

θ	u	w
30°	2.731	0.493
35°	2.397	0.530
40°	2.136	0.567
45°	1.926	0.604
50°	1.754	0.641
55°	1.611	0.678
60°	1.486	0.717
65°	1.378	0.759
70°	1.284	0.802
75°	1.202	0.846
80°	1.129	0.893
85°	1.061	0.944
90°	1	1

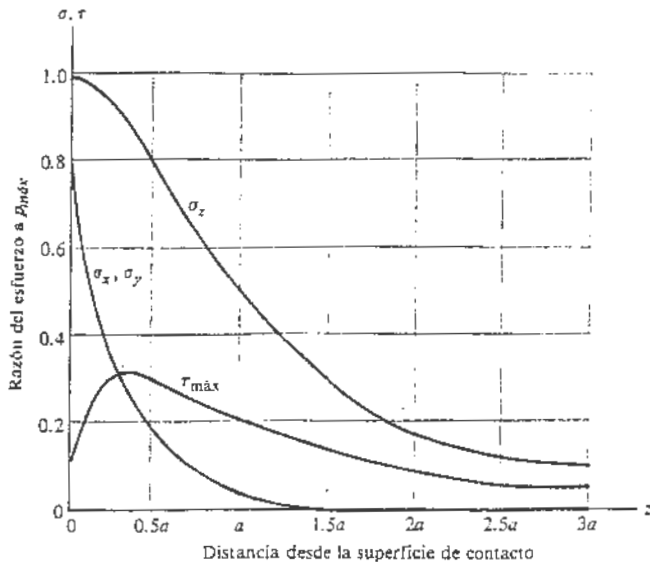


FIGURA 2-33

Magnitud de las componentes de esfuerzo abajo de la superficie en función de la presión máxima de contacto de las esferas. Obsérvese que el esfuerzo cortante máximo está ligeramente abajo de la superficie y vale aproximadamente $0.3\rho_{máx}$. El diagrama se basa en una relación (o razón) de Poisson de 0.30. Nótese que los esfuerzos normales son de compresión.

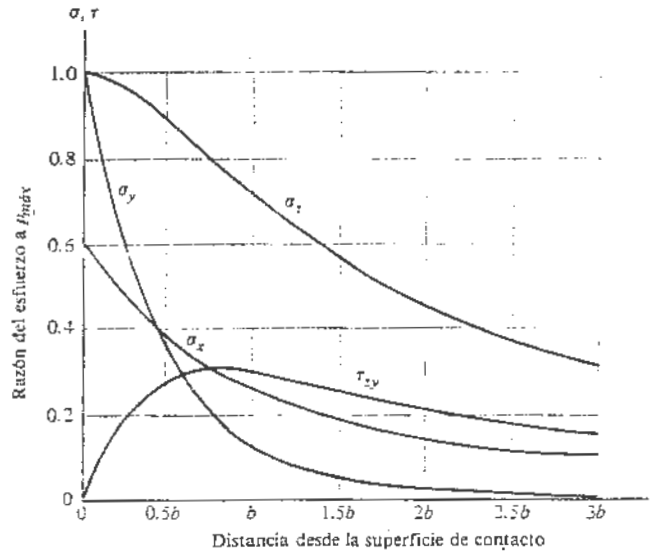


FIGURA 2-35

Magnitud de las componentes de esfuerzo abajo de la superficie en función de la presión máxima de contacto de los cilindros. El esfuerzo τ_{xy} se vuelve el mayor de los tres esfuerzos cortantes aproximadamente en $z/b = 0.75$; su valor máximo es $0.30\rho_{máx}$. El diagrama está basado en una relación de Poisson de 0.30. ¿Puede señalar qué pareja de esfuerzos principales se utilizan para determinar $\tau_{máx}$ cuando $z/b < 0.75$? Nótese que todos los esfuerzos normales son de compresión.

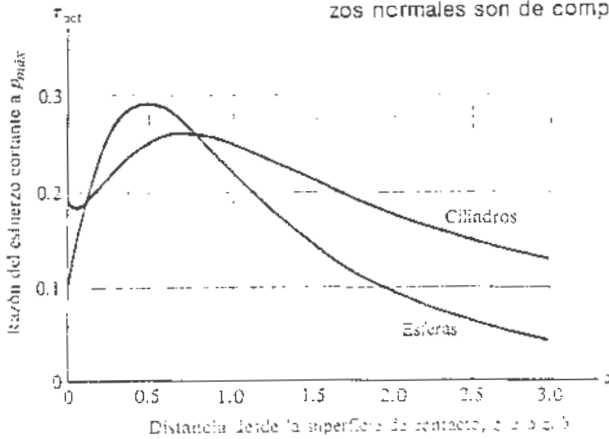


FIGURA 2-36

Gráfica del esfuerzo cortante octaédrico en función de las distancias z/a y z/b abajo de la superficie en el caso de contacto entre esferas y cilindros; basada en $\nu = 0.30$.

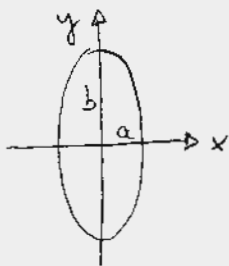
Una solución alternativa es la dada por Hamrock y Brewe en 1983,

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{r_{ax}} + \frac{1}{r_{bx}} \quad ; \quad \frac{1}{R_y} = \frac{1}{r_{ay}} + \frac{1}{r_{by}} \quad ; \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y}$$

$$\alpha_r = \frac{R_y}{R_x} \quad \text{relación de radios}$$

$$k_e = \alpha_r^{2/n} \quad \text{parámetro de elipticidad}$$

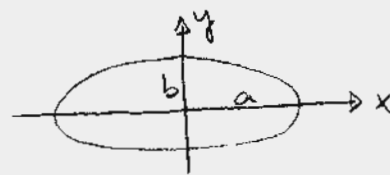
Si $1 \leq \alpha_r \leq 100$



$$F = \frac{\pi}{2} + f_a \ln \alpha_r$$

$$\xi = 1 + \frac{f_a}{\alpha_r}$$

si $0.01 \leq \alpha_r \leq 1$



$$F = \frac{\pi}{2} - f_a \ln \alpha_r$$

$$\xi = 1 + f_a \alpha_r$$

$$\text{con } f_a = \frac{\pi}{2} - 1$$

$$a = \left(\frac{6 \xi W R}{\pi k_e E'} \right)^{1/3} \quad ; \quad b = \left(\frac{6 k_e^2 \xi W R}{\pi E'} \right)^{1/3}$$

$$E' = \frac{2}{\frac{1-\nu_a^2}{E_a} + \frac{1-\nu_b^2}{E_b}}$$

$$f_0 = \frac{3W}{2\pi a b} \quad ; \quad f(x, y) = f_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}$$

$$\delta_{\max} = F \left(\frac{q}{2\xi R} \left(\frac{W}{\pi k_e E'} \right)^2 \right)^{1/3}$$


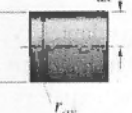
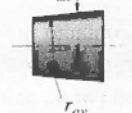


Nota: x es la dirección del arastro (longitudinal) e y es la dirección transversal

En el caso de contactos rectangulares,

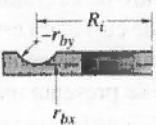
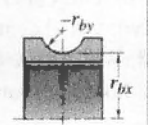
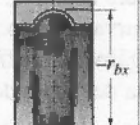
$$b = \sqrt{\frac{8WR_x}{\pi E' L}}$$

$$q_0 = \sqrt{\frac{E'W}{2\pi R_x L}}$$


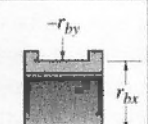
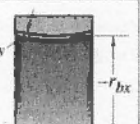
$$\delta_{\max} = \frac{2W}{\pi E' L} \left[\ln \left(\frac{2\pi E' R_x L}{W} \right) - 1 \right]$$

Esfera	Cilindro	Tronco cónico	Forma de barril	Forma cóncava
				

a)

De empuje	Interior radial	Exterior radial
		

b)

De empuje	Interior cilíndrico	Exterior cilíndrico
		

c)

Figura 8.15 Designaciones de signos para radios de curvatura de varios elementos de máquinas. a) Elementos rodantes; b) pistas de cojinetes de bolas; c) pistas de cojinetes de rodillos.

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right)$$

$$\frac{D}{G} = \frac{1}{2} \left(\frac{D_1}{G_1} + \frac{D_2}{G_2} \right)$$

E3. THE LINEAR THEORY OF ROLLING CONTACT

We tabulate the creepage coefficients of the linear theory of rolling contact. They are defined as follows:

$$F_1 = -c^2 G C_{11} \xi, \quad c = \sqrt{ab}, \quad a: \text{semi-axis of contact ellipse in rolling direction,}$$

$$b: \text{semi-axis of contact ellipse in lateral direction,}$$

$$\xi: \text{longitudinal creepage, see (1.82);}$$

$$F_2 = -c^2 G C_{22} \eta - c^3 G C_{23} \phi, \quad \eta: \text{lateral creepage, see (1.82),}$$

$$\phi: \text{spin creepage, see (1.82);}$$

$$M_3 = -c^2 G C_{32} \eta - c^4 G C_{33} \phi, \quad G: \text{combined modulus of rigidity, see (1.44),}$$

$$(F_1, F_2): \text{total tangential force on body 1,}$$

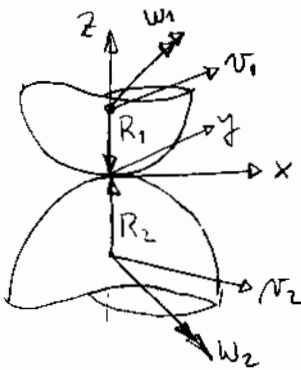
$$M_3: \text{couple about 3-axis on body 1.}$$

It is an unexplained fact that $C_{32} = -C_{23}$.
The creepage coefficients C_{ij} depend on a/b and on the combined Poisson's ratio ν . They are tabulated in Table E3. The asymptotic values (for $g \rightarrow 0$) were calculated by Kalker (1972a); the main body of Table E3 was calculated by Kalker (1967a).

TABLE E3. The creepage coefficients C_{ij} of the linear theory of rolling contact for elliptic contact areas.

g	C_{11}			C_{22}			$C_{23} = -C_{32}$			C_{33}		
	$\nu=0$	1/4	1/2	$\nu=0$	1/4	1/2	$\nu=0$	1/4	1/2	$\nu=0$	1/4	1/2
10.0	$\pi^2/4(1-\nu)$			$\pi^2/4$			$\frac{\pi\sqrt{a}}{3(1-\nu)}(1+\nu(\frac{1}{2}k+\ln 4-5))$			$\pi^2/16(1-\nu)g$		
0.1	2.51	3.31	4.85	2.51	2.52	2.33	0.354	0.473	0.731	6.42	8.28	11.7
0.2	2.39	3.37	4.81	2.59	2.63	2.66	0.483	0.603	0.809	3.46	4.27	5.66
0.3	2.68	3.44	4.80	2.68	2.75	2.81	0.607	0.715	0.889	2.49	2.96	3.72
0.4	2.78	3.53	4.82	2.78	2.88	2.98	0.720	0.823	0.977	2.02	2.32	2.77
0.5	2.88	3.62	4.83	2.88	3.01	3.14	0.827	0.929	1.07	1.74	1.93	2.22
0.6	2.98	3.72	4.91	2.98	3.14	3.31	0.930	1.03	1.18	1.56	1.68	1.86
0.7	3.09	3.81	4.97	3.09	3.28	3.48	1.03	1.14	1.29	1.43	1.50	1.60
0.8	3.19	3.91	5.05	3.19	3.41	3.65	1.13	1.25	1.40	1.34	1.37	1.42
0.9	3.29	4.01	5.12	3.29	3.54	3.82	1.23	1.36	1.51	1.27	1.27	1.27
1.0	3.40	4.12	5.20	3.40	3.67	3.98	1.33	1.47	1.63	1.21	1.19	1.16
0.9	3.51	4.22	5.30	3.51	3.81	4.16	1.44	1.59	1.77	1.16	1.11	1.06
0.8	3.65	4.36	5.42	3.65	3.99	4.39	1.58	1.75	1.94	1.10	1.04	0.954
0.7	3.82	4.54	5.58	3.82	4.21	4.67	1.76	1.95	2.18	1.05	0.965	0.852
0.6	4.06	4.78	5.80	4.06	4.50	5.04	2.01	2.23	2.50	1.01	0.892	0.751
0.5	4.37	5.10	6.11	4.37	4.90	5.56	2.35	2.62	2.96	0.958	0.819	0.650
0.4	4.84	5.57	6.57	4.84	5.48	6.31	2.88	3.24	3.70	0.912	0.747	0.549
0.3	5.57	6.34	7.34	5.57	6.40	7.51	3.79	4.32	5.01	0.868	0.674	0.446
0.2	6.96	7.78	8.82	6.96	8.14	9.79	5.72	6.63	7.89	0.828	0.601	0.341
0.1	10.7	11.7	12.9	10.7	12.8	16.0	12.2	14.6	18.0	0.795	0.526	0.228
10.0	$\frac{2\pi}{(k-2\nu)g} \left(1 + \frac{3-\ln 4}{1-2\nu} \right)$			$\frac{2\pi}{g} \left\{ \frac{(1-\nu)(3-\ln 4)}{(1-\nu)k+2\nu} \right\}$			$\frac{2\pi}{3g\sqrt{a}} / ((1-\nu)k-2+4\nu)$			$\frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{m(k-2)}{(1-\nu)k-2+4\nu} \right)$		

$$k = \ln(16/g^2); \quad g = \min(a/b, b/a); \quad \ln 4 = 1.386$$



$$V = \frac{1}{2} (R_1 \omega_{1y} - R_2 \omega_{2y}); \quad \text{rolling velocity}$$

$$\xi = \left[\omega_{1x} - \omega_{2x} - (R_1 \omega_{1y} + R_2 \omega_{2y}) \right] / V$$

$$\eta = \left[\omega_{1y} - \omega_{2y} + \left(\frac{\omega_{1x}}{\omega_{1y}} - \frac{\omega_{2x}}{\omega_{2y}} \right) V \right] / V$$

$$\phi = (\omega_{1z} - \omega_{2z}) / V$$

TABLE 20.1
TYPICAL FRICTION COEFFICIENTS

Conditions	Examples	Values
For clean surfaces		
General Clean, unlubricated surfaces	Steel on silver Leather on wood Nylon on steel	0.5 to 0.3
Exceptions to above Clean, similar metals other than those with close-packed hexagonal structure	Copper on copper Brass on brass Chromium on chromium	1.5 to 0.8
Clean, similar metals with close-packed hexagonal structure	Titanium on titanium Zinc on zinc	0.05 to 0.15
Clean, duplex-structure alloys with a soft constituent, sliding against either a hard metal or hard non-metal	Copper-lead alloy on steel Babbitt on steel	0.3 to 0.15
Unusual nonmetals Rubber on other materials Teflon on other materials Graphite or carbon on other materials		0.9 to 0.8 0.12 to 0.04 0.16 to 0.08
For boundary-lubricated surfaces (covered by liquid lubricant)		
Ineffective lubricant	Water, gasoline, nonwetting liquid metals	Same as for clean surfaces
Fairly effective lubricant	Refined mineral oils, wetting liquid-metals, also metal surfaces nominally unlubricated but untreated to remove contaminants	0.3 to 0.15 or unlubricated value, whichever lower
Highly effective lubricant	Mineral oils with "lubricity" additives, fatty oils, good synthetic lubricants	
Metal on metal or metal on nonmetal	Steel on steel Nylon on steel	0.10 to 0.05
Nonmetal on nonmetal	Nylon on nylon	0.20 to 0.10
For solid-film lubricated surfaces		
Hard metals covered by a thin layer of soft metal.	Thin lead film on steel	0.20 to 0.08
Materials lubricated by a layer of graphite or molybdenum disulfide, either alone or compounded by a binder		0.12 to 0.06

TABLE 20.1 (Cont.)

For hydrodynamically lubricated surfaces		
A complete fluid film, produced by the sliding action, separates the surfaces. (This mode of lubrication generally applies only at speeds much in excess of 10 ft/min)		0.001 to 0.01
For hydrostatically lubricated surfaces		
A complete fluid film, produced by external pressurization, separates the surfaces		0.001 to 0.000001 depending on the design parameters
For rolling-contact systems		
Pure rolling contact. Geometry carefully arranged so that pure rolling motion occurs over the contacting region	Cylinder rolling over a plane	0.001 to 0.00001
Normal rolling contact. Some shear occurs at the contacting region	Commercial ball bearings	0.01 to 0.001
Arbitrary geometry	Boulder rolling down a hillside	0.2 to 0.05
For naked surfaces		
Clean metals operated in a good vacuum (10^{-6} mm of mercury or better)		3.0, to adhering, lower for harder metals
Nonmetals (same conditions)		1.0 to 0.4

Tabla 8.8 Coeficientes de fricción y desgaste adhesivo constante para nueve materiales en fricción.

Materiales en fricción	Coefficiente de fricción, μ	Constante de desgaste por adhesión, k_1
Oro sobre oro	2.5	0.1-1
Cobre sobre cobre	1.2	0.01-0.1
Acero dulce sobre acero dulce	.6	10^{-2}
Bronce sobre acero duro	.3	10^{-3}
Plomo sobre acero	.2	2×10^{-5}
Politetrafluoretileno sobre acero	.2	2×10^{-5}
Acero inoxidable sobre acero duro	.5	2×10^{-5}
Carburo de tungsteno sobre carburo de tungsteno	.35	10^{-6}
Polietileno sobre acero	.5	$10^{-8}-10^{-7}$

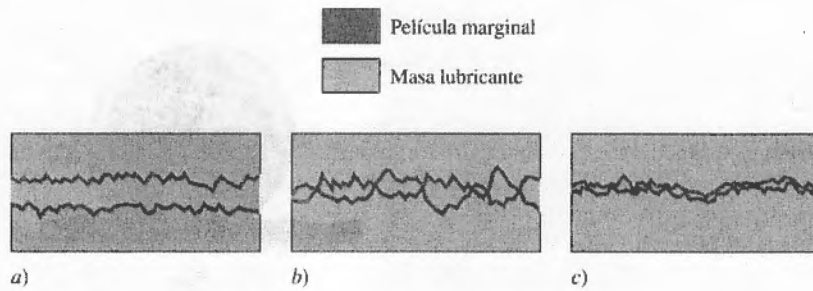


Figura 8.7 Condiciones de película que se requieren para la lubricación. a) Lubricación por película fluida: superficies separadas por la masa principal de la película lubricante; b) lubricación parcial: tanto la masa principal del lubricante como la película marginal tienen una función; c) lubricación marginal: el desempeño depende esencialmente de la película marginal. [B.J. Hamrock, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, NASA Reference Publication 1255, 1991.]

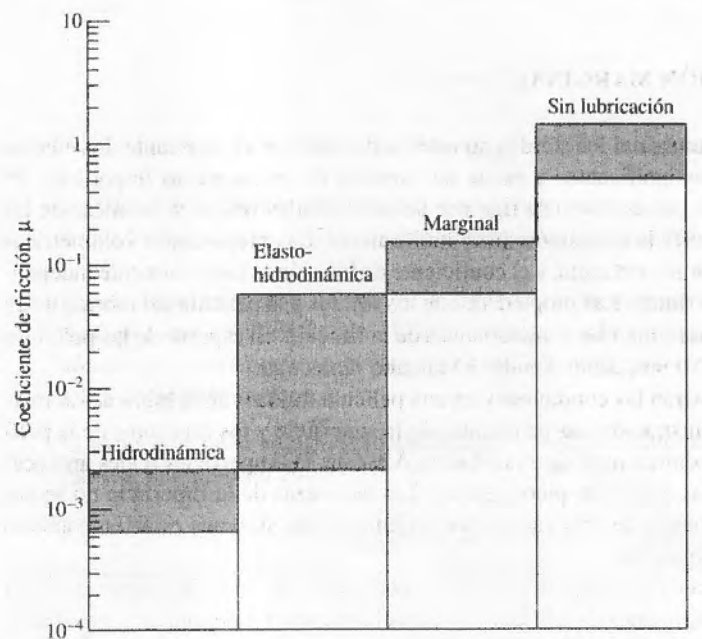


Figura 8.8 Diagrama de barras que muestra los coeficientes de fricción para varias condiciones de lubricación. [B.J. Hamrock, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, NASA Reference Publication 1255, 1991.]

Figura 8.9 Rapidez de desgaste para varios regímenes de lubricación. [A. Beerbawer, "Boundary Lubrication GRU.IGBEN.72, Report of Scientific and Technical Application Forecasts, (Disponible NTIS AD-747336), 1972. Reimpreso con autorización de la Exxon Chemical Company.]

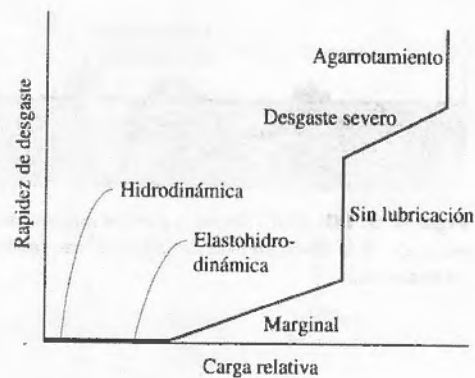


Tabla 8.1 Promedio aritmético normal de la aspereza de la superficie para varios procesos y componentes de máquinas. [B.J. Hamrock, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, NASA Reference Publication 1255, 1991.]

Procesos	Promedio aritmético de la aspereza de la superficie, R_a	
	μm	μpulg
Vaciado en arena, laminado en caliente	12.5-25	500-1 000
Cortado	3.2-25	128- 1 000
Planado y formado	.8-25	32-1 000
Forjado	3.2-12.5	128-500
Perforado	1.6-6.3	64-250
Molido	.8-6.3	32-250
Torno-barreno	.4-6.3	16-250
Espitado; uniformado agrandado; rolado en frío; estirado	.8-3.2	32-128
Fundido a presión	.8-1.6	32-64
Molido, grueso	.4-1.6	16-64
Molido, fino	.1-.4	4- 16
Rectificado	.03-.4	1.2-16
Polido	.02-2	.8-8
Lapidado	.005-.1	.2-4
Componentes		
Engranajes	.25-10	10-400
Cojinetes simples-chumacera (rodillo de rodadura)	.12-.5	5-20
Cojinetes simples, cojinete (apoyo)	.25-1.2	10-50
Cojinetes de rodillos, elementos rodantes	.015-.12	.6-5
Cojinetes de rodillos, pistas	.1-.3	4-12

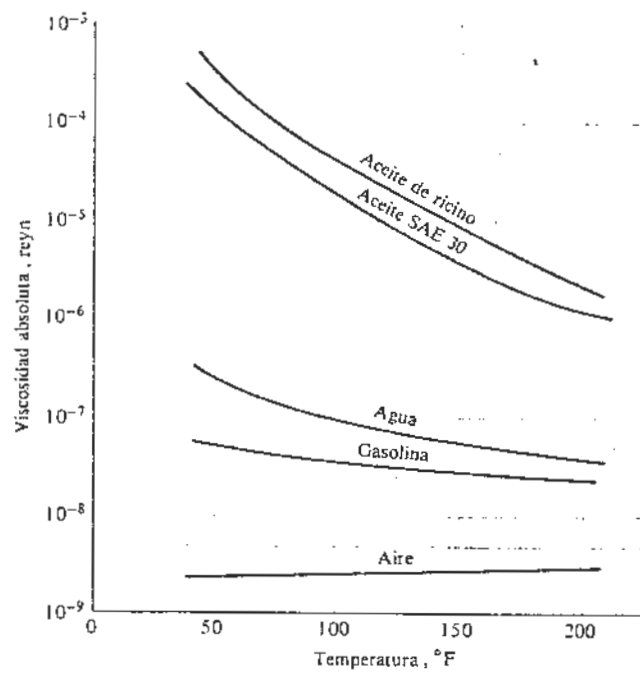


FIGURA 12-2
 Comparación de las viscosidades de diversos fluidos.

Tabla 8.3 Viscosidades absoluta y cinemática de 11 fluidos a presión atmosférica y a tres temperaturas. [W.R. Jones y otros, "Pressure-Viscosity Measurements for Several Lubricants to $5.5 \times 10(8)$ PaS and 149 degrees C", *ASME Transactions*, vol. 18 núm. 2, 1975, pp. 249-262. Reimpresa con autorización de la American Society of Mechanical Engineers International.]

Fluido	Temperatura, t_m , °C					
	38	99	149	38	99	149
	Viscosidad absoluta en $p = 0$, η_a , cP			Viscosidad cinemática en $p = 0$, η_s , m^2/s		
Éster avanzado	25.3	4.75	2.06	2.58×10^{-5}	0.51×10^{-5}	0.23×10^{-5}
Éster avanzado formulado	27.6	4.96	2.15	2.82	.53	.24
Polyalkil aromático	25.5	4.08	1.80	3.0	.50	.23
Aceite parafínico sintético (lote 3)	414	34.3	10.9	49.3	4.26	1.4
Aceite parafínico sintético (lote 4)	375	34.7	10.1	44.7	4.04	1.3
Aceite parafínico sintético (lote 2) más aditivo antidesgastante	370	32.0	9.93	44.2	4.00	1.29
Aceite parafínico sintético (lote 4) más aditivo antidesgastante	375	34.7	10.1	44.7	4.04	1.3
Éter-C	29.5	4.67	2.20	2.5	.41	.20
Aceite mineral nafténico superrefinado	68.1	6.86	2.74	7.8	.82	.33
Hidrocarburo sintético (fluido de tracción)	34.3	3.53	1.62	3.72	.40	.19
Poliéter fluorinado	181	20.2	6.68	9.66	1.15	.4

Tabla 8.4 Fluidos con fabricante y designaciones del fabricante. [W.R. Jones y otros, "Pressure-Viscosity Measurements for Several Lubricants to $5.5 \times 10(8)$ PaS and 149 Degrees C", *ASME Transactions*, vol. 18, núm. 2, 1975, pp. 249-262. Reimpresa con autorización de la American Society of Mechanical Engineers International.]

Fluido	Fabricante	Designación
Éster avanzado	Shell Oil Co.	Aceite de turbina Aeroshell
	555 (base de aceite)	
Éster avanzado formulado	Shell Oil Co.	Aceite de turbina Aeroshell 555 (WRGL-358)
Polyalkil aromático	Continental Oil Co.	DN-600
Aceite parafínico sintético (lote 3)	Mobil Oil Co.	XRM 109-F3
Aceite parafínico sintético (lote 4)		XRM 109-F4
Aceite parafínico sintético (lote 2) más aditivo antidesgaste		XRM 177-F2
Aceite parafínico sintético (lote 4) más aditivo antidesgaste		XRM 177-F4
Éter-C	Monsanto Co.	MCS-418
Aceite mineral nafténico superrefinado	Humble Oil and Refining Co.	FN 2961
Hidrocarburo sintético (fluido de tracción)	Monsanto Co.	MCS-460
Poliéter fluorinado	DuPont Co.	PR 143 AB (lote 10)

Tabla 8.5 Coeficientes presión-viscosidad de 11 fluidos a 3 temperaturas. [W.R. Jones y otros, "Pressure-Viscosity Measurements for Several Lubricants to 5.5×10^8 PaS and 149 Degrees C", ASME Transactions, vol. 18, núm. 2, 1975, pp. 249-262. Reimpresa con autorización de la American Society of Mechanical Engineers International.]

Fluido	Temperatura, t_m , °C		
	38	99	149
	Coeficiente presión-viscosidad ξ_p m^2/N		
Éster avanzado	1.28×10^{-8}	0.987×10^{-8}	0.851×10^{-8}
Éster avanzado formulado	1.37	1.00	.874
Polyalkil aromático	1.58	1.25	1.01
Aceite parafínico sintético (lote 3)	1.77	1.51	1.09
Aceite parafínico sintético (lote 4)	1.99	1.51	1.29
Aceite parafínico sintético (lote 2) más aditivo antidesgaste	1.81	1.37	1.13
Aceite parafínico sintético (lote 4) más aditivo antidesgaste	1.96	1.55	1.25
Éter-C	1.80	.980	.795
Aceite mineral nafténico superrefinado	2.51	1.54	1.27
Hidrocarburo sintético (fluido de tracción)	3.12	1.71	.939
Fluoracetato fluorinado	4.17	3.24	3.02