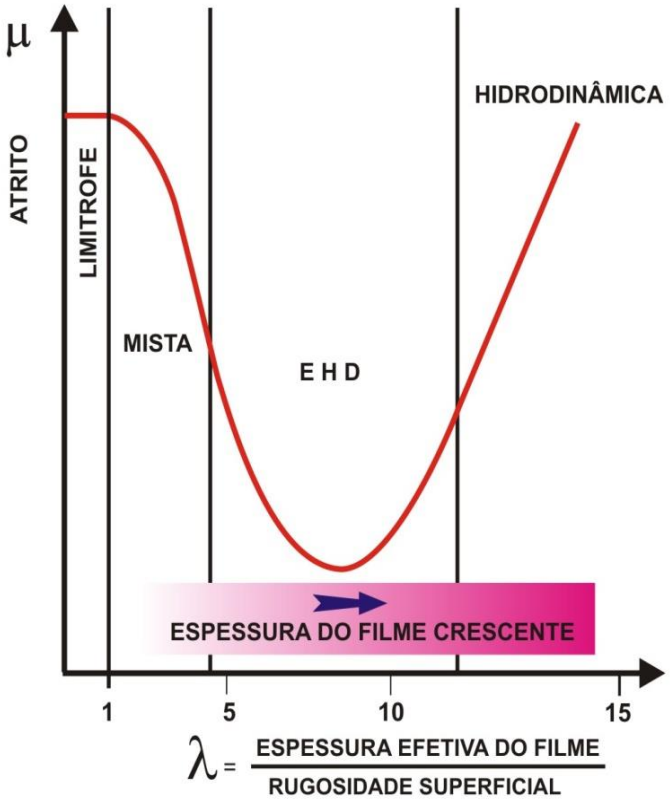
AMACIAMENTO

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

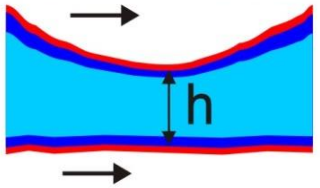
REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO E A ESCALA DE DIMENSÕES TÍPICAS DE QUALIDADE SUPERFICIAL



TRANSIÇÃO ENTRE OS REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO



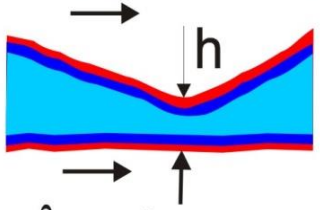
HIDRODINÂMICA



$\lambda = 10$ a 100

$h = 10^{-6}$ m

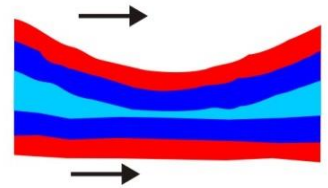
ELASTOHIDRODINÂMICA



$\lambda = 4$ a 10

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

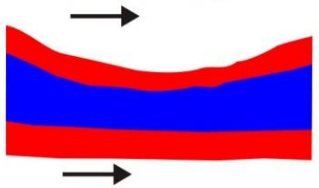
MISTA



$\lambda = 1$ a 5

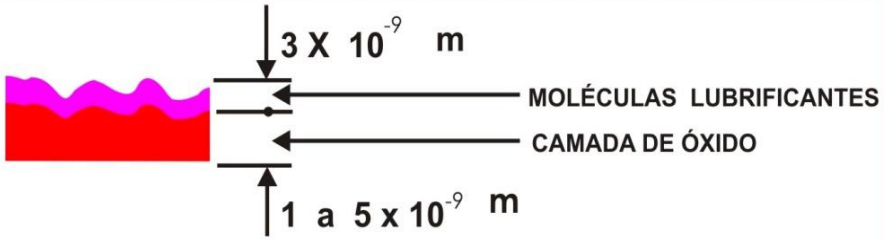
$h = 10^{-8}$ A 10^{-6} m

LIMÍTROFE



$\lambda < 1$

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



DIMENSÕES TÍPICAS DAS PELÍCULAS SUPERFICIAIS

Questionamentos:

11.01 – Em pista molhada qual pneu freia mais, o careca ou o riscado? Porque?

Lubrificantes

***Lubrificante**, o que é?*

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

LUBRIFICAÇÃO ⟷ LUBRIFICANTE

Redução da resistência ao atrito e desgaste ou outras formas de deterioriização 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.

O que se espera de um lubrificante?

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

CLASSES DE LUBRIFICANTES

SÓLIDO	SEMI-SÓLIDO	LÍQUIDO	GASOSO
GRAFITE MoS2 MATERIAIS SECOS	GRAXAS	ANIMAL VEGETAL MINERAL SINTÉTICO	AR He N

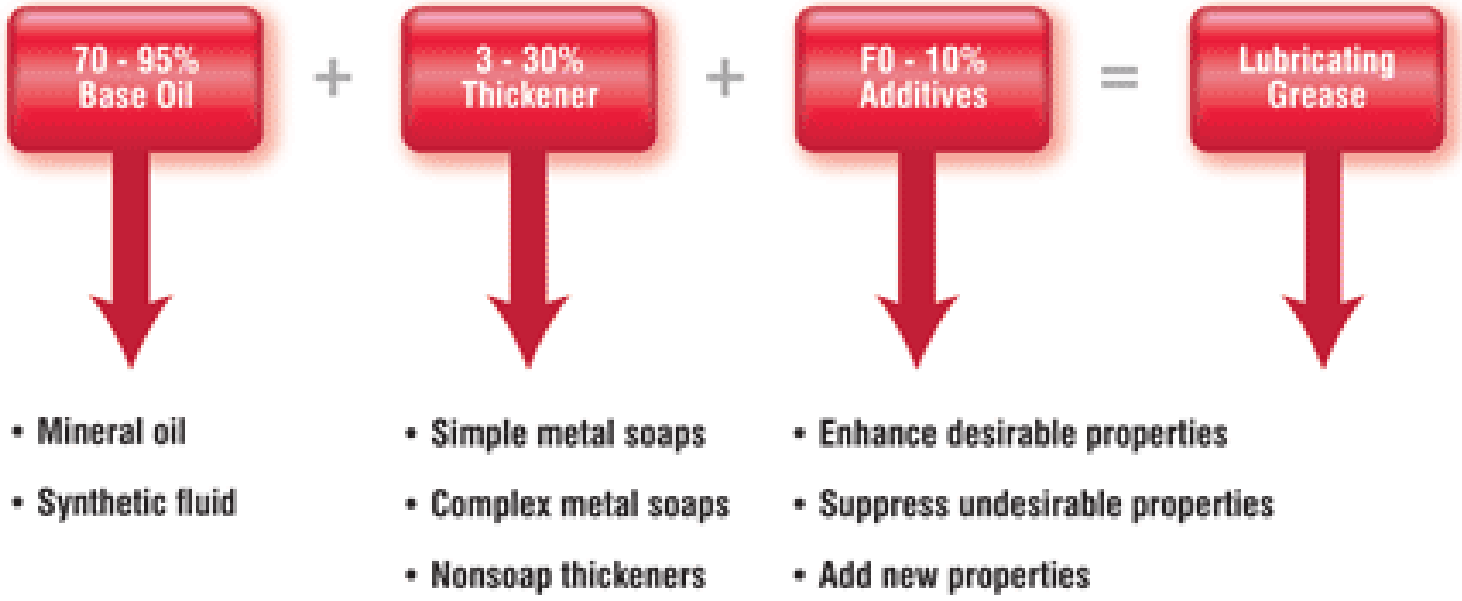
Óleos

- 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;



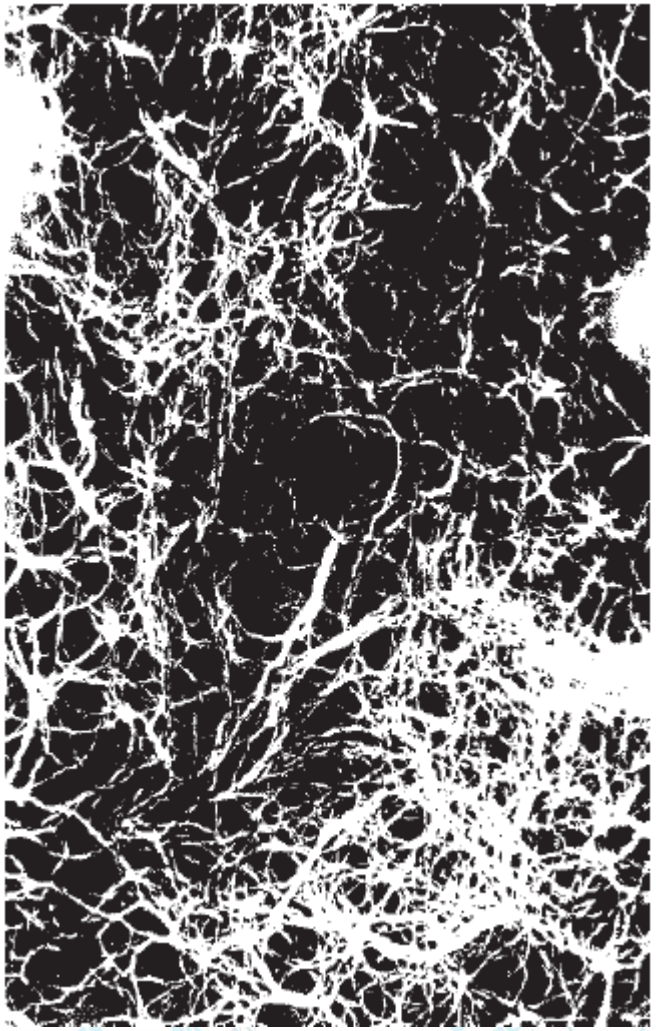
- Óleo Base (velocidade, temp.; compatibilidade com materiais).

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:

(11.02) - pode causar um aumento do desgaste enquanto diminui o coeficiente de atrito?

(11.03) - 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.

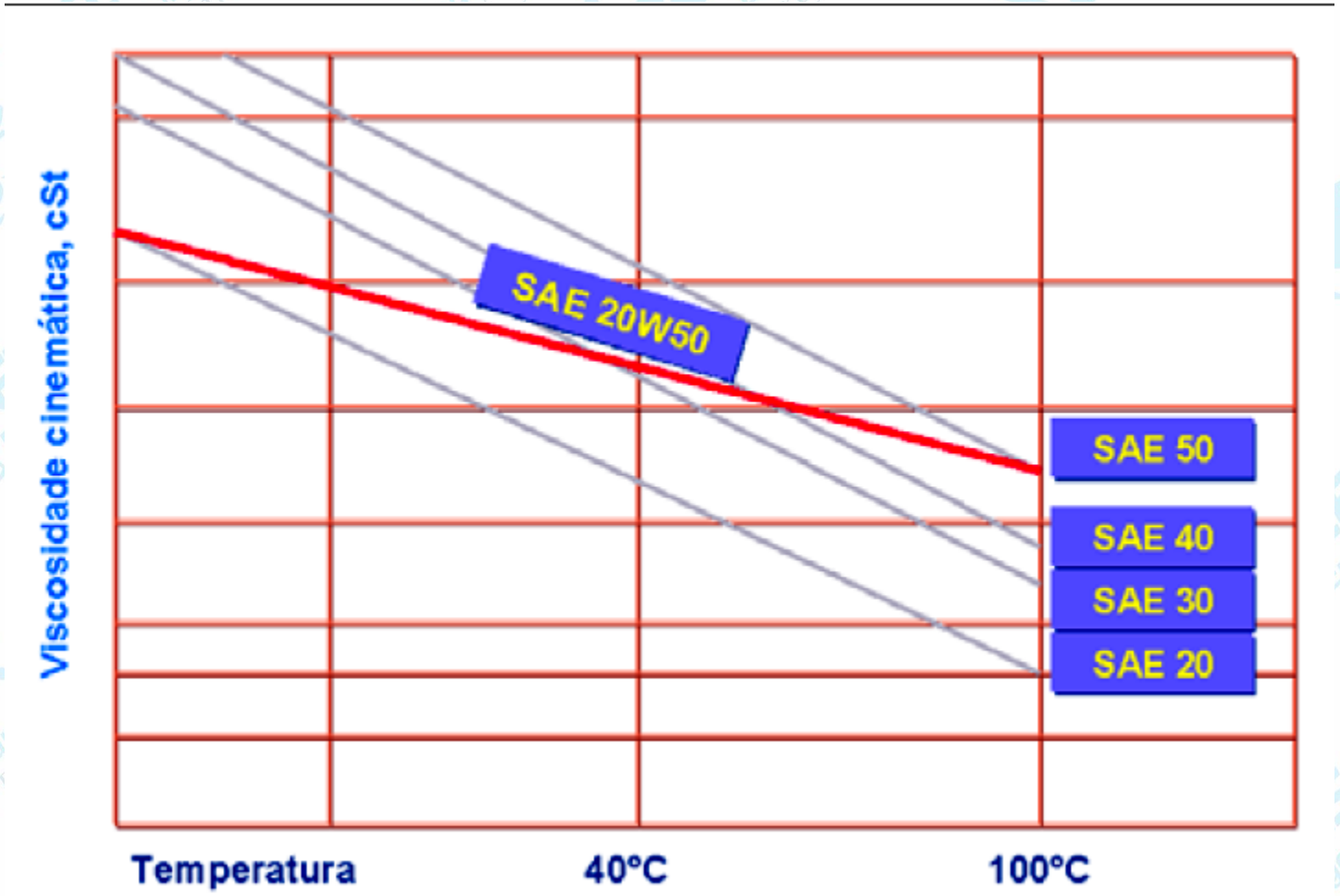
Baixas temp.

Altas temp.

SAE 30 - viscosidade centistokes (cSt) @ 100 ºC → cSt 9.3 > υ > St 12.5.
SAE 40 @ 100 ºC → cSt 12,5 > υ > St 16,3
SAE 50 @ 100 ºC → cSt 16,3 > υ > St 21,9
SAE 60 @ 100 ºC → cSt 21,9 > υ > St 126,1

	Low temp viscosities		High temp viscosities		
SAE Viscosity Grade	Engine cranking Max. cPs at Temp (°C)	Max. Temp for pumping viscosity of 60,000 cP(°C)	Vis. at 100°C, cSt Min	Max	High shear (cP) 150°C & 10_6 S^{-1} Min
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

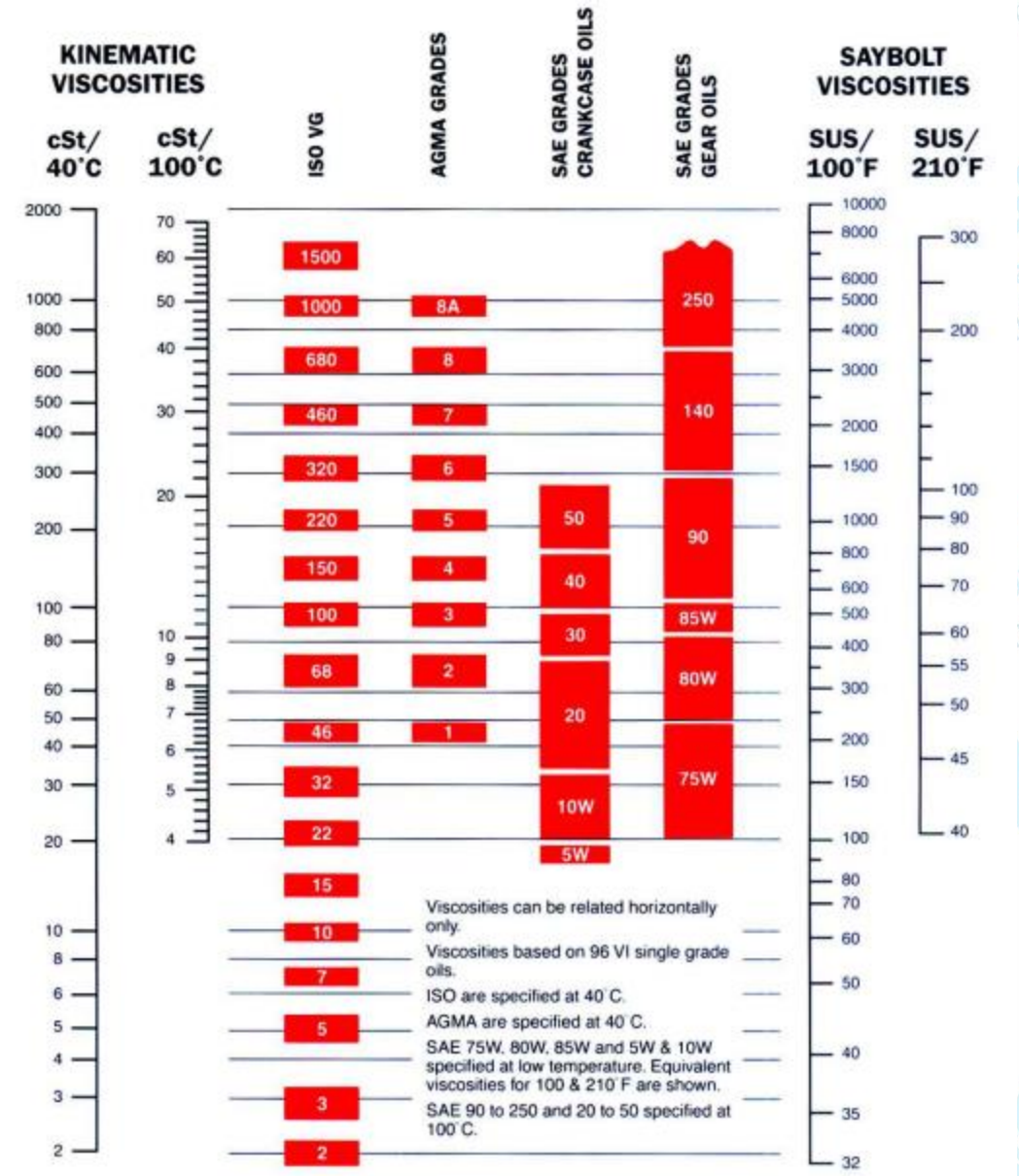
IV – Índice de viscosidade é o valor numérico que indica a variação da viscosidade em relação a variação da temperatura.

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

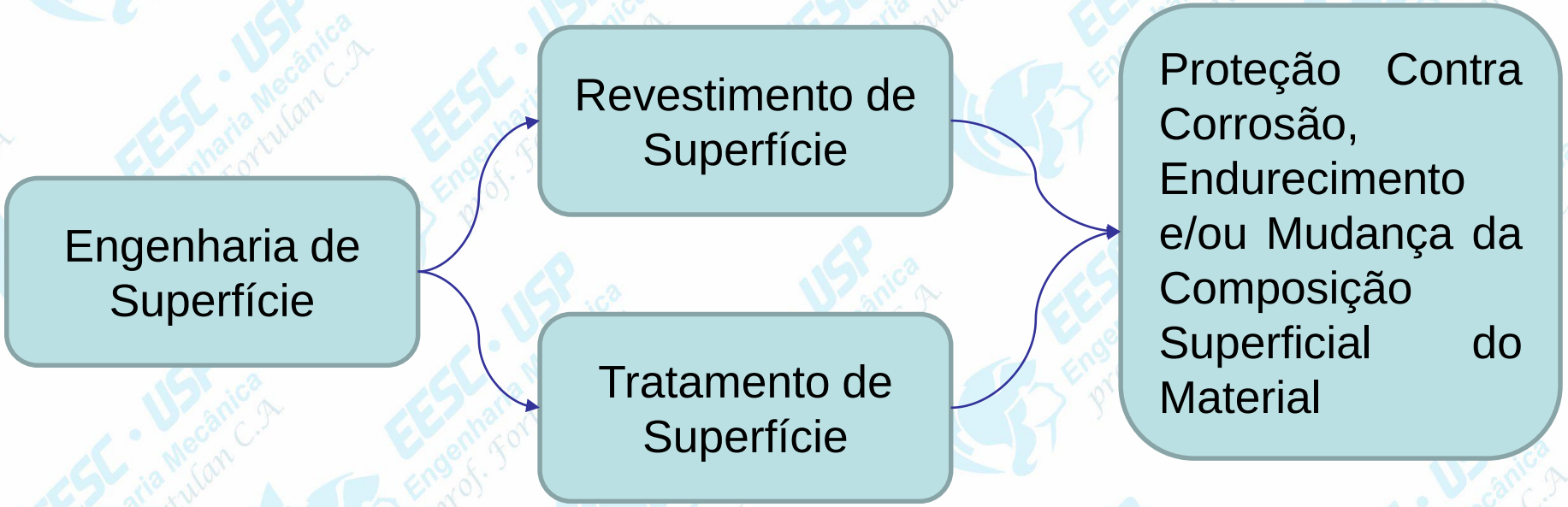
ISO 3448 – Kin Vis - CSt 40˚C vs SUS 100˚F (40˚C)

	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


KINEMATIC VISCOSITIES
cSt/ 40˚C
cSt/ 100˚C
ISO VG
AGMA GRADES
SAE GRADES CRANKCASE OILS
SAE GRADES GEAR OILS
SAYBOLT VISCOSITIES
SUS/ 100˚F
SUS/ 210˚F
2000
1000
800
600
500
400
300
200
100
80
60
50
40
30
20
10
8
6
5
4
3
2
70
60
50
40
30
20
10
9
8
7
6
5
4
1500
1000
680
460
320
220
150
100
68
46
32
22
15
10
7
5
3
2
8A
8
7
6
5
4
3
2
1
50
40
30
20
10W
5W
250
140
90
85W
80W
75W
10000
8000
6000
5000
4000
3000
2000
1500
1000
800
600
500
400
300
200
150
100
80
70
60
50
40
35
32
300
200
100
90
80
70
60
55
50
45
40
Viscosities can be related horizontally only.
Viscosities based on 96 VI single grade oils.
ISO are specified at 40˚C.
AGMA are specified at 40˚C.
SAE 75W, 80W, 85W and 5W & 10W specified at low temperature. Equivalent viscosities for 100 & 210˚F are shown.
SAE 90 to 250 and 20 to 50 specified at 100˚C.

Engenharia de Superfícies


Engenharia de Superfície
Revestimento de Superfície
Tratamento de Superfície
Proteção Contra Corrosão, Endurecimento e/ou Mudança da Composição Superficial do Material

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?

Revestimento de Superfícies

- **Clássicas ou tradicionais:**
  - Pintura;
  - Electroplating;
  - Galvanização;
  - Spray térmico ou plasma.

- **Avançadas**

✓ Deposição Física ao Vapor (PVD);
✓ Deposição Química ao Vapor (CVD);
✓ Implantação de íon;
✓ Deposição assistida por feixe de íons (IBAD)
✓ Misto de feixe de íons;
✓ Tratamento a laser.

Tratamento de Superfícies

- ✓Aumento da Dureza;
- ✓Aumento da em regiões específicas com manutenção da tenacidade e ductilidade nas demais;
- ✓Alteração das propriedades físicas superficiais;

Endurecimento Superficial

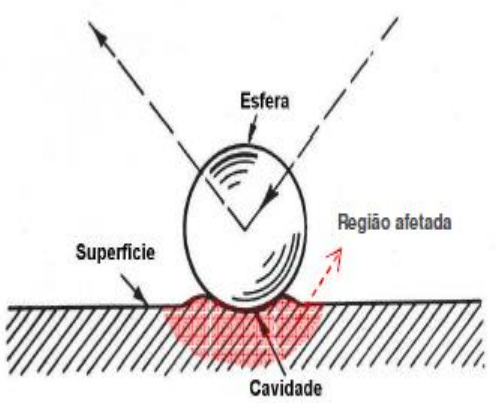
- Aumenta a dureza (resistência ao risco e abrasão) em regiões específicas;
- Permite manter as propriedades de ductilidade na região interior do metal.



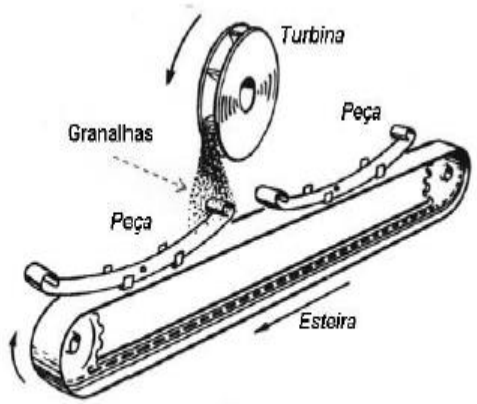
Endurecimento Superficial Mecânico

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

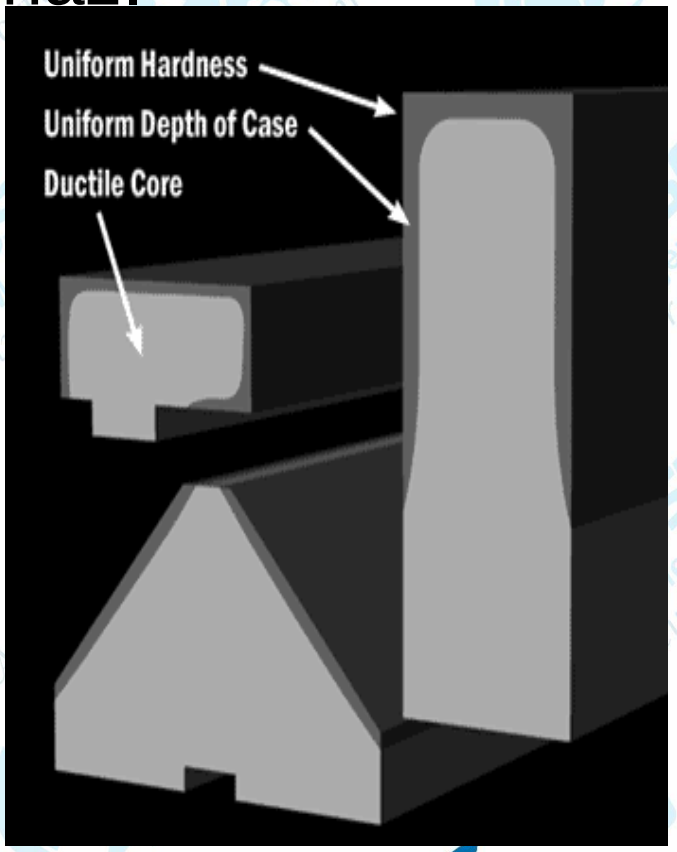


Esquema da realização do jateamento por granalhas (shot peening) – Feixe molas carro (lamina)



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

- Aumentar a temperatura do material (inserido uma região rica em carbono) até o campo austenítico para promover a difusão de carbono para a peça (que permite um teor de carbono de até 0.8%). 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, consequente, formação de nitretos.

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

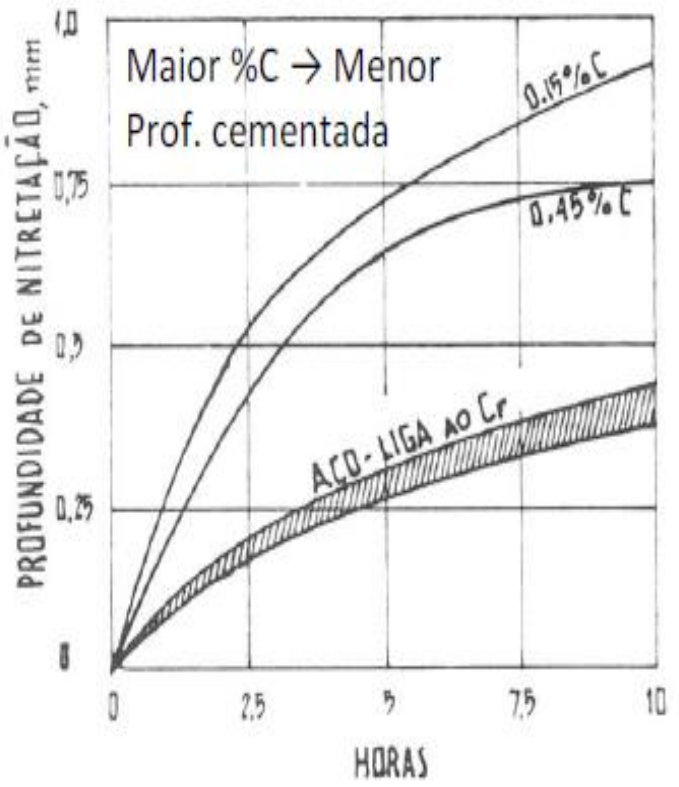


Fig. 96 – Profundidades de nitretação obtidas em alguns aços submetidos à nitretação líquida a 570ºC

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

Difusão de átomos de boro para o interior da superfície formando um complexo de boretos (Fe_2B – como uma nova liga) aumentando a rigidez e extrema dureza superficial (granulado de B_4C em meio sólido).

Por se tratar de um verdadeiro processo de difusão não há interferência mecânica entre a liga e o substrato.

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	Boretação
↓	↓	↓	↓	↓
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}= 850-950ºC • Seguido de tempera • Dureza:~65 H_{RC} • Camada: até 10 mm	• T_{Proc}= 500-600ºC • Dureza:~1000-1100 H_V • Camada: até 1 mm	• T_{Proc}= 650-850ºC • Seguido de tempera • Camada: de 0,1 a 0,3 mm	• T_{Proc}= 700-900 °C • Seguido de tempera • Camada:até 7 mm	• T_{Proc}= 900ºC • Dureza: ~700-2000$_{HV}$ • 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

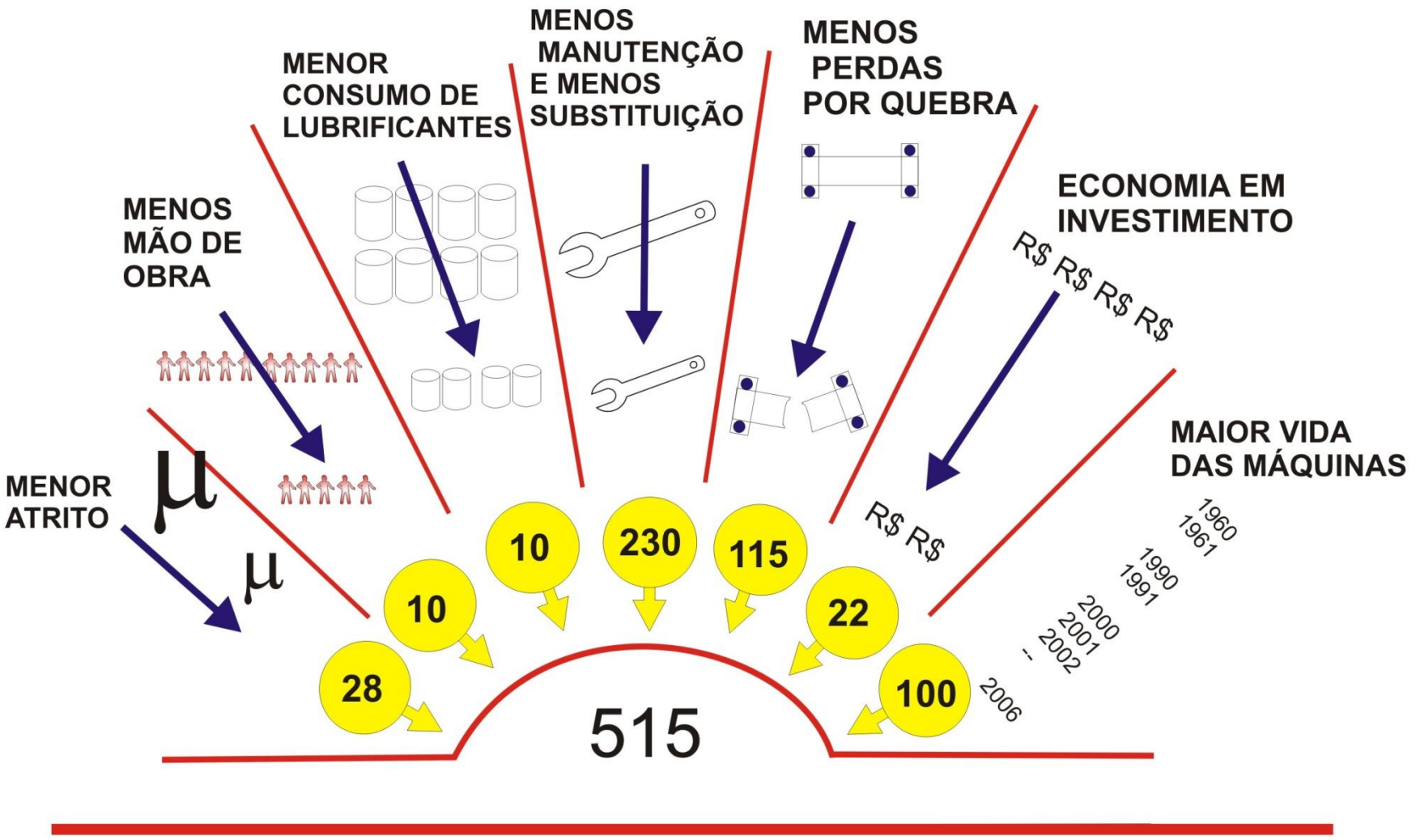
KLOTH - 1930 - 10.000 TONELADAS DE AÇO CONVERTIDAS EM PÓ NAS MÁQUINAS AGRÍCOLAS POR ANO.

WAHL - 1948 - 30.000 TONELADAS/ANO DE AÇO E FERRO FUNDIDO NA INDUSTRIA 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


MENOS MÃO DE OBRA
MENOR CONSUMO DE LUBRIFICANTES
MENOS MANUTENÇÃO E MENOS SUBSTITUIÇÃO
MENOS PERDAS POR QUEBRA
ECONOMIA EM INVESTIMENTO
R$ R$ R$ R$
MAIOR VIDA DAS MÁQUINAS
1960
1961
1990
1991
2000
2001
2002
2006
MENOR ATRITO
μ
μ
R$ R$
10
230
115
10
22
28
100
515

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 RIGIDA

- PNEUS - ESTRADA.
- RETENTORES EM MÁQUINAS.
- CORREIAS EM POLIAS.
- LIMPADORES DE PARA BRISAS.
- FREIOS.
- CONSTRUÇÃO CIVIL: AMORTECIMENTO DE VIGAS.

Questionamentos

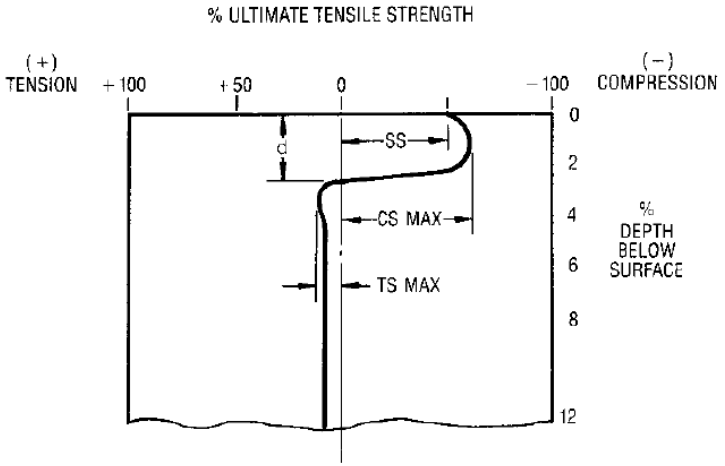
11.4. Com age um lubrificante?

11.5. Porque fazer trocas de lubrificante?

11.6. Quais são os aditivos de um lubrificante?

11.7. Como é constituída uma graxa?

11.8. Observe a figura abaixo sobre o *shotpeenig* e explique seu beneficio sobre a ocorrência da fadiga.



11.9. O que são lubrificantes e discuta os tipos de lubrificação?

11.10. Discuta sobre as funções da lubrificação, seus tipos e propriedades?

11.11. O que são aditivos de lubrificantes?

11.12. O que são mancais antiatrito? Vantagens e limitações

11.13. Explique em detalhe o mancal hidrodinâmico e escreva a equação de distribuição de pressão;

11.14. Você considera importante proteger as superfícies internas de um redutor (motor) contra corrosão;

11.15. Porque a troca de óleo é importante para manter as boas condições operacionais de um motor.

11.16. Porque a eficiência de um óleo diminui com o tempo.

Aula Prática 07

Aula 09 - Prática