

Lubrifikatzaileen marruskaduraren modelo sinplifikatua *spin* higiduradun errodadura kontaktutan

M. Iribecampos¹, A. Arana¹, J. Larrañaga¹, I. Ulacia¹

¹Mondragon Unibertsitatea, Mekanika eta Ekoizpen Industrialak Departamentua,
Loramendi 4, 20500 Arrasate-Mondragon, Euskal Herria
Kontaktua: miribecampos@mondragon.edu

Laburpena. Elementu mekanikoen funtzionamendu egokia bermatzeko lubrifikatzaileak erabiltzen dira, energia galderak gutxitzen dituzte marruskadura jaitsiz eta elementu metalikoak babesten dituzte higiduraren aurrean. Errodadura mugimenduarekin batera *spin* higidura zinematika adierazgarri bat da transmisio mekaniko eta errodamenduetan adibidez, eta kontaktuan dauden gainazalen arteko irristaduran eragin zuzena dauka. Fenomeno zinematiko honek, lubrifikatzailearen lan baldintzatan eta ondorioz honen portaeran eragin zuzena du. Lubrifikatzaileen modelizazioa, prozesu konplexua izanik, garrantzitsua da elementu mekanikoen portaera zein potentzia galeren estimazio egokiak egiteko. Hori dela eta, lan honek lubrifikatutako kontaktuen marruskadura koefizientea eta energia galerak kalkulatzeko modelo analitiko sinple bat aurkezten du *spin* higidurak eragindako fenomenoak ere kontsideratzeko gai dena. Modeloaren emaitzek tribometroan neurtutako joera esperimentalak egoki adierazten dituztela ikusi da.

Gako-hitzak: Lubrifikatzaileak; Marruskadura, efizientzia, *spin*.

1. Sarrera

Elementu mekanikoen funtzionamendu egokia ziurtatzeko lubrifikatzaileak erabili izan ohi dira. Hauek, kontaktuan dauden piezak babestu eta horien arteko marruskadura koefizientea jaisten dute, horrela elementuen bizitza luzatu eta potentzia galerak gutxitzen dituztelarik¹. Elementu mekaniko askotan errodadurazko kontaktu puntualak agertzen dira: errodamendutan, boladun torlojutan edo transmisio aldakor jarraituetan esaterako. Biraketa abiadura horrek, lubrifikatzailea sartzen du kontaktu eremura, kontaktuan dauden gorputzen artean olio geruza bat sortzen delarik.

Horretaz aparte, elementu hauetan indar normal handiak agertu ohi dira, eta kontaktu puntualak izanik, solidoen deformazio elastikoak gertatzen dira, presio distribuzio eta kontaktuko azalera bat sortuz. Honek lubrifikatzailearen erreologian eta ondorioz marruskaduraren portaeran, potentzia galeratan eta elementuen efizientzian du eragina.

Makina elementu askotan *spin* higidura ere agertu ohi da. Higidura hau ardatza kontaktuko gainazalari normala duen irristadura distribuzio zirkular bat da. Kontaktua angeluarreko errodamendutan zein transmisio aldakor jarraituetan gertatzen da esaterako, eta honek ere eragin zuzena du lubrifikatzailearen portaeran eta marruskaduran². Horretaz aparte, azken aldirian literaturan publikatutako lan batzuk kontaktuko azaleraren eragina aztertzen dute lubrifikatutako marruskaduran³. Ikusi da, zenbat eta kontaktuko gainazala handiagoa, orduan eta marruskadura baxuagoa lortzen dela, kontaktuko tenperatura igotzen delako orohar. Azken bi fenomeno hauek—*spin* higidura eta kontaktuen eskala—ez dira elkarrekin kontsideratu izan, baina makina elementuetan eragin zuzena izan dezakete⁴. Hori dela eta fenomeno lokal hauek kalkulatzeko garrantzitsua da elementu mekanikoen portaera aurreikusteko⁵.

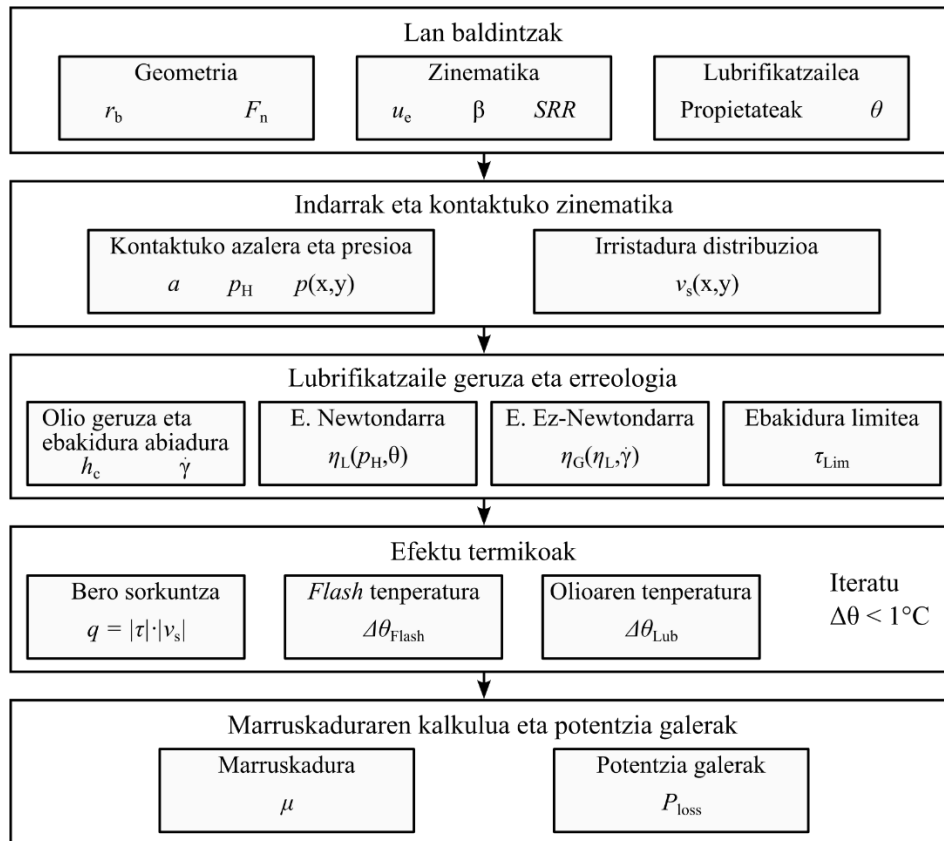
Lubrifikatutako marruskaduraren kalkulua prozesu konplexua da, modelo numerikoak erabili behar baitira geratzen diren fenomenoak kalkulatzeko. Literaturan marruskadura koefizientea modu analitiko baten estimatzeko modelo analitiko batzuk daude eskuragarri, dena den, ez dituzte *spin* eta kontaktuko azaleraren eraginak kontsideratzen. Hori dela eta modelo analitiko bat aurkezten da lan honetan, ingeniariaritzan aplikaziotan erabilgarri izan daitekeena, non azalera eta *spin*-aren eraginak kontsideratzen diren. Horretarako, lehenik, algoritmoa azaltzen da, hau eraikitzeke erabili diren modeloak zein diren aipatuz. Ondoren, lan baldintza batzuk definitu eta marruskadura koefizientearen eta kontaktuko potentzia galeren emaitzak erakusten dira.

2. Modeloaren deskribapena

Atal honetan marruskadura eta energia galerak kalkulatzeko metodoa azaltzen da.

2.1. Marruskadura eta potentzia galerak kalkulatzeko algoritmoa

Marruskadura, lubrifikatzaile geruzaren ebakidura esfortzuek definitzen dute. Era berean, ebakidura esfortzu hauek kalkulatzeko kontaktuko puntuaren indarrak, zinematika eta lubrifikatzailearen erreologia aintzat hartu behar dira. Marruskadura eta potentzia galeren kalkulua 1. irudian ageri den diagramako pausuak jarraituz kalkulatu dira.



1.irudia. Marruskadura eta potentzia galerak kalkulatzeko modeloa.

2.2. Indarrak eta zinematika

Indar normalaren ondorioz deformazio elastikoak gertatu ohi dira kontaktuan dauden piezen artean. Hertz-en modeloa erabili da⁶ kontaktuko gainazalaren tamaina, forma eta presio distribuzioa kalkulatzeko.

Ondoren, kontaktuko zinematika kalkulatu da, non 3 zinematika berezitu daitezkeen horrelako kontaktuetan:

- Errodadura abiadura kontaktuan dauden piezen norantza bereko abiadurari deritzo. Abiadura honek lubrifikatzailea sartzen du kontaktuko eremura, horrela olio geruza sortzen delarik.
- Irristadura longitudinala elementuen arteko norantza bereko abiadura diferentzia da. Irristadura honek lubrifikatzaile geruza ebakitzen du, beharrezko izanik lubrifikatutako marruskadura sortzeko. Marruskadura irristadura longitudinalaren funtzioan irudikatu ohi da (*SRR*, ingelesezko sigletatik *Slide to Roll Ratio*). Parametro adimentsional honek irristadura abiadura eta errodadura abiadura erlazionatzen ditu.

$$SRR = \frac{v_s}{u_e} = 2 \cdot \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \quad (1)$$

- *Spin* abiadura irristadura distribuzio zirkular bat da, biraketa ardatza kontaktuko gainazalari normala delarik. Kontaktuan dauden elementuen biraketa ardatzen posizioaren ondorioz geratzen da higidura hau.

2.3. Lubrifikatzaile geruza eta erreologia

Lubrifikatzaile geruzaren kalkulua, prozesu konplexua izanik, metodo numerikoen bitartez kalkulatu ohi da. Kalkulua errazte aldera, modelo analitiko batzuk proposatu izan dituzte literaturan, eta modelo bakoitza lan baldintza jakin batzuetarako da erabilgarri. Lan honetan Chittenden-en modeloa erabiltzea erabaki da lan baldintza tarte handiengan emaitza onenak ematen dituela frogatu delako⁷. Behin irristadura distribuzioa eta lubrifikatzaile geruza kalkulatu, lubrifikatzailearen ebakidura abiadura kalkulatu daiteke. Couette fluxua bakarrik suposatuz, ebakidura abiaduraren distribuzioa irristadura abiadura eta olio geruzak ematen du 2. ekuazioan ageri den bezala.

$$\dot{\gamma} = \frac{v_s}{h_c} \quad (2)$$

Lubrifikatzailearen erreologiari dagokionez, erreologia Newtonarra eta erreologia ez-Newtonarra ezberdintzen dira. Batetik, erreologia Newtonarrak lubrifikatzailearen biskositatearen aldaketak kontsideratzen ditu presio eta tenperaturaren funtzioan. Yasutomi-ren modeloa erabili da lan honetan lubrifikatzailearen biskositate Newtonarra kalkulatzeko⁸. Bestetik, erreologia ez-Newtonarrak lubrifikatzaile geruzaren ebakidurak eragindako biskositatearen aldaketak kontsideratzen ditu. Carreau-Yasuda modeloa erabili da biskositate hau kalkulatzeko⁹.

Erreologiaz gain, ebakidura esfortzu limiteak ere eragin nabarmena du lubrifikatutako marruskaduran. Ebakidura limitea, lubrifikazio geruzaren hauste plastikoari deritzo, hau da, nahiz eta lubrifikatzaile geruza gehiago zizailatu, ebakidura esfortzuak ez dira gehiago hazten¹⁰. Gai hau eztabaidapean dago oraindik literaturan, baina ikusi da presio altutan ($p_H \approx 2$ GPa) neurtzen den marruskadura koefiziente maximoari proportzionala dela ebakidura esfortzu limitearen balioa: $\tau_{lim} = p_H \cdot \Lambda$.

Behin hona iritsita, marruskadura koefizientea kalkulatu da 3. ekuazioaren bitartez. Kalkulua olio geruzaren ebakidura indarren distribuzioa kalkulatu eta hau kontaktuko azaleran integratuz lortzen da.

$$\mu_x = \frac{1}{F_n} \iint_{A_H} \tau_x \cdot dA_H = \frac{1}{F_n} \int_{-b}^b \int_{-a}^a \min \left(\dot{\gamma} \cdot \eta_L \cdot \left[1 + \left(\frac{\eta_L \cdot \dot{\gamma}}{G} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}}, \Lambda \cdot p \right) \cdot \cos \varphi \cdot dx \cdot dy \quad (3)$$

2.4. Efektu termikoak

Irristadura eta presio altuaren ondorioz kontaktuko tenperatura igotzen da, tenperaturaren kalkulua energiaren ekuazioa garatuz lortuko litzake, baina modelo sinplifikatuak daude literaturan eskuragarri¹¹. Bi bero iturri ezberdin bereizten dira, solidoen arteko irristadurari dagokiona eta olioaren biskositateari dagokiona 4. ekuazioan definitzen diren bezala kalkulatu direlarik.

$$\Theta = \Theta_0 + \Delta\Theta_{Flash} + \Delta\Theta_{Lub} = \Theta_0 + \frac{1}{(2\pi K \rho c)^{0.5}} \cdot t^{0.5} \dot{q} + \frac{h_c}{8K_{lub}} \dot{q} \quad (4)$$

Era berean, bero sorkuntza disipatzen den energia da, literaturan sarri erabiltzen den beroaren definizioak ez du balio kasu honetan, ez baitu *spin* higiduraren eragina kontsideratzen¹¹. Horretarako ondorengo ekuazioan ageri den definizioa erabili da modelo honetan, non ebakidura esfortzuen eta irristadura abiaduren distribuzioaren balio absolutuak kontsideratu diren.

$$\dot{q} = |\tau| \cdot |v_s| \quad (5)$$

2.5. Potentzia galerak

Lubrifikatutako kontaktuen potentzia galerak kalkulatzeko ere ebakidura esfortzuak eta irristadura distribuzioa integratu behar dira 6. ekuazioan ageri den bezala. Irristadura eta ebakidura esfortzuen balio absolutuak kontsideratzen dira kalkuluan irristadura bektorearen norabideak berdin diolako, hau da, irristadura guztiek—norantza positiboan zein norantza negatiboan—potentzia galerak eragiten dituzte.

$$P_{loss} = \iint_{A_H} |\tau| \cdot |v_s| \cdot dA_H \quad (6)$$

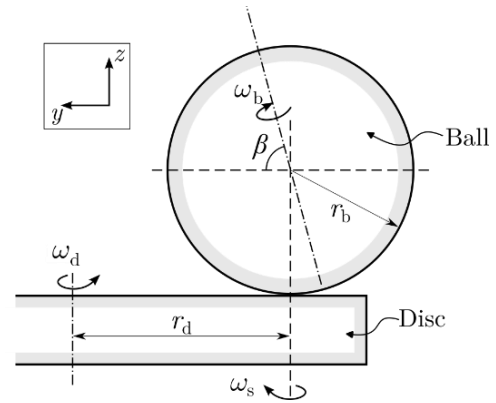
3. Emaitzak eta eztabaida

Atal honetan modelotik lortutako emaitzak literaturan publikatutako¹² *spin*-dun marruskadura neurketa esperimental batzuekin alderatu da modeloa balioztatzeko eta ondoren lan baldintza hauetan gertatzen diren potentzia galerak kalkulatu dira. Neurketa esperimentaletan *spin* higidura ere kontsideratu da irristadura longitudinalarekin batera. Horretarako, 1.taulan definitzen diren lan baldintzak simulatu dira eta irudian ageri den disposizioa kontsideratu da. Bola bat disko batekin dagoen kontaktu bat kontsideratu da eta bien biraketa abiadurak eta β inklinazio angelua kontrolatuz *spin* abiadura ezberdinak aztertu dira.

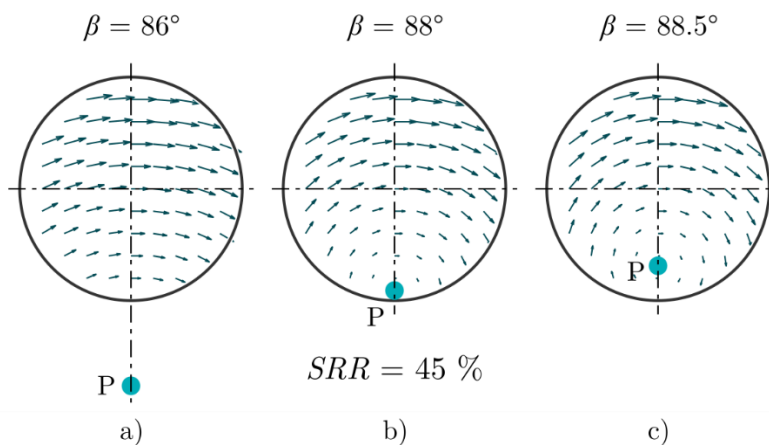
1. taula. Aztertutako lan baldintzak eta kontaktuko piezen disposizioa.

Parametroa	1
u_e	2 m/s
r_b	[12.5 mm*, 80 mm]
r_d	50 mm
β	[0°, 86°, 88°, 88.5°]
F_n	1500 N
p_H	0.845 GPa
a	0.92 mm
θ_0	30 °C
<i>SRR</i>	[0 % to 45 %]
ω_s (<i>SRR</i> _{x,0} = 0 %)	[0, 397, 755, 991] rad/s

*12.5 mm bola *spin*-ik gabeko lan baldintzarako soilik erabili da ($\beta = 0^\circ$)



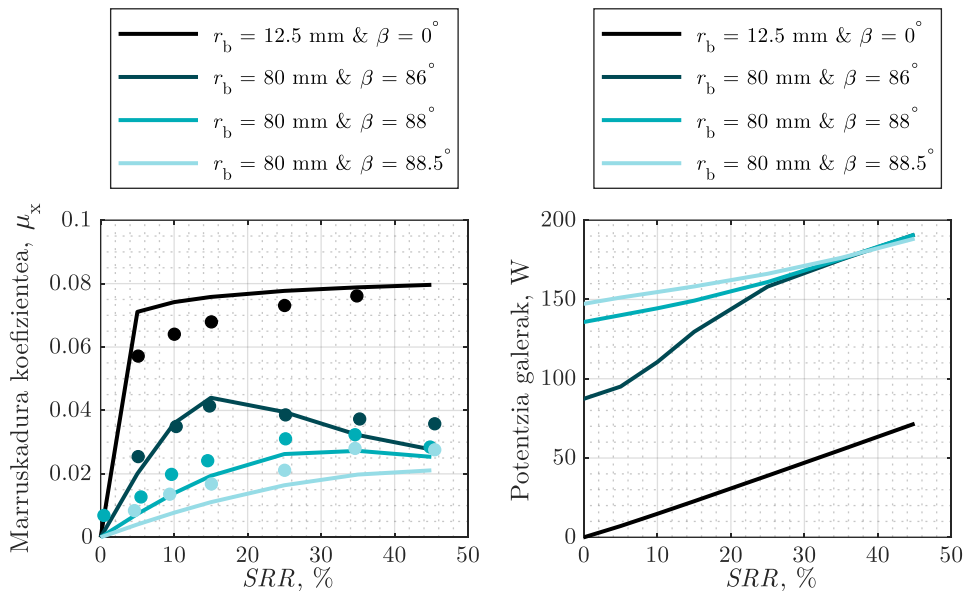
Lan baldintza hauekin lortzen diren irristadura bektoreak erakusten dira 2. irudian. Bertan irristadura longitudinala *spin*-arekin batera ageri denean lortzen diren irristadura distribuzioak erakusten dira. Irriaturarik gertatzen ez den puntu bat ageri da irudian **P** hizkiaren bitartez identifikatzen dena. Puntu hau *SRR*-ren funtzioan posizio ezberdinetan aurkitzen da; irristadura longitudinalik ez dagoenean, **P** puntua kontaktuko azaleraren erdian legoke kasu guztietan eta irristadura longitudinala igo ahala kontaktuko zentrotik mugitzen da kontaktuko azaleratik irteten den arte. *Spin* abiadura baxueneko kasuan, $\beta = 86^\circ$ denean, eta irristadura longitudinala *SRR* = 45 % den baldintzan **P** puntua kontaktuko azaleratik kanpo dago. $\beta = 88^\circ$ den kasuan aldiz, kontaktuko azaleraren limitean dago puntu hau. Bukatzeko, *spin* abiadura altueneko kasuan, $\beta = 88.5^\circ$ denean, kontaktuko azaleraren barruan dago oraindik **P** puntua. Azken kasu honetan, irristadura bektore batzuk leudeke norantza negatiboan, hau da, **P** puntuaren azpitik dauden irristadura bektoreak errodadura norantzaren kontrako norantza leudeke, eta hauek, kontaktuko tenperatura zein potentzia galerak areagotzen dituzte.



2. irudia. Kontaktuko irristadura abiadura bektoreak % 45-eko *SRR* baldintzetan.

3. irudian modelotik lortutako marruskadura eta potentzia galeren emaitzak ageri dira. Modeloko emaitzek marruskaduraren portaera esperimentalak egoki irudikatzen dutela erakusten du irudiak. *Spin* abiadura handituz, irristadura longitudinal baxutan, marruskadura koefizientea txikiagoa dela ikusten da. Marruskaduraren jaitsiera hau, gainazalean gertatzen diren irristadura handiagoen ondorio da, hau da, lubrifikatzailearen biskositatea jaisten da eta ondorioz marruskadura ere jaisten da. Horretaz aparte, 3. irudian potentzia galerak ere erakusten dira. *Spin* handiena duen kasuak potentzia galera handienak dituela ikusten da *SRR* baxutan. Portaera hau ere gainazalean gertatzen diren irristadura abiaduren ondorio da; *spin* altuko kasuan, irristadura abiadurak handiagoak direnez potentzia galerak ere handiago dira.

Horretaz gain, aipatu beharra dago, *spin*-ik gabeko kurbaren balioak ez dutela zer ikusirik gainontzeko 3 kurbekin, honen arrazoa kontaktuko eskalaren tamaina da, izan ere *spin*-ik gabekoa 12.5 mm-ko bolarekin simulatu den ezberdina kontsideratu da kontaktuko presioa konparagarria izan zedin, ondorioz potentziak ere ezberdinak dira. Baina ikusten denez, irristadura logitudinalik ez dagoenean potentzia galerarik ere ez legoke, izan ere, ez legoke irristadurarik kontaktuko gainazalean eta ondorioz ez dago potentzia galerarik.



3. irudia. (ezkerrean) marruskadura koefizientea eta (eskuinean) potentzia galerak.

4. Ondorioak

Lan honetan lubrifikatutako marruskadura eta kontaktuko efizientzia kalkulatzeko modelo analitiko bat proposatu da. Orain arte kalkulu hau egitea konplexua dela ikusi da literaturan, modelizazio aurreratua behar baita eta horrek kostu konputazionala nabarmen handitzen du. Modelo honen bitartez, marruskadura eta potentzia galeren estimazio egokiak egin daitezke, emaitzek portaera esperimentalak egoki aurreikusten dituela erakutsi baita. *Spin* abiadura handiko kasuetan marruskadura jaitsi eta potentzia galerak areagotzen direla ikusi da, batez ere irristadura longitudinal baxuko kasuetan; elementu mekaniko gehienetan aurkitzen diren lan baldintzetan hain justu. Elementu hauetan energia galerak gutxitzeko asmoz, *spin* abiadura baxuak edota kontaktuko azalera txikiak erabiltzea komenigarri dela ikusi da. Hori dela eta, modelo hau ingeniartzat aplikaziotan erabilgarri izan daiteke elementu mekanikoen funtzionamenduaren eta efizientziaren estimazio azkar bat izateko, gainera elementuen diseinua hobetzeko ere balio dezake.

Bibliografia

- ¹I. Hutchings, P. Shipway. Lubricants and lubrication. *Tribology* (2017). doi: 10.1016/b978-0-08-100910-9.00004-0.
- ²P. Ehret, D. Dowson, C. M. Taylor. Thermal Effects in Elliptical Contacts with Spin Conditions. *Tribology Series* (1999). doi: 10.1016/s0167-8922(99)80088-1.
- ³H. C. Liu. et al. Scale and contact geometry effects on friction in thermal EHL: twin-disc versus ball-on-disc. *Tribology International* (2020). doi: 10.1016/j.triboint.2020.106694.
- ⁴M. Iribecamos, I. Ulacia, A. Arana, J. Larrañaga. The combined effect of contact interface size and spin on lubricated traction in rolling-sliding point contacts. *Tribology International* (2023). doi: 10.1016/j.triboint.2023.108822.
- ⁵P. Alberdi, A. Arana, A. Oyanguren, J. Larrañaga, I. Ulacia. A general kinematic model for lubricated ball bearings based on the minimum energy hypothesis. *Tribology International* (2024). doi: 10.1016/j.triboint.2024.109698.
- ⁶Q. J. Wang, D. Zhu. *Interfacial Mechanics: Theories and Methods for Contact and Lubrication*. CRC Press, 2019. doi: <https://doi.org/10.1201/9780429131011>.
- ⁷J. D. Wheeler et al. On the relevance of analytical film thickness EHD equations for isothermal point contacts: Qualitative or quantitative predictions? *Friction* (2016). doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-016-0133-7>.
- ⁸S. Bair et al. An improved Yasutomi correlation for viscosity at high pressure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* (2013). doi: 10.1177/1350650112474394.
- ⁹W. Habchi et al. Influence of pressure and temperature dependence of thermal properties of a lubricant on the behaviour of circular TEHD contacts. *Tribology International* (2010). doi: 10.1016/j.triboint.2009.10.002.
- ¹⁰S. N. Ndiaye et al. A Quantitative Friction-Based Approach of the Limiting Shear Stress Pressure and Temperature Dependence. *Tribology Letters* (2017). doi: 10.1007/s11249-017-0929-2.
- ¹¹J. Zhang, H. Spikes. Measurement of EHD Friction at Very High Contact Pressures. *Tribology Letters* (2020). doi: 10.1007/s11249-020-1281-5.
- ¹²T. Doki-Thonon. Thermal effects in elastohydrodynamic spinning circular contacts. *Doktorego tesia*. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2012.