

# Revisión sistemática de literatura. Caso de estudio: Modelamiento de un par deslizando con fines de predecir desgaste

## Systematic literature reviews. Case of study: Modeling of a rubbing pair for wear purpose

J. S. Rudas<sup>1</sup>, L. M. Gómez<sup>2</sup>, A. O Toro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>MS c, Grupo de Investigación en Sistema Dinámicos Kalman y Grupo de Investigación en Tribología y Superficies, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, jsrudas@unal.edu.co

<sup>2</sup>Ph D, Grupo de Investigación en Sistema Dinámicos Kalman, Docente Escuela Mecatrónica, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.

<sup>3</sup>Ph D, Grupo de Investigación en Tribología y Superficies, Docente Escuela de Materiales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.

Recibido 08/05/13, Aceptado 22/06/2013

### RESUMEN

El daño progresivo que se produce en la superficie de un componente como resultado de su movimiento relativo a las partes adyacentes de trabajo, tiene profundas consecuencias económicas que implican no sólo los costes de sustitución, sino también los gastos relacionados con la inactividad de la máquina y pérdida de producción. En este artículo se presenta la implementación de un método para la revisión sistemática de literatura con el fin de establecer las metodologías con las que se aborda el modelamiento del proceso de desgaste entre sólidos deslizando y el estado actual de dicha temática de investigación. La revisión sistemática de literatura es una nueva opción en la recopilación y análisis de bibliografía en ingeniería. Con esta metodología de búsqueda, recopilación, clasificación y análisis de información se logra reducir el tiempo y el esfuerzo para el planteamiento de una problemática de investigación. En el presente artículo se analizaron 50 estudios que cumplían las restricciones de la metodología de búsqueda, además se concluye que el modelamiento de las dinámicas termomecánicas presentes en un par deslizando no es aún un tema consolidado, que no se identifican con claridad cuáles son las variables que relacionan de forma directa la generación de fenómenos térmicos en el proceso y la variación de la tasa de desgaste.

**Palabras clave:** Revisión sistemática de literatura, Metodología de búsqueda, Modelamiento de procesos, Deslizamiento entre sólidos, Fricción.

### ABSTRACT

The progressive damage which appears at a component surface as a result of its relative motion with respect to the adjacent working parts, has deep economic consequences which imply not only the replacement costs, but also the expenses related to the stopping of the machine and the losses of the manufacturing process. This paper presents the implementation of a method for systematic reviewing of the literature aimed to establishing the suitable methodologies for abording the modelling of the wearing process between sliding pieces, and the current state of the research related to such a subject. Systematic literature reviewing is an alternative for collecting and analyzing of engineering-related bibliography. With such a methodology, which is aimed to searching, collecting, classification, and analysis of information, it is possible to reduce time and effort when posing a research problem. This work surveyed about fifty papers, which meet the constraints related to the searching methodology. Besides, it is concluded that the modeling of the thermodynamic phenomena related to sliding pieces is far from being a consolidated subject, and that the identification of the involved variables and the relationship between the thermal phenomena and the changing of the wearing rate is not clear yet.

**Keywords:** Systematic literature review, Search methodology, Process modeling, Rubbing pair, Friction.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desgaste, el daño progresivo y la pérdida de material que se produce en la superficie de un componente como resultado de su movimiento relativo a las partes adyacentes de trabajo, tiene profundas consecuencias económicas que implican no sólo los costes de sustitución, sino también los gastos relacionados con la inactividad de la máquina y pérdida de producción. Se tienen estudios que presentan que alrededor de un tercio del consumo total de energía mundial, se pierde en el rozamiento entre sólidos [1]; como resultado, se han gastado esfuerzos considerables en el desarrollo de teorías y modelos que den herramientas para disminuir el desgaste por el deslizamiento entre sólidos.

Meng & Ludema [2] desarrollaron una pesquisa bibliográfica en búsqueda de las ecuaciones y modelos de fricción y desgaste. Tuvieron en cuenta los trabajos publicados entre 1957 y 1992 en la Revista "Wear", además consideraron los artículos de la conferencia "Wear of Materials" entre 1977 y 1991. Hallaron 5466 trabajos publicados (4726 *Wear* – 740 *Wear of Materials*) para un total de 5325 autores. De la totalidad de artículos estudiados por Meng & Ludema más de la mitad de los trabajos realizaron un análisis observacional, mediante el uso de microscopios o diferentes instrumentos de análisis, y una gran mayoría realizaron modelos descriptivos verbales. Meng & Ludema encontraron alrededor de 300 ecuaciones (o modelos), las cuales relacionaban más de 182 variables, en las que intervienen una gran cantidad de propiedades del material y las condiciones de funcionamiento de un sinnúmero de procesos industriales tanto de manufactura, generación de energía, como domésticos y de transporte. Esta situación demuestra lo complejo del fenómeno, pero por otra parte demuestra que la comunidad investigativa que estudia el fenómeno no ha llegado a un consenso estricto, aun cuando todas sus propiedades físicas y químicas se hayan establecido independientemente con suficiente antelación, el cual proponga o determine cuantitativamente qué variables son influyentes en el proceso, y así depurar según la importancia de cada variable estudiada.

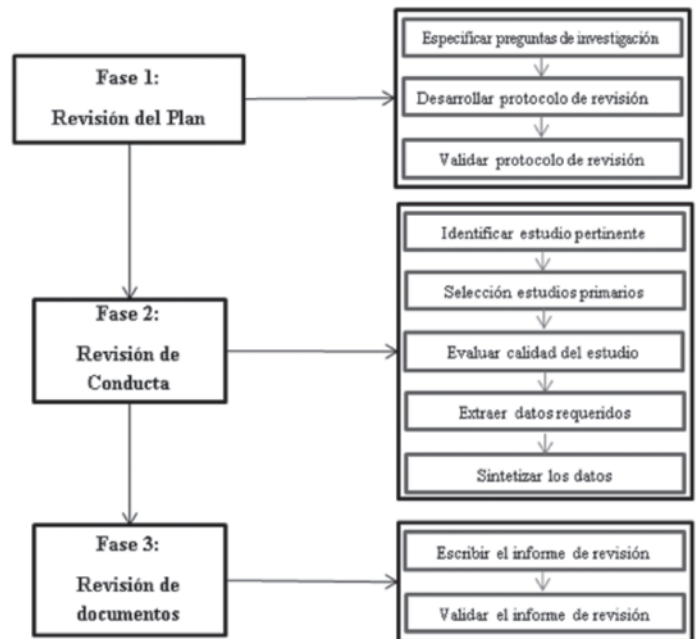
De acuerdo con lo anterior, uno de los retos que enfrenta la comunidad de investigación es la producción de un marco teórico sólido para respaldar los estudios referentes al desgaste de sólidos en deslizamiento. Se tiene que la experimentación ha sido la metodología más utilizada en el estudio de pares deslizantes, dando como resultado gran número de ecuaciones constitutivas que representan el fenómeno, mas no lo explican y ni mucho menos llegan a predecirlo [3, 4, 5, 6, 7]. Adicionalmente, los modelos analíticos (dinámicos y estáticos), y los modelos computacionales han jugado un papel importante ante la elaboración de observaciones relevantes en la temática de desgaste de sólidos en deslizamiento; sin embargo, el modelamiento dinámico ha sido una metodología pobremente utilizada en la búsqueda de explicar y predecir el desgaste en sólidos.

Con el fin de determinar el estado actual del modelado de las dinámicas estudiadas en un par deslizante con fines de predecir desgaste, en este artículo se realiza una revisión sistemática de literatura, utilizando para ello una metodología especialmente diseñada para tal fin [8]. El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera, en la Sección II se describe en qué consiste la revisión sistemática de literatura (RSL), en la Sección III se presentan los resultados de la búsqueda, en la Sección IV se responden las preguntas de investigación a la luz de los resultados obtenidos, en la Sección V se plantean preguntas emergentes de investigación y finalmente en la Sección VI se concluye.

## 2. METODOLOGÍA

El método de revisión sistemática de literatura se basa en la metodología propuesta por Barbara Kitchenham y otros en [8, 9], esta metodología tiene sus raíces en revisiones bibliográficas realizadas para Ciencias Humanas y Medicina [8, 9], pero en los últimos años se han propuesto adaptaciones para otras disciplinas como la ingeniería [10, 11, 12, 13]. El proceso global de búsqueda consiste en tres fases: 1) planificación de la búsqueda, 2) realización de la búsqueda y, 3) presentación del informe de revisión. Ver figura 1.

Figura 1. Proceso de revisión sistemático de literatura.  
Figure 1. Systematic literature review process.



A continuación se describe los lineamientos más importantes de las fases presentadas en la figura 1 para la realización del proceso de revisión sistemática de literatura. Preguntas de investigación

Las preguntas de investigación son el paradigma bajo el cual se estudia y clasifica el material bibliográfico encontrado en la posterior búsqueda, es decir, bajo la luz de estas preguntas se leen los estudios seleccionados en la búsqueda. Dichas preguntas son planteadas de forma tal que dejarán entrever la metodología utilizada por cada autor en la solución del problema y es un filtro la bibliografía. A continuación se presentan las preguntas de investigación:

- P1: ¿Cuál es el papel del modelamiento dinámico en procesos de deslizamiento entre sólidos?
- P2: ¿Cuáles son los enfoques teóricos y metodológicos existentes en el desarrollo de modelos dinámicos en procesos de desgaste de un par deslizante?
- P3: ¿Qué variables se han tenido en cuenta en el modelado dinámico en procesos de desgaste?
- P4: ¿Cómo han sido validados los modelos desarrollados para el proceso de deslizamiento entre sólidos?

### Proceso de búsqueda

El proceso de búsqueda consiste en realizar una pesquisa de literatura que permita encontrar estudios relacionados con la temática principal de investigación, que para el presente caso es: “Modelamiento de la dinámica termomecánica presente en un par deslizante con fines de predecir desgaste”. Además, se delimita la búsqueda definiendo un intervalo temporal de publicación, es este caso entre los años 1995 al 2012, con el fin de identificar cual ha sido la mirada actual del problema de investigación, definir las últimas metodologías empleadas en la solución del problema y corroborar que el problema sea de interés actual. Para realizar la búsqueda se utiliza la base de datos bibliográfica *Scopus*, parte de una de las colecciones en línea de investigación científica más grandes del mundo *ScienceDirect*, administrado y operado por la editorial *Elsevier*. También se realiza una búsqueda en la *Web of Knowledge* de la corporación *Thomson Reuters*.

La primera cadena de búsqueda se diseña basada en el título y campo de acción de la temática estudiada en este artículo: Modelamiento de la dinámica termomecánica presente en un par deslizante con fines de predecir desgaste. Con los resultados obtenidos en la búsqueda previa se filtran las cadenas de búsqueda siguientes considerando los títulos, sus palabras clave y los estudios referenciados en la bibliografía que arrojó estas primeras búsquedas. Finalmente se define unas palabras clave que logren abarcar un amplio espectro de la temática de interés.

Las palabras clave que se utilizaron para la revisión sistemática del presente trabajo, fueron:

- “Mathematical Modeling” AND “Sliding”
- “Mathematical Modeling” AND “Thermal profile”
- “Sliding Wear” AND “Modeling friction”

- “Dynamic System” AND “Wear”
- “Wear Equation” AND “Pin-on-Disc”
- “Thermodynamical Degradation”

En la tabla 1 se presenta la lista de revistas seleccionadas en la revisión sistemática de literatura, en las cuales se publicó al menos un artículo.

**Tabla 1.** Revista seleccionadas en la RSL.  
**Table 1.** Journal selected in RSL.

| Revista   | Número de Artículos |
|---|---------------------|
| Wear  | 17                  |
| Tribology International                                   | 5                   |
| Entropy   | 2                   |
| International Journal of Solids and Structures            | 2                   |
| Journal of Sound and Vibration                            | 2                   |
| Proceedings of the Royal Society A                        | 2                   |
| Tribology Letters   | 2                   |
| Applied thermal engineering                               | 1                   |
| Biological Cybernetic                                     | 1                   |
| FME Trans   | 1                   |
| Heat Mass Transfer  | 1                   |
| Int. J. Heat Mass Transfer                                | 1                   |
| International Journal of Machine Tools & Manufacture      | 1                   |
| International Journal of Materials and Product Technology | 1                   |
| Journal of Applied Physics                                | 1                   |
| Journal Mechanics and Physics of Solids                   | 1                   |
| Journal of Electronic Packaging                           | 1                   |
| Journal of Materials Processing Technology                | 1                   |
| Journal of the Mechanics and Physics of Solids            | 1                   |
| Journal of Theoretical and Applied Mechanics              | 1                   |
| Journal of Thermal Science                                | 1                   |
| Materials and Design                                      | 1                   |
| Mechanics of Materials                                    | 1                   |
| Metallurgical Transactions                                | 1                   |
| Scripta Materialia  | 1                   |

### C. Clasificación de la bibliografía encontrada

Los artículos estudiados se clasificaron según el año de publicación, la revista donde fue publicado, la cantidad de citas que presenta cada artículo en *Scopus* y en *Journal Citation Reports*, y en la metodología utilizada en el desarrollo de cada trabajo, reportando si el artículo presenta un análisis desde la investigación experimental (Aplicado - AP) o un análisis desde el cálculo teórico (Teórica - TE) según la clasificación que propone Patankar [46]. La taxonomía propuesta por Patankar se presenta a continuación:

#### 1) Investigación experimental (Aplicado - AP)

Mucha de la información de los procesos o fenómenos físicos que necesita conocer el ingeniero para la solución de un problema específico se obtiene a través de mediciones. Estas mediciones generalmente son realizadas en prototipos de menor tamaño, debido a los altos costos que implicaría la medición en equipos a escala natural. Por tanto, la información obtenida en estos prototipos a pequeña escala deberá ser analizada con métodos estadísticos o cualquier otra herramienta computacional para el tratamiento de los datos.

#### 2) Cálculo teórico (Teórica - TE)

Otra forma de obtener información acerca de un fenómeno es por medio de una predicción teórica, que se fundamenta en un modelo matemático, el cual consiste en una serie de ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno con sus correspondientes condiciones de frontera y condiciones iniciales, en caso de un fenómeno en estado transitorio. Existen a su vez dos maneras de obtener la solución a este modelo matemático; a través de la matemática clásica, en cuyo caso se obtiene una solución analítica o por medio de métodos numéricos, en cuyo caso se obtiene una solución discreta y particular; es decir, solo se tiene el valor de la variable de interés en algunos puntos del dominio.

Finalmente, y después de clasificar los estudios recopilados en la revisión sistemática de literatura, se procede a evaluar los estudios intentando entrever como pueden dar respuesta a cada una de las preguntas de investigación, anteriormente planteadas. No todos los artículos darán respuesta a todas las preguntas de investigación pero se espera que sí a la mayoría de ellas. He aquí un método de corroborar que las preguntas planteadas sí son correctas dado que extraen, de los artículos recopilados, la información buscada. De forma tal que se pueda concluir el estado actual de la problemática de investigación de interés.

### 3. RESULTADOS

Al utilizar la metodología de revisión sistemática de literatura descrita en la Sección II se encontraron alrededor de 97 artículos y se seleccionaron finalmente 50 los cuales estaban más cerca de la temática "Modelamiento de la dinámica termomecánica presente en un par deslizante con fines de predecir desgaste" y cumplían las limitantes planteadas para la revisión sistema. Las fechas de publicación de los artículos seleccionados están en el intervalo de tiempo estudiado; esto es, 1995-2012. Los 47 artículos descartados no cumplían el intervalo de año de publicación o no respondían a ninguna de las preguntas de investigación. El artículo más citado es el escrito por Meng y Ludema [2] con 190 citas, publicado en 1995. El 34% de los artículos fueron publicados en la revista internacional *Wear*, el 10% fueron publicados en la revista *Tribology International*, ambas revistas pertenecen a la Editorial Elsevier.

De la totalidad de publicaciones estudiadas 10 (el 20%) tienen más de 40 citas. En general, se tiene que la investigación experimental, la caracterización de materiales y el posterior modelamiento estadístico son el método más utilizado para el estudio de pares deslizantes, siendo el cálculo teórico, representado en el modelado analítico, una herramienta básica en el entendimiento del proceso. En la tabla 2 se presenta el reporte de los artículos obtenidos en el proceso de revisión sistemática de literatura, clasificados por nombre de los autores, año de publicación, metodología utilizada (según la clasificación expuesta anteriormente) y la cantidad de citas que el artículo reporta en la base de datos *Scopus* ó en *Journal Citation Reports*.

**Tabla 2.** Estudios seleccionados en la RSL.

**Table 2.** Studies selected on RSL.

| Ref. | Revista                                 | Año  | Metod. | Citas |
|------|---|------|--------|-------|
| [2]  | Meng, H. C., and Ludema, K.C.           | 1995 | TE     | 190   |
| [1]  | A. Molinari & U. G. Straffellini et al. | 1997 | TE- AP | 84    |
| [46] | R.A. Ibrahim & C.L. Pettit              | 2005 | AP     | 83    |
| [14] | Basaran & C.Y. Yan                      | 1998 | TE-AP  | 73    |
| [36] | Koji Kato                               | 2000 | TE     | 60    |
| [30] | J.A. Williams                           | 1999 | TE     | 56    |
| [31] | Jiaren Jiang & F. H. Stott et al.       | 1998 | TE-AP  | 53    |
| [32] | Jiaren Jiang & F.H. Stott et al.        | 1995 | TE     | 50    |
| [15] | C. Hsieh & Y.-C. Pan                    | 2000 | TE     | 46    |
| [21] | F.H. Stott                              | 2002 | AP     | 43    |
| [35] | K. Hackl & F. D. Fischer                | 2008 | TE     | 31    |

|      |                                     |      |       |    |
|------|-------------------------------------|------|-------|----|
| [27] | H. K. Hong & C.S. Liu               | 2000 | TE    | 28 |
| [42] | M.D Bryant & M.M Khonsari et al.    | 2008 | TE    | 27 |
| [19] | Eui-Sung Yoon, Hosung Kong et al.   | 1997 | AP    | 22 |
| [23] | H. A. Abdel-Aal                     | 2003 | TE    | 16 |
| [52] | W. Yan & N. P. O'Dowd et al.        | 2002 | TE    | 15 |
| [3]  | A. Yevtushenko & O. Ukhanska et al  | 1996 | TE    | 14 |
| [49] | S.L. Rice & F.A. Moslehy            | 1997 | TE    | 14 |
| [5]  | A. Zmitrowicz.                      | 2006 | TE    | 13 |
| [26] | H. A. Abdel-Aal.                    | 2000 | TE    | 12 |
| [33] | K.H. Zum Gahr.                      | 1998 | TE    | 12 |
| [18] | Dae-Cheol Ko & Byung-Min Kim        | 2000 | TE    | 11 |
| [39] | M. Nosonovsky                       | 2010 | TE    | 10 |
| [51] | V. Hegadekatte & N. Huber et al     | 2006 | TE    | 10 |
| [17] | D.M. Kennedy & M.S.J. Hashmi        | 1998 | TE    | 9  |
| [29] | H. A. Abdel-Aal.                    | 2003 | TE-AP | 9  |
| [20] | F.F. Ling, M.D. Bryant et al.       | 2000 | TE    | 8  |
| [6]  | A. Zmitrowicz.                      | 1995 | TE    | 5  |
| [44] | N. Aderghal & T. Loulou             | 2011 | TE    | 4  |
| [16] | D. Ghosh & H. Basu et al.           | 1999 | TE-AP | 3  |
| [4]  | A. Zmitrowicz.                      | 2006 | TE    | 3  |
| [55] | H. A. Abdel-Aal.                    | 2011 | TE    | 3  |
| [24] | H. A. Abdel-Aal & S.T. Smith        | 1998 | TE    | 2  |
| [38] | M. Naderi & M.M. Khonsari           | 2012 | TE-AP | 2  |
| [41] | M., Amiri & M.M. Khonsari.          | 2012 | TE    | 2  |
| [54] | H. A. Abdel-Aal.                    | 2011 | TE    | 2  |
| [25] | H. A. Abdel-Aal                     | 1999 | AP    | 1  |
| [37] | L. Beghi & E. Xausa                 | 2008 | TE-AP | 1  |
| [40] | M. Nouari & M. E. Mansori et al.    | 2009 | TE-AP | 1  |
| [48] | S.K. Wang & J. Woodhouse            | 2011 | TE-AP | 1  |
| [53] | G.G. Adams & M. Nosonovsky          | 2002 | TE    | 1  |
| [28] | H. Egner.                           | 2012 | TE    | 0  |
| [43] | M.D, Bryant.                        | 2009 | TE    | 0  |
| [45] | R. A. Singh & G.S. Narasimham et al | 2002 | AP    | 0  |
| [50] | C. Viafara & A. Sinatora            | 2010 | TE    | 0  |
| [7]  | B. Aghdam & M.M. Khonsari           | 2011 | TE-AP | 0  |
| [22] | Guang-Neng Dong, Meng Hua et al     | 2007 | TE-AP | 0  |
| [34] | K.L. Doelling & F.F. Ling           | 2000 | TE-AP | 0  |

#### 4. DISCUSIÓN

A continuación se presenta la respuesta de las preguntas de investigación resueltas desde el análisis realizado a los estudios recopilados en la revisión sistemática de literatura.

##### P1 ¿Cuál es el papel del modelamiento dinámico en procesos de deslizamiento entre sólidos?

El modelamiento dinámico en procesos de deslizamiento entre sólidos ha permitido entender los fenómenos y principios que rigen este proceso, además han ayudado a predecir factores importantes como la tasa de desgaste en función de las fluctuaciones de propiedades mecánicas, térmicas y operativas del proceso. Los acercamientos metodológicos **más próximos** al modelamiento de las dinámicas termomecánicas presentes en un par deslizante lo realizan: *Abdel-Aal, H. A. [29]*, el cual presenta un estudio fenomenológico, exponiendo a la comunidad científica un modelo capaz de explicar los cambios en la tasa de desgaste del par deslizante. Ghosh, D., and Basu, H., et al. [16] desarrollan un modelo de transferencia térmica en el pin de un tribómetro Pin-Disco; Abdel-Aal, H. A. [25], también propone un modelo de transferencia térmica en un pin, relacionando los fenómenos térmicos con las propiedades mecánicas del pin. Por otro lado, Doelling, K.L., and Ling, F.F. [34], Aghdam, B., and Khonsari, M.M., [7] Amiri, M., and Khonsari, M.M. [41], Naderi, M., and Khonsari, M.M. [38] y Bryant, M.D, and Khonsari, M.M., et al. [42] abordan el problema del modelamiento de las dinámicas termomecánicas presentes en un par deslizante desde una mirada termodinámica, desarrollando postulados los cuales relacionan la variación de la tasa de desgaste en un proceso de deslizamiento entre sólidos en función del aumento y/o reducción de la entropía generada por el contacto deslizante. Finalmente estudios desarrollados por Zum Gahr, K.H. [33], Molinari, A., and Straffellini, U. G., et al. [1], Zmitrowicz, A., [6], Hsieh, C. and Pan, Y-C. [15], Kennedy, D.M. and Hashmi, M.S.J. [17] y Eui-Sung Yoon and Kong, H., et al. [19] plantean modelos matemáticos o ecuaciones constitutivas para predecir la tasa de desgaste en función de parámetros del sistema deslizante y fenómenos como la fricción.

##### P2 ¿Cuáles son los enfoques teóricos y metodológicos existentes en el desarrollo de modelos dinámicos en procesos de desgaste de un par deslizante?

En el estudio del desgaste generado por el deslizamiento entre sólidos se han establecido una gama de metodologías que han ayudado a establecer un conocimiento entorno al proceso, estas metodologías se

pueden clasificar en dos grupos: La experimentación, la cual incluye la caracterización de los materiales utilizados para las pruebas de laboratorio, y el modelamiento teórico.

Con el método experimental se pretende emular el proceso que se está estudiando a escala de laboratorio mediante tribómetros, con el fin de obtener una probeta que presente el mismo mecanismo de desgaste del proceso original. Con el modelamiento se procura explicar, entender y/o predecir algunas de las propiedades del proceso. Es común que después de realizar una experimentación se determinen correlaciones entre variables operacionales o parámetros del sistema obteniendo ecuaciones que representan y predicen pero no explican los fenómenos, correlaciones llamadas Modelos Empíricos. En la figura 2 se hace un compendio de las metodologías utilizadas en los estudios analizados en la revisión sistemática.

**Figura 2.** Metodologías utilizadas en el estudio de pares deslizantes.

**Figure 2.** Methodologies used in the study of sliding pairs.



P3 ¿Qué variables se han tenido en cuenta?

La revisión bibliográfica muestra que la variable más utilizada para estudiar los fenómenos de desgaste en pares deslizantes es la fricción (28%); la temperatura es la segunda variable más utilizada (24%). El único enfoque teórico que combina los mecanismos térmicos con propiedades mecánicas están son desarrollados desde una perspectiva termodinámica, y relacionan los efectos térmicos con los mecánicos en función de la variable entropía (15%). Un alto porcentaje de los estudios recopilados (31%) relacionan propiedades mecánicas como el módulo de Young, la dureza etc., con parámetros como la velocidad de deslizamiento, la carga o la geometría del sistema

En la Tabla 3 se presenta las variables utilizadas globalmente, la mayoría de trabajos relacionan varias de ellas.

**Tabla 3.** Variables más estudiadas entre los años 1995 -2012.

**Table 3.** Variables studied between the years 1995 -2012.

|                               |                                  |
|-------------------------------|----------------------------------|
| <b>Mecánica del Contacto</b>  | Área Real de Contacto            |
|                               | Módulo de Young                  |
|                               | Dureza                           |
| <b>Mecanismos de Desgaste</b> | Fluencia del Material            |
|                               | Resistencia a la Fractura        |
|                               | Dislocaciones/Defectos           |
| <b>Entropía</b>               | Temperatura Flash                |
|                               | Tasa de Generación de Energía    |
|                               | Conducción - Difusividad Térmica |

P4 ¿Cómo han sido validados los modelos?

De los modelos que presentan validación, 33 estudios (66%) son validados con ensayos en el tribómetro pin-disco, 12 (24%) son validados comparándolos con modelos publicados por otros autores y tenidos en cuenta en esta revisión. Los estudios restantes (5%) no son validados por ser *reviews* de la temática tratada.

#### 4.1 Preguntas emergentes de investigación

A partir de la revisión sistemática de literatura realizada, surgen varias preguntas emergentes de investigación de los resultados publicados. Es importante seguir investigando el fenómeno de desgaste en un par deslizante si desea dar solución a los siguientes planteamientos:

No se encuentra en la literatura un modelo dinámico que sume los efectos de los cambios térmicos con los cambios mecánicos para predicción de la tasa de desgaste y que sea validado experimentalmente. No se ha profundizado en el análisis de los cambios microestructurales generados por fluctuaciones en la temperatura que a su vez es inducida por la fricción entre los sólidos. Además, se tiene que se ha estudiado el fenómeno desde diferentes miradas pero no hay una metodología que una las variables más relevantes o influyentes en el aumento de la tasa de desgaste del par deslizante.

A partir de las afirmaciones anteriores, surge la siguiente pregunta: ¿Un modelo dinámico en espacio de estados de un par deslizante logra predecir mejor el desgaste de los materiales si se combinan las dinámicas térmicas y mecánicas?

#### 5. CONCLUSIONES

- En este artículo se presenta una revisión sistemática de literatura del estudio del fenómeno de desgaste en

un par deslizante. Se siguió metodologías de búsqueda sistemáticas reportadas en la literatura y basadas en métodos utilizados por Ciencias Sociales y Medicina, y en este caso, aplicados a la Ingeniería. Se obtuvo una base de datos de alrededor de 97 artículos los cuales fueron revisados bajo el paradigma de dar solución a unas preguntas de investigación nacidas por una búsqueda previa, teniendo como resultado una base filtrada de 50 artículos. Finalmente con estos estudios se realiza un recuento de lo que los autores proponen y se plantean preguntas emergentes de investigación, como la utilización del modelamiento dinámico en suma con la teoría de control moderna, o complementar modelos térmicos con modelos de mecánica de sólidos para realizar una mejor predicción del proceso de desgaste, que marcarían un camino no investigado ayudando y complementado lo desarrollado hasta ahora.

- Esta revisión sistemática de literatura presenta que el modelamiento de las dinámicas termomecánicas presentes en los materiales de un par deslizante no es aún un tema consolidado. La ingeniería de materiales es la ciencia que más acercamiento ha tenido en la búsqueda del entendimiento y predicción del proceso de desgaste generado por el rozamiento entre sólidos; por el contrario, ramas de la ingeniería aplicada como el control automático, el control inteligente, la identificación de sistemas o el modelamiento de sistemas dinámicos no han estudiado este proceso, esto se evidencia en los resultados de esta búsqueda donde un alto porcentaje de artículos estudiados son publicados en revistas de ingeniería de materiales. Se concluye además, que la aplicación de la metodología propuesta para realizar revisiones sistemáticas de literatura logran ahorrar tiempo y esfuerzo para los investigadores que están planteando su problemática de investigación y proporciona las líneas base para ayudar al desarrollo de futuras investigaciones en un área específica.

## REFERENCIAS

- [1] Molinari, A., Straffelini, U. G., et al., Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy, *Wear*, 208, 105–112, 1997.
- [2] Meng, H. C. and Ludema, K.C. Wear models and predictive equations: their form and content, *Wear*, 181-183, 443-457, 1995.
- [3] A. Yevtushenko & O. Ukhanska et al., Friction heat distribution between a stationary pin and a rotating disc, *Wear*, 196, 219-225, 1996.
- [4] Zmitrowicz, A., Wear patterns and laws of wear – a review, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 44 (2), 219-253, 2006.
- [5] Zmitrowicz, A., Models of kinematics dependent anisotropic and heterogeneous friction, *International Journal of Solids and Structures*, 43, 4407–4451, 2006. Doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.07.001.
- [6] Zmitrowicz, A., Constitutive models for anisotropic frictional heat, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 38 (3), 563-574, 1995.
- [7] Aghdam, B. and Khonsari, M.M., On the correlation between wear and entropy in dry sliding contact, *Wear*, 270, 781–790, 2011. Doi:10.1016/j.wear.2011.01.034
- [8] Khalid, K. S., Kunz, R., *Systematic Reviews to Support Evidence-based, Medicine*, Springer, 2003.
- [9] Petticrew, M., Roberts, H., *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide*, Blackwell Publishing, 2005.
- [10] Kitchenham, B.A., *Procedures for Undertaking Systematic Reviews*, Joint Technical Report, Computer Science Department, 2004, Keele University and National ICT Australia Ltd (0400011T.1).
- [11] Kitchenham, B.A., Charters, S., *Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering* Technical Report, EBSE-2007-01, 2007.
- [12] Kitchenham, B., Brereton, O.P. et al., Systematic literature reviews in software engineering – a systematic literature review, *Information and Software Technology*, 51, 7–15, 2009.
- [13] Sjøberg, D.I.K., Hannay, J.E. et al., A survey of controlled experiments in software engineering, *IEEE Transactions on Software Engineering*, 31 (9), 733–753, 2005.
- [14] Basaran, C., Yan C.Y., A thermodynamic framework for damage mechanics of solder joints, *Journal of Electronic Packaging*, vol. 120, 379–384, 1998.
- [15] Hsieh, C., Pan, Y.-C., Dynamic behavior and modeling of the pre-sliding static friction, *Wear*, 242, 1–17, 2000.
- [16] Ghosh, D., Basu, H., et al., Mathematical modeling of thermal profile generated in the sample during a pin-on-disc wear testing operation, *Scripta Materialia*, 40 (4), 417– 423, 1999.
- [17] Kennedy, D.M., Hashmi, M.S.J., Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 77, 246–253, 1998.
- [18] Dae-Cheol, K., Byung-Min, K., Development of an analytical scheme to predict the need for tool regrinding in shearing processes, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 1329–1349, 2000.

- [19] Eui-Sung, Y., Hosung, K., et al., Evaluation of frictional characteristics for a pin-on-disk apparatus with different dynamic parameters, *Wear*, 203 (20), 341-349, 1997.
- Ling, F.F., Bryant, M.D., et al., On irreversible thermodynamics for wear prediction, *Wear*, 253, 1165–1172, 2002.
- [20] Stott, F.H., High-temperature sliding wears of metals, *Tribology International*, 35, 489–495, 2002.
- [21] Guang-Neng, D., Meng, H., et al. Temperature field and wear prediction for UHMWPE acetabular cup with assumed rectangular surface texture, *Materials and Design*, 28, 2402–2416, 2007.
- [22] Abdel-Aal, H. A., On the interdependence between kinetics of friction-released thermal energy and the transition in wear mechanisms during sliding of metallic pairs, *Wear*, 254, 884–900, 2003.
- [23] Abdel-Aal, H. A., Smith, S.T., Thermal compatibility of metallic pairs in sliding contact, *Heat Mass Transfer*, 25 (5), 599-608, 1998.
- [24] Abdel-Aal, H. A., The deduction of friction-induced temperatures from thermal strain measurements in the dry sliding of metallic pairs, *Journal Therm. Sci.* 38, 160-164, 1999.
- [25] Abdel-Aal, H. A., The correlation between thermal property variation and high temperature wear transition of rubbing metals, *Wear*, 237, 147–151, 2000.
- [26] Hong, H. K., Liu, C.S., Coulomb friction oscillator: Modelling and responses to harmonic loads and base excitations, *Journal of Sound and Vibration*, 229 (5), 1171-1192, 2000.
- [27] Egner, H., On the full coupling between thermo-plasticity and thermo-damage in thermodynamic modeling of dissipative materials, *International Journal of Solids and Structures*, 49, 279–288, 2012.
- [28] Abdel-Aal, H. A., Efficiency of thermal energy dissipation in dry rubbing, *Wear*, 255, 348–364, 2003.
- [29] Williams, J.A., Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum Mechanics approach, *Wear*, 225, 1–17, 1999.
- [30] Jiang, J., Stott, F. H., et al., The roles of triboparticulates in dry sliding wear, *Tribology International*, 31 (5), 245–256, 1998.
- [31] Jiang, J., Stott, F.H., et al., A mathematical model for sliding wears of metals at elevated temperatures, *Wear*, 20-31, 181-183, 1995.
- [32] Zum, K.H.G., Wear by hard particles, *Tribology International*, 31 (10), 587–596, 1998.
- [33] Doelling, K.L., Ling, F.F., An experimental study of the correlation between wear and entropy flow in machinery components, *Journal Applied Physics*, 88 (5), 2999–3003, 2000.
- [34] Hackl, K., Fischer, F. D., On the relation between the principle of maximum dissipation and inelastic evolution given by dissipation potentials, *Proceedings Royal Society A*, 464, 117-132. 2008.
- [35] Kato, K., Wear in relation to friction — a review, *Wear*, 241, 151–157, 2000.
- [36] Beghi, L., Xausa, E., Modelling stereokinetic phenomena by a minimum relative motion assumption: the tilted disk, the ellipsoid and the tilted bar, *Biological Cybernetic*, 99, 115–123, 2008.
- [37] Naderi, M., Khonsari, M.M., Thermodynamic analysis of fatigue failure in a composite laminate, *Mechanics of Materials*, 46, 113–122, 2012.
- [38] Nosonovsky, M., Entropy in Tribology: in the Search for Applications, *Entropy*, 12, 1345-1390, 2010.
- [39] Nouari, M., Mansori, M.E., et al., Tribo-energetic correlation of tool thermal properties to wear of WC-Co inserts in high speed dry machining of aeronautical grade titanium alloys, *Wear*, 266, 432–443, 2009.
- [40] Amiri, M., Khonsari, M.M., On the role of entropy generation in processes involving fatigue, *Entropy*, 14 (1), 24-31, 2012.
- [41] Bryant, M.D., Khonsari, M.M, et al., On the thermodynamics of degradation, *Proceedings of the Royal Society A*, 464, 2001-2014. 2008.
- [42] Bryant, M.D, Entropy and dissipative processes of friction and wear, *FME Trans.*, 37, 55-60, 2009.
- [43] Aderghal, N., Loulou, T., Analytical and numerical calculation of surface temperature and thermal constriction resistance in transient dynamic strip contact, *Applied thermal engineering*, 31, 1557-1535, 2011.
- [44] Arvind, R. S., Narasimham, G.S., et al., Estimation of surface temperature of a pin wearing on a disk, *Tribology Letters*, 12 (4), 203-205, 2002.
- [45] Ibrahim, R.A., Pettit, C.L., Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners, *Journal of Sound and Vibration*, 279, 857–936, 2005.



- [46] Patankar, S. V., Numerical heat transfer and fluid flow, Editorial Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
- [47] Wang, S.K., Woodhouse, J., The frequency response of dynamic friction: A new view of sliding interfaces, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 59, 1020-1036, 2011.
- [48] Rice, S.L., Moslehy, F.A., Modeling friction and wear phenomena, *Wear*, 206, 136–146, 1997.
- [49] Viafara, C., Sinatora, A., Thermodynamic approaches in sliding wear: a review, En: *International Journal of Materials and Product Technology*, Suiza, 38 (1), 93-116, 2010.
- [50] Hegadekattea, V., Huber, N., et al., Modeling and simulation of wear in a pin on disc tribometer, *Tribology Letters*, 24 (1), 51-60, 2006.
- [51] Yan, W., O'Dowd, N. P., et al., Numerical study of sliding wear caused by a loaded pin on a rotating disc, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 50, 449-470, 2002.
- [52] Adams, G.G., Nosonovsky, M., Contact modeling – forces, *Tribology International*, 33, 431–442, 2002.
- [53] Abdel-Aal, H. A., *Thermodynamic Modeling of Wear*, Springer Science+Business Media, LLC, 2011.
- [54] Abdel-Aal, H. A., *Flash Temperature Theory*, Springer Science+Business Media, LLC, 2011.