



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Experimental and Computational Research on Hot Upsetting of Two-Grade Steel Rings

C. Obermann ⁽²⁾

G. Abate, A. Simoncelli, N. Antunez ^(1,2)

D. Martinez Krahmer, A. Pereyra Osenda ^(2, 3)

ABSTRACT

La temperatura utilizada en un proceso de forjado influye sobre los esfuerzos, la microestructura del material que se conforma y en menor medida sobre la fricción. Su incidencia puede cuantificarse experimentalmente mediante ensayos de compresión de anillo en una celda de forja instrumentada, y computacionalmente, a través de la técnica de simulación por elementos finitos empleando el software Simufact.Forming. Entonces, en este trabajo se compararon valores obtenidos de reducción de diámetro interno, de anillos mecanizados a partir de aceros laminados en caliente grados AISI 1010 y AISI 1020, con los coeficientes de fricción por simulación computacional y se analizó la influencia de la temperatura del herramental y la lubricación sobre el perfil deformado.

Key words — Forjado en caliente, temperatura, ensayo de compresión, ring test, simulación computacional.

1. INTRODUCCION

En la forja industrial, los esfuerzos de conformado son muy elevados [1]. De ahí la gran diferencia de tamaño existente entre la máquina principal de forja y la pieza forjada. Estas solicitaciones son soportadas por la estructura de la máquina y la matriz, manifestándose en la prensa mediante deformaciones elásticas [2] - [4] y en las matrices, por medio de deformaciones elásticas, plásticas y desgaste [5]. Asimismo, dado que el proceso es cíclico, ambas partes se encuentran sometidas a cargas de fatiga. Siendo la prensa el activo principal de toda empresa forjadora, y dado que las matrices constituyen el 10% de los costos de forja [6], es necesario implementar acciones para diseñar los procesos de forma segura y no afectar la vida útil de estos componentes tan importantes.

⁽¹⁾ Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Bs As, Argentina.

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ), Bs As, Argentina.

⁽³⁾ Facultad de Metalurgia, Universidad Nacional de Hurlingham (UNaHur), Bs As, Argentina.

Los procesos de forjado, son el foco de continuos avances tecnológicos. En Argentina, si bien se encuentra mayoritariamente desarrollado el proceso de forjado en caliente, muchos de los avances tecnológicos que son comúnmente usados en los países líderes, no se aplican [6]. Tal es el caso de la simulación computacional por Elementos Finitos [7] y la instrumentación de las máquinas principales de forja [8]. Estas herramientas son vitales para el desarrollo de piezas net shape o near net shape a través de la forja de precisión y requieren la caracterización del material en cuanto a su resistencia a la deformación, coeficiente de fricción entre pieza y matriz, y el conocimiento preciso de las cargas durante el proceso. La no aplicación de estos métodos de trabajo, culmina en la definición de los parámetros del proceso por el método clásico de prueba y error, basado en experiencias previas. Esta situación puede traer aparejada la posibilidad de sobrecargas en matrices y prensas, por inexactitudes en las estimaciones realizadas.

En cuanto a la fricción, las investigaciones apuntan a determinar el coeficiente en función de la terminación de las superficies en contacto [9] - [10], de la velocidad de deformación [11] y del tipo y espesor de óxido de hierro que se forma sobre el material a la temperatura de forja [12].

Con relación al ensayo de compresión de anillo, empleado para determinar el coeficiente de fricción a partir de una sencilla evaluación geométrica sobre el anillo comprimido, su diseño y metodología de ensayos corresponden a los trabajos de A. Male y M. Cocroft [13].

Un trabajo previo que tiene relación directa con el presente fue realizado por A. Sánchez Egea et al [14], aunque en esa oportunidad se trabajó a temperatura ambiente y 1400 K.

En consecuencia, para colaborar con el sector forjador de Argentina en el sentido indicado, Instituto Nacional de Tecnología Industrial ha incorporado un sistema de medición de cargas para forja compuesto por una prensa hidráulica de 200 t, un horno eléctrico de hasta 1250°C y una celda de carga de 1000 t. Considerando el impacto de la vida útil de las matrices sobre los costos de una pieza forjada, que muchas empresas forjadoras argentinas tienen una sola línea de forjado y siendo que en Argentina no se dispone de los medios para medir las cargas que las herramientas de simulación podrían ayudar a determinar, en este trabajo se han realizado de forma experimental y computacional ensayos de recalcado en caliente de anillos de dos grados de acero diferentes (AISI 1010 y AISI 1020), sometidos a distintos porcentajes de deformación y dos niveles de temperatura, con el objeto de ajustar un modelo virtual del citado proceso.

2. MATERIALES Y EQUIPOS

Los ensayos de compresión fueron realizados en una celda de forja constituida por una prensa hidráulica Diada de 200 t, sobre la que se encuentra instalada una celda de carga Toledo de 1000 t.

El calentamiento de los anillos fue realizado en un horno Indef (1.7 kW de potencia y temperatura máxima de 1250°C), mientras que el precalentamiento de la matriz inferior se realizó con una placa calefactora marca Indef (2.6 kW y temperatura máxima de 500 °C).



Figura 1 – Celda de forja compuesta por Horno, prensa, placa calefactora y celda de carga

La temperatura de la matriz inferior fue medida con una cámara termográfica marca Fluke, cuyo rango de medición es de 0°C hasta 650°C.

El lubricante utilizado fue una solución de grafito en agua con una concentración del 6% aplicado por pulverización sobre la superficie de la matriz inferior a una temperatura superficial de 160°C.

Para efectuar el ensayo de compresión se utilizaron placas de recalcado de acero AISI H13 templadas y revenidas a 52 HRC rectificadas a una rugosidad media aritmética $R_a = 0,6 \mu\text{m}$.

Las probetas que fueron comprimidas a una velocidad de 1.3 mm/s correspondieron a anillos cilíndricos de las siguientes medidas nominales: 19.3 mm de diámetro exterior, 9.5 mm de diámetro interior y 6.3 mm de altura, torneados a partir de barras laminadas en caliente de aceros AISI 1010 y AISI 1020.

Tabla 1: Composición química de los aceros utilizados en el ensayo de compresión de anillo

Composición Química Nominal (% en peso)						
Acero	C	Mn	P	S	Fe	HV1
AISI 1010	0.08 - 0.13	0.30 - 0.60	≤ 0.04	≤ 0.05	Balance	100
AISI 1020	0.18 - 0.23	0.30 - 0.60	≤ 0.04	≤ 0.05	Balance	115

2.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se comprimieron un total de 36 anillos, correspondientes a la combinación de tres grados de deformación, dos temperaturas de calentamiento del material, dos grados de acero y tres repeticiones. Mientras que la matriz inferior fue precalentada sobre una placa calefactora, hasta alcanzar 160° sobre su superficie, y lubricada con un spray de grafito en agua, la matriz superior no fue precalentada ni lubricada.

Tabla 2: Factores y sus correspondientes niveles para el ensayo de compresión de anillo

Total de muestras	Deformación $(h_i - h_f)/h_f$ (%)	Temperatura (°C)	Aceros utilizados	N° de Repeticiones
36	25, 40 y 50	800 y 1200	AISI 1010 y 1020	3

Para la realización de las compresiones se sujetaron tres probetas sobre un dispositivo de acero inoxidable diseñado al efecto, para disminuir los tiempos de contacto entre los anillos y la matriz inferior. Los anillos y el dispositivo fueron calentados dentro del horno y luego trasladados con una pinza de acero inoxidable hasta la superficie de la matriz inferior dentro de la prensa hidráulica. De todas las muestras se registraron las dimensiones geométricas Radio interior inicial (R_i), altura inicial (h_i) y posterior al conformado radio interior final (R_f) y altura final (h_f).

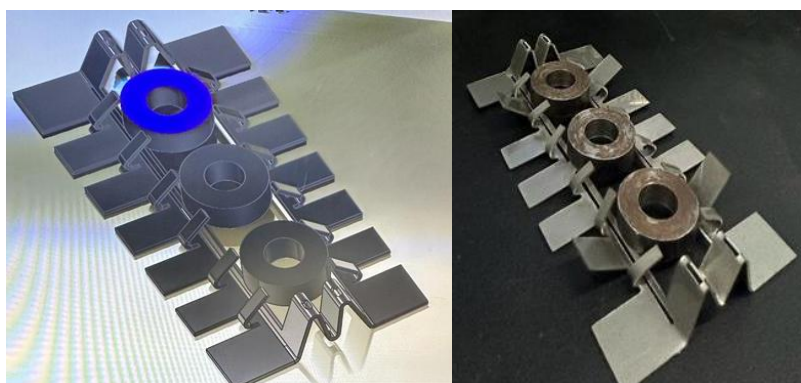


Figura 2 – Dispositivo para la sujeción de las probetas

2.2 SIMULACION POR ELEMENTOS FINITOS

Se efectuaron simulaciones por elementos finitos con el software Simufact.Forming con el objetivo de comparar el comportamiento de los anillos comprimidos en la prensa con anillos virtuales, y a partir de allí estimar el coeficiente de fricción resultante.

A partir de la aplicación de la herramienta de simulación se evaluaron seis grados de deformación para cuatro niveles de fricción comprendidos entre $\mu=0.12$ y $\mu=0.18$ y dos temperaturas, constituyendo 48 puntos con los que se trazaron las curvas de calibración que vinculan el coeficiente de fricción con la reducción porcentual de radio interno $(R_i-R_f)/R_i$ de las probetas en función del grado de compresión $(h_i-h_f)/h_i$ observables en la Figura 7.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

La compresión de los anillos en el dispositivo flexible disminuyó el tiempo de contacto contra la matriz inferior limitando la transferencia de calor por conducción, sin interferir en su libre deformación. Por su parte las simulaciones por elementos finitos permitieron regular en que momento de la carrera el soporte deposita los anillos sobre la matriz inferior.

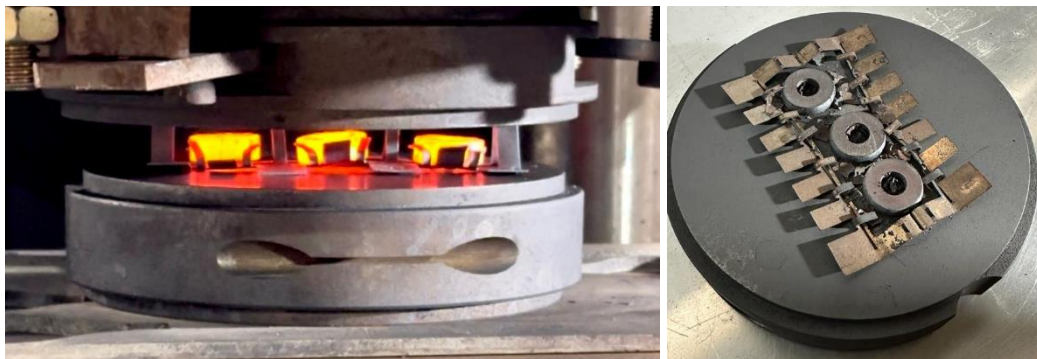


Figura 3 – Comportamiento del soporte flexible de los anillos

Dada la deformación que se produce en el dispositivo de sujeción de las probetas solo en las condiciones de mayor deformación no fue posible reutilizarlos.

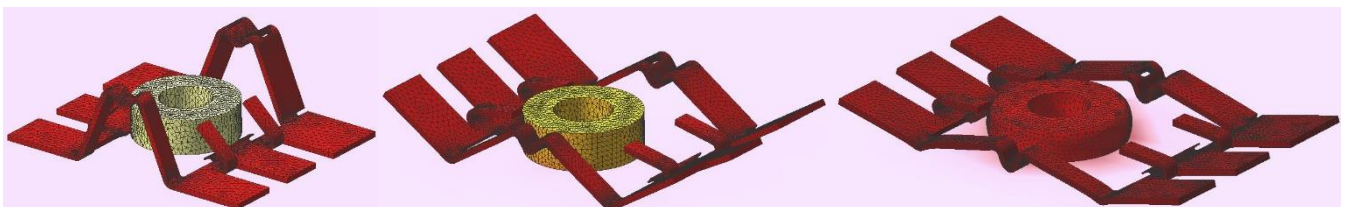


Figura 4 – Simulación del comportamiento del soporte flexible de los anillos

El proceso de deformación registrado con imágenes termográficas nos muestra la temperatura del herramental superior e inferior. Sin embargo, por su rango de medición no fue posible aplicarlo a la medición de los anillos.

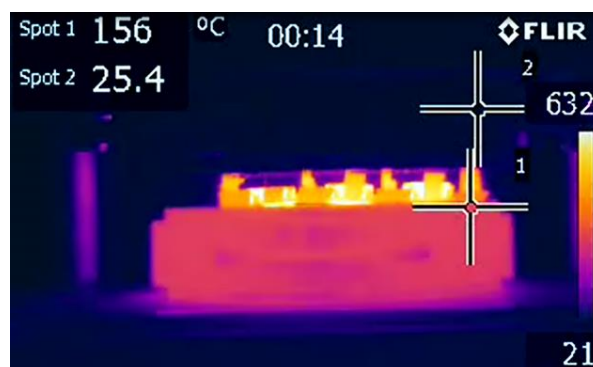


Figura 5 – Termografía obtenida durante el proceso de deformación

La matriz inferior, sobre la cual se aplicó el lubricante se encontró a una temperatura en promedio de unos 156°C en el momento de la deformación. La matriz superior, que no fue precalentada ni lubricada, se midió una temperatura de unos 25°C.

3.1 Determinación del coeficiente de fricción en relación con la simulación

Todos los anillos fueron relevados geoméricamente antes y después de ser deformados. Con los valores iniciales se calcularon la reducción de diámetro interno y la variación de altura, para los tres grados de deformación analizados, las dos temperaturas y los dos tipos de acero utilizados.

En la figura siguiente se muestran la totalidad de los ensayos experimentales. Se realizaron cuatro ajustes exponenciales para cada material a las dos temperaturas ensayadas.

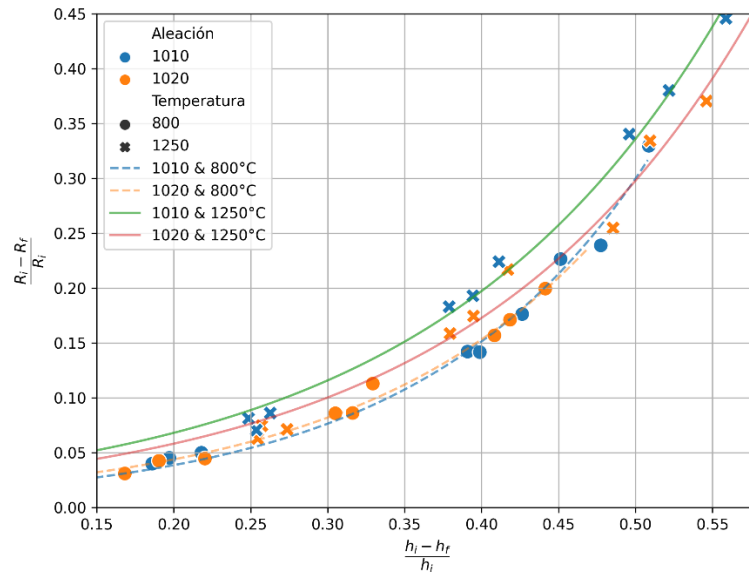


Figura 6 - Gráfica de reducción % de diámetro interno vs grado de deformación

La reducción del diámetro interno fue mayor para todas las probetas ensayadas a la temperatura de 1250°C lo cual puede observarse en las curvas de trazo continuo, en tanto que, con relación al tipo de acero, no se pudieron apreciar diferencias significativas sobre la reducción de diámetro.

Sobre las curvas obtenidas por simulación para coeficientes de fricción entre $\mu=0.12$ y $\mu=0.18$ se superpusieron los datos experimentales. Analizando la Figura 7, para la temperatura de 800°C, el comportamiento de ambos aceros (AISI 1010 y AISI 1020) con relación a la reducción de diámetro interno no muestra diferencias significativas y muestran un buen ajuste con la curva simulada de $\mu=0.14$.

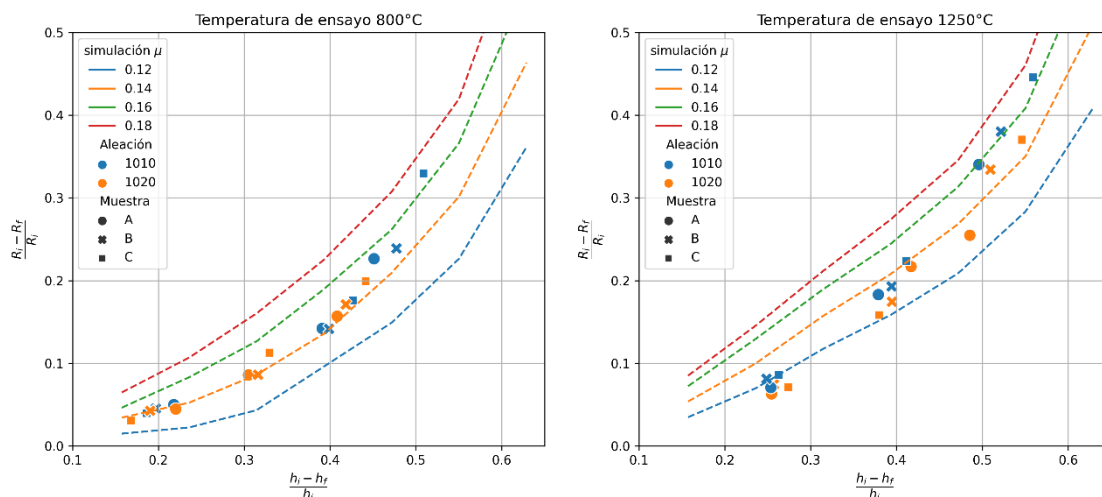


Figura 7 - Coeficiente de fricción obtenido por simulación para 800°C y 1250°

En un análisis similar a 1250°C, el comportamiento de ambos aceros con relación a la reducción de diámetro fue similar. Sin embargo, a medida que aumenta el porcentaje de deformación, los coeficientes de fricción también lo hacen partiendo de valores cercanos a 0.12 para deformaciones entre el 15% y el 20% y alcanzando casi 0.18 para deformaciones mayores al 50%.

6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- La utilización del dispositivo para la sujeción de las probetas redujo el tiempo de contacto entre los anillos y la matriz inferior, ampliando las posibilidades en cuanto a disminuir el tamaño de las probetas, o utilizar máquinas de baja velocidad de desplazamiento.
- Utilizar arreglos de tres compresiones efectuadas en simultáneo permite adecuar la escala de medición para tener condiciones registrables.
- Se puede observar una mayor reducción de diámetro conforme aumenta la temperatura del conformado de los anillos. Este aspecto puede ser observado tanto en las muestras experimentales como así también en las simulaciones realizadas.

ACKNOWLEDGMENT

Los autores de este trabajo desean agradecer al Dr. Mauro Martín de Acindar por facilitarnos los aceros ensayados y al Ing. Alberto Forcato de Fuchs por la donación del grafito utilizado durante las pruebas.

References

- [1] BONNEMEZON A. y MARTINEZ KRAHMER D, *Práctica Industrial de la Forja en Caliente*, Editorial Nueva Librería, Buenos Aires, 2012
- [2] MARTINEZ KRAHMER D. et al, Short-Cut Method to Assess a Gross Available Energy in a Medium-Load Screw Friction Press, *Metals* 2018, 8, 173; DOI: 10.3390/met8030173.
- [3] DEMEC P, PALASCAKOVA D. Simplified Calculation of the Eccentric Press Stiffness. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 613, Trans Tech Publications, Ltd., Aug. 2014, pp. 402–407. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.613.402.
- [4] MARTINS V, von PRITZELWITZ P, SINATORA A e SCHAEFFER L. Avaliação de tensões em uma prensa de 750 t com auxílio de um software CAE. *Corte & Conformação de Metais – Abril 2011*
- [5] ZHENG X et al (2023). Die wear analysis and pre-forging process optimization of hot forging for automobile flange fork. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 126. 1-16. 10.1007/s00170-023-11235-1.
- [6] BONNEMEZON A, ABATE G y MARTINEZ KRAHMER D, *Ingeniería del Forjado Moderno*, Veicorgraf, Buenos Aires, 2014
- [7] HAWRYLUK, M et al. Analysis of the Industrial Process of Producing a Hub Forging Used in Motorcar Power Transmission Systems—A Case Study. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021, 5, 32. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020032>
- [8] DURAND C et al. Contribution to characterization of metal forming machines: application to screw presses. *Procedia Manufacturing*, Volume 15, 2018, Pages 1024-1032, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.391>.
- [9] KIM H. et al, Effects of surface finish and die temperature on friction and lubrication in forging, *Procedia Engineering* 81 (2014).
- [10] CRISTINO V. et al, The Role of Interfaces in the Evaluation of Friction by Ring Compression Testing, *Experimental Techniques* 39 (2015).
- [11] ASAI K. et al, Estimation of frictional property of lubricants for hot forging of steel using low-speed ring compression test, *Procedia Engineering* 81 (2014).
- [12] BEHRENS B. et al, Sensitivity Analysis of Oxide Scale Influence on General Carbon Steels during Hot Forging, *Metals* 2018, 8, 140; DOI: 10.3390/met8020140.
- [13] MALE A, COCROFT M. A method for the determination of the coefficient of friction of metals under condition of bulk plastic deformation, *J. Inst. Metals* 1964-1965, 93, pp. 38-46.
- [14] SANCHEZ EGEA A, MARTYNENKO V, ABATE G, MARTINEZ KRAHMER D. Friction capabilities of graphite-based lubricants at room and over 1400 K temperatures. *Int J Adv Manuf Technol* 102, 1623–1633 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03290-4>