



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

EM608 – Elementos de Máquinas
ES690 – Sistemas Mecânicos

ENGRENAGENS CILINDRICAS DE DENTES RETOS

***"Limites de Resistência à Fadiga e
Coeficientes de Segurança"***

Prof. Gregory Bregion Daniel gbdaniel@fem.unicamp.br

Prof.^a Katia Lucchesi Cavalca katia@fem.unicamp.br

Campinas, 2º semestre 2020



RESISTÊNCIA À FADIGA DE FLEXÃO - AGMA

Os dados de resistência à fadiga de flexão AGMA são obtidos em 10^7 ciclos de tensão repetidos (às vezes 10^6 ou 10^8 ciclos usados para outros materiais), e para um nível de confiança de 99%.

Essas resistências são comparadas aos níveis de tensão σ_b calculados usando a carga tangencial W_t .

Os dados de resistência são obtidos de um teste que proporciona um estado de tensão flutuante idêntico àquele da real condição de carregamento da engrenagem.



A equação de correlação para a resistência de fadiga a flexão de engrenagens é:

$$S_{fb} = \frac{K_L}{K_T K_R} S'_{fb}$$

Sendo:

S'_{fb} → é a resistência a fadiga de flexão AGMA

S_{fb} → é a resistência corrigida

K → fatores de correção



FATOR DE VIDA K_L

Fator de vida K_L : Uma vez que os dados de teste são para uma vida de 10^7 ciclos, um ciclo mais longo ou mais curto necessita de correções na resistência à fadiga de flexão baseado na relação S-N para o material.

FATOR DE TEMPERATURA K_T

Fator de temperatura K_T : Para aços e temperaturas de lubrificante de até 250°F , K_T pode ser ajustado em 1. Para temperaturas mais altas, K_T pode ser estimado.

$$K_T = \frac{460 + T_F}{620}$$

Sendo T_F a temperatura do óleo em $^\circ\text{F}$.
Não use esta equação para materiais que não sejam aço.



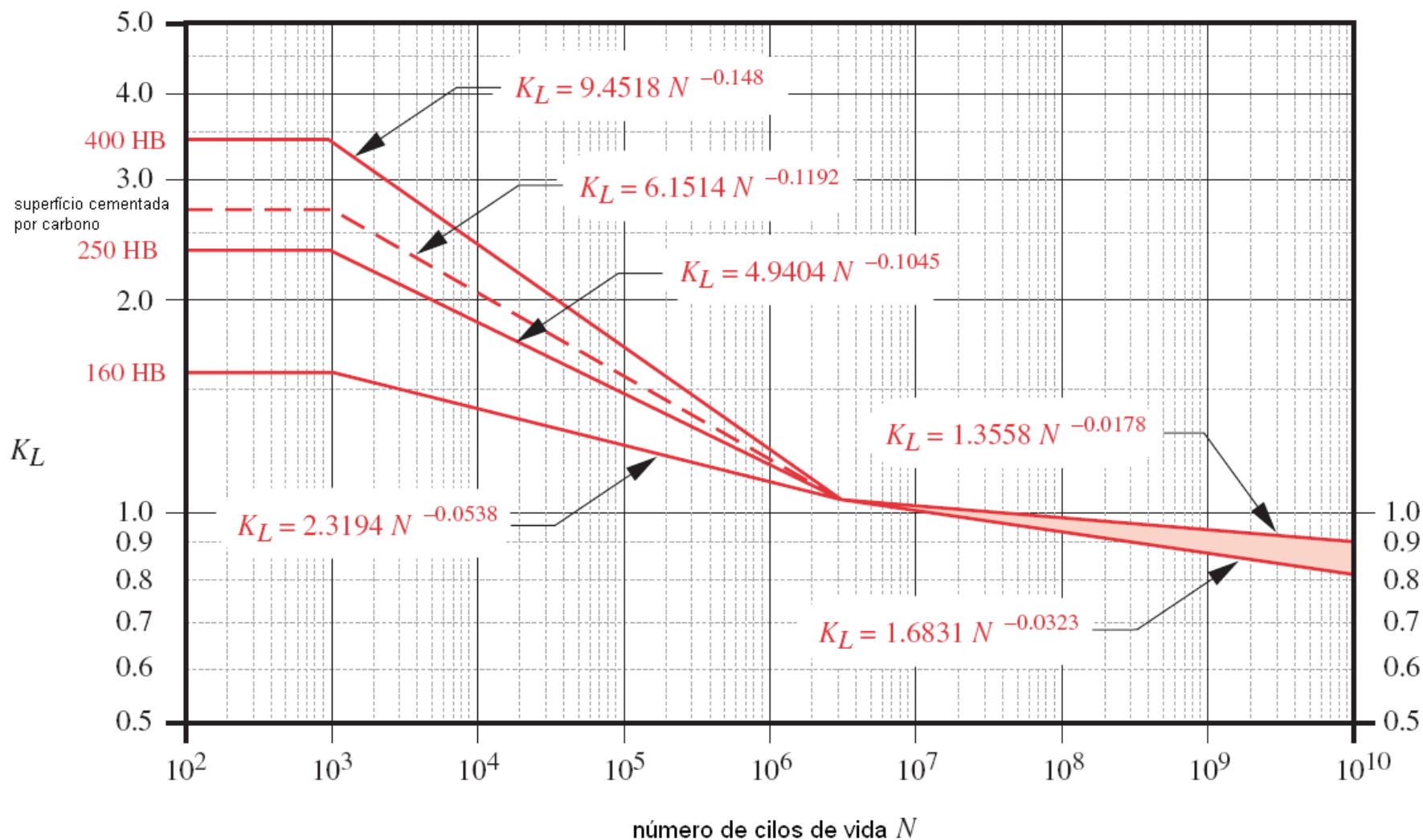


Figura 12 - Fator de Vida K_L em função do material e do número de ciclos.



FATOR DE CONFIABILIDADE K_R

Fator de confiabilidade K_R : Os dados de resistência AGMA são baseados numa confiabilidade de 99%, onde $K_R=1$.

A tabela 7 mostra a correção da resistência à fadiga de flexão AGMA para diferentes níveis de confiabilidade.

Tabela 7

Fator K_R da AGMA

Confiabilidade % K_R

90	0.85
99	1.00
99.9	1.25
99.99	1.50



Tabela 8 - Limite de Resistência a Fadiga em Flexão S_{fb}.

Resistência à fadiga de flexão S_{fb}' da AGMA para seleção de materiais para engrenamento[†]

Material	Classe AGMA	Designação do material	Tratamento térmico	Dureza superficial mínima	Resistência à fadiga de flexão		
					psi x 10 ³	MPa	MPa
Aço	A1-A5		Endurecimento completo	≤ 180 HB	25-33	170-230	
			Endurecimento completo	240 HB	31-41	210-280	
			Endurecimento completo	300 HB	36-47	250-325	
			Endurecimento completo	360 HB	40-52	280-360	
			Endurecimento completo	400 HB	42-56	290-390	
			Endurecimento por chama ou indução	Tipo A padronizado 50-54 HRC	45-55	310-380	
			Endurecimento por chama ou indução	Tipo B padronizado	22	150	
			Cementação por carbono e endurecimento superficial	55-64 HRC	55-75	380-520	
		AISI 4140	Nitretado	84.6 HR15N [†]	34-45	230-310	
		AISI 4340	Nitretado	83.5 HR15N	36-47	250-325	
		Nitroliga 135M	Nitretado	90.0 HR15N	38-48	260-330	
Ferro recozido	20	Class 20	Como fundido		5	35	
Ferro nodular (dúctil)	A-7-a	60-40-18	Recozido	140 HB	22-33	150-230	
Ferro maleável (perlítico)	A-8-c	45007		165 HB	10	70	
Bronze	Bronze 2	AGMA 2C	Molde de areia	40 ksi resistência da tração mínima	5.7	40	
Bronze	Al/Br 3	ASTM B-148 78 liga 954	Tratado termicamente	90 ksi resistência da tração mínima	23.6	160	

[†] Escala Rockwell 15N para materiais endurecidos superficialmente.



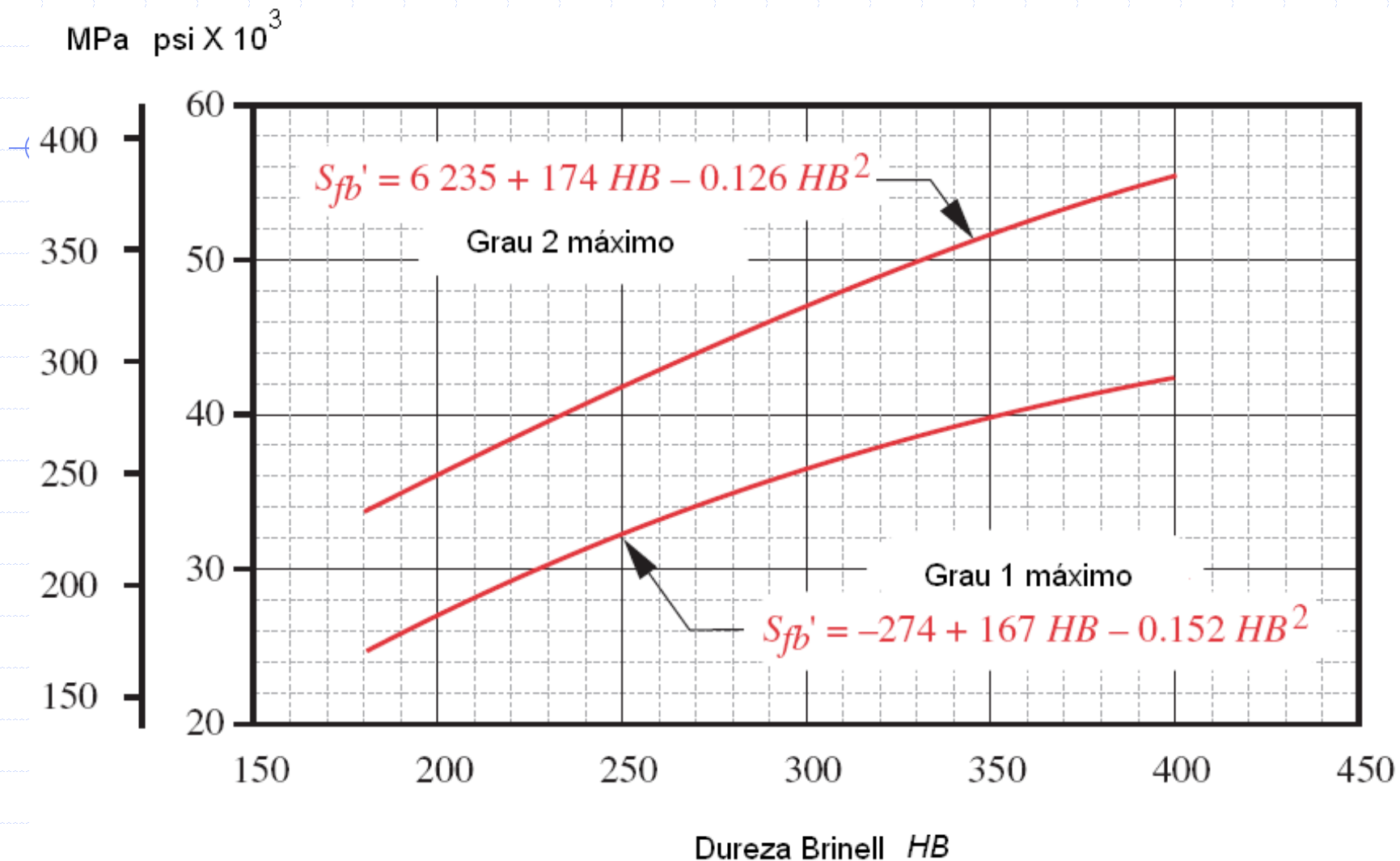


Figura 13 - Variação da resistência à fadiga em função da dureza Brinell.



RESISTÊNCIA À FADIGA DE SUPERFÍCIE - AGMA

Os dados de resistência a fadiga de superfície AGMA necessitam de quatro fatores de correção para obter a resistência a fadiga de superfície corrigida:

$$S_{fc} = \frac{C_L C_H}{C_T C_R} S'_f$$

Os fatores **CT** e **CR** são idênticos, respectivamente, a **KT** e **KR**.

O fator de vida **CL** tem a mesma finalidade que **KL**, contudo, referencia um diagrama S-N diferente.

CH fator de relação de dureza para resistência ao pitting.



FATOR DE VIDA SUPERFICIAL CL

Fator de Vida Superficial CL : Uma vez que os dados de teste são para uma vida de 10^7 ciclos, um ciclo mais longo ou mais curto deve ser corrigido para resistência a fadiga superficial.

AGMA sugere que o limite superior da zona sombreada seja usado para aplicações comerciais.

O limite inferior da zona sombreada é usado para aplicações em serviços críticos, onde admite-se muito pouco pitting e desgaste dos dentes e onde uma operação suave e com baixo nível de vibração é requerido. Infelizmente, esse tipo de dado é disponível apenas para aços.



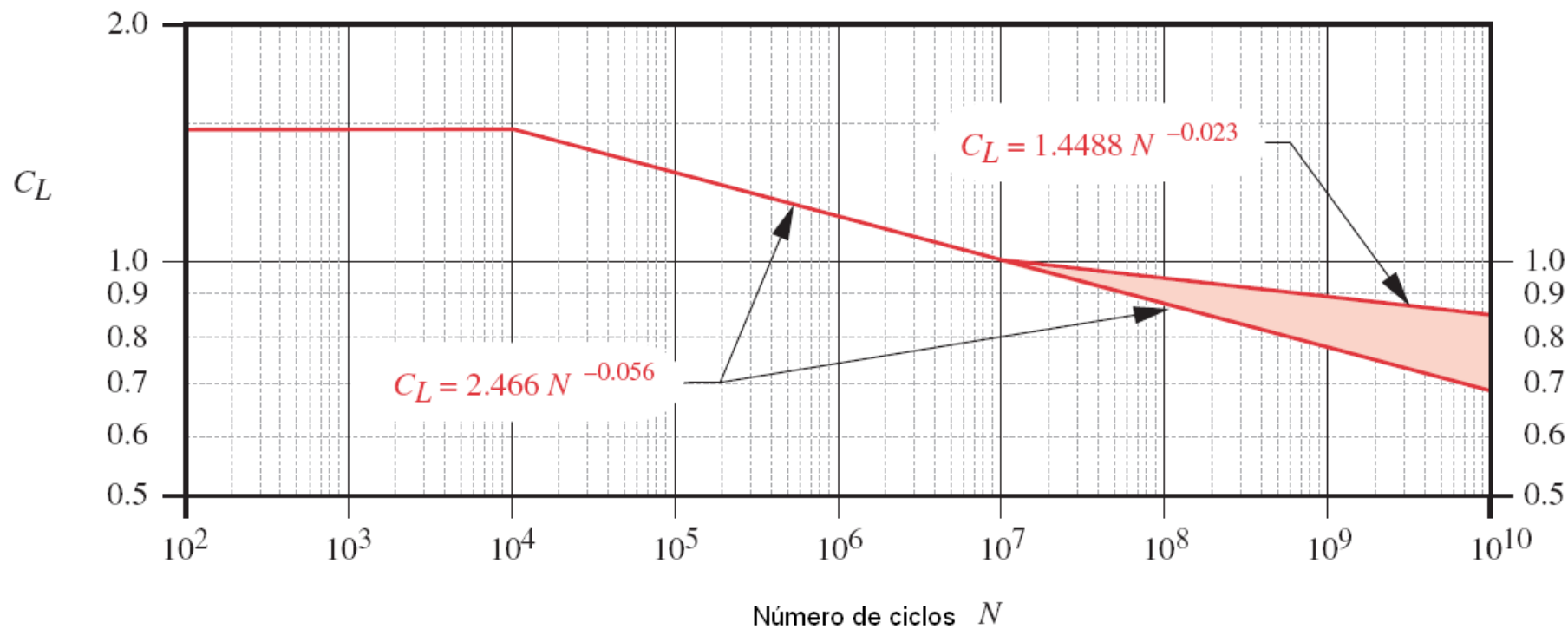


Figura 14 - Fator de Vida Superficial C_L



FATOR DE DUREZA C_H

Fator de dureza C_H : Esse fator é função da relação da dureza relativa do pinhão e da engrenagem.

O fator C_H é sempre maior do que 1, portanto sempre aumenta a resistência aparente da engrenagem. Esse fator leva em conta situações nas quais os dentes do pinhão são mais duros do que os dentes da engrenagem, sendo aplicado para a resistência de dente de engrenagem, não para pinhão.



$$C_H = 1 + A(m_G - 1)$$

Sendo m_G a relação de engrenamento e A dado como:

$$\text{Se } \frac{HB_p}{HB_g} < 1.2 \rightarrow A = 0$$

$$\text{Se } 1.2 \leq \frac{HB_p}{HB_g} \leq 1.7 \rightarrow A = 0.00898 \frac{HB_p}{HB_g} - 0.00829$$

$$\text{Se } \frac{HB_p}{HB_g} > 1.7 \rightarrow A = 0.00698$$

Sendo HB_p e HB_g a dureza Brinell do pinhão e engrenagem, respectivamente.



Para pinhões com superfícies endurecidas (>48 HRC) temos C_H :

$$C_H = 1 + B(450 - HB_g)$$

$$B = 0.00075 e^{-0.0112 R_q} \quad \text{U.S.}$$

$$B = 0.00075 e^{-0.052 R_q} \quad \text{S.I.}$$

R_q é rugosidade RMS da superfície dos dentes do pinhão em μin .

A tabela 9 mostra a resistência à fadiga superficial AGMA para os materiais mais usados em engrenagens.



Tabela 9 - Limite de resistência à fadiga de superfície Sfc'

Resistência à fadiga de flexão Sfc' da AGMA para seleção de materiais para engrenagem*

Material	Classe AGMA	Designação do material	Tratamento térmico	Dureza superficial mínima	Resistência à fadiga de flexão		
					psi x 10 ³	MPa	MPa
Aço	A1-A5		Endurecimento completo	≤ 180 HB	85-95	590-660	
			Endurecimento completo	240 HB	105-115	720-790	
			Endurecimento completo	300 HB	120-135	830-930	
			Endurecimento completo	360 HB	145-160	1000-1100	
			Endurecimento completo	400 HB	155-170	1100-1200	
			Endurecimento por chama ou indução	50 HRC	170-190	1200-1300	
			Endurecimento por chama ou indução	54 HRC	175-195	1200-1300	
			Cementação por carbono e endurecimento superficial	55-64 HRC	180-225	1250-1300	
		AISI 4140	Nitretado	84.6 HR15N [†]	155-180	1100-1250	
		AISI 4340	Nitretado	83.5 HR15N	150-175	1050-1200	
		Nitroliga 135M	Nitretado	90.0 HR15N	170-195	1170-1350	
		Nitroliga	Nitretado	90.0 HR15N	195-205	1340-1410	
Ferro recozido	20	Class 20	Como fundido		50-60	340-410	
		Class 30	Como fundido	175 HB	65-70	450-520	
		Class 40	Como fundido	200 HB	75-85	520-590	
Ferro nodular (dútil)	A-7-a	60-40-18	Recozido	140 HB	77-92	530-630	
	A-7-c	80-55-06	Revenido e temperado	180 HB	77-92	530-630	
	A-7-d	100-70-03	Revenido e temperado	230 HB	92-112	630-770	
	A-7-e	120-90-02	Revenido e temperado	230 HB	103-126	710-870	
Ferro maleável (perlítico)	A-8-c	45007		165 HB	72	500	
	A-8-e	50005		180 HB	78	540	
	A-8-f	53007		195 HB	83	570	
	A-8-i	80002		240 HB	94	650	
Bronze	Bronze 2	AGMA 2C	Molde de areia	40 ksi resistência da tração mínima	30	450	
	Al/Br 3	ASTM B-148 78 liga 954	Tratado termicamente	90 ksi resistência da tração mínima	65	450	

[†] Escala Rockwell 15N para materiais endurecidos superficialmente.



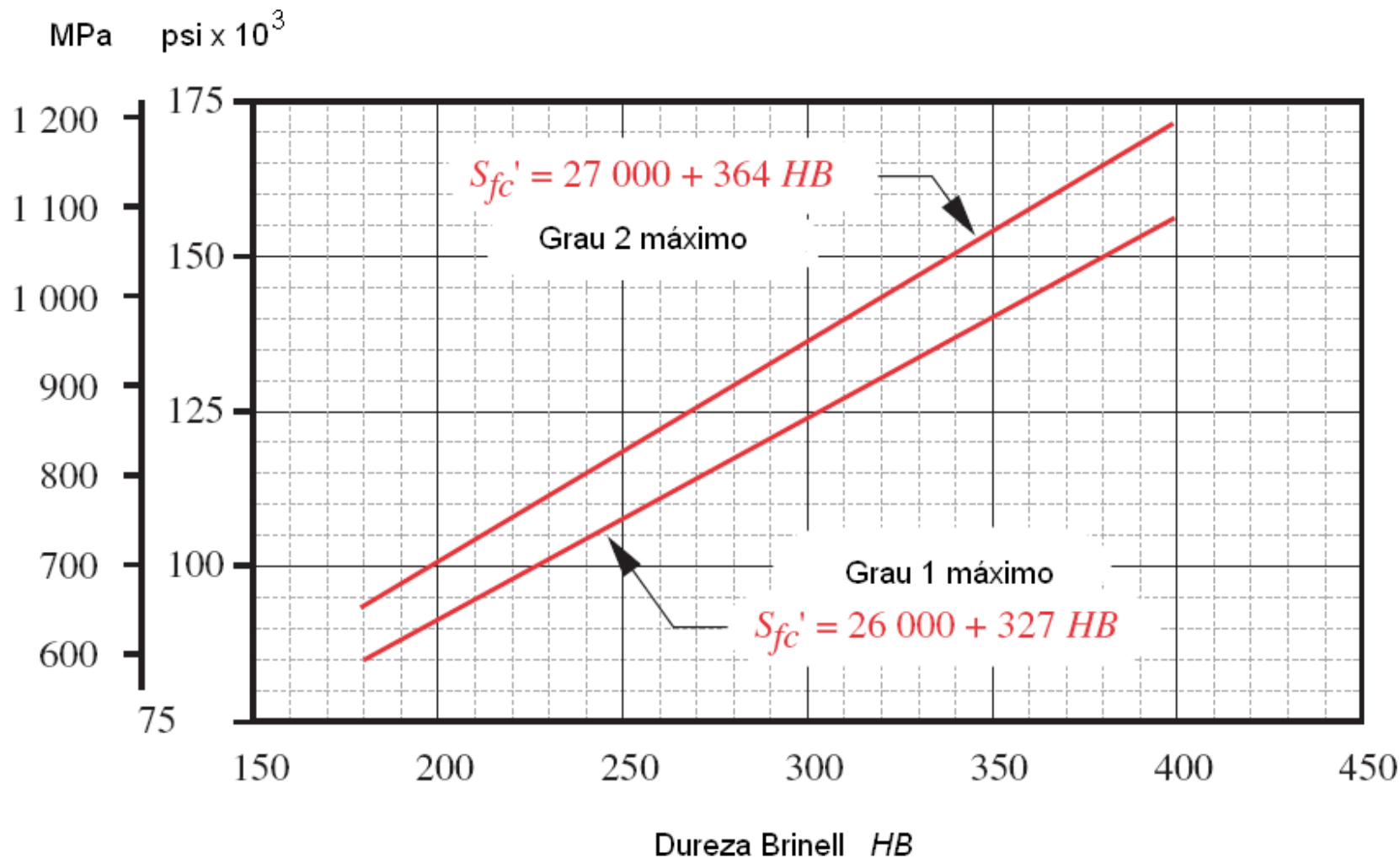


Figura 15 - Variação da resistência à fadiga superficial em função da dureza Brinell.

