

Análisis crítico de la caracterización de los anillos de crimpado de amortiguadores neumáticos, destacando las discrepancias entre los resultados de los experimentos y los valores teóricos obtenidos de la base de datos del simulador ABAQUS.

1

A. Avila¹, G. Leo-Avelino²

Resumen – Se realiza la evaluación crítica del proceso de caracterización utilizado para los anillos de crimpado de los amortiguadores neumáticos, son componentes clave para la integridad estructural y el rendimiento de los sistemas de suspensión de los vehículos. La caracterización precisa de los anillos de crimpado es esencial para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, ya que los errores en esta fase pueden comprometer tanto la durabilidad del componente como la eficacia del amortiguador.

Para esto, se realizaron ensayos físicos con los anillos de crimpado y con los anillos de soporte para comparar su comportamiento mecánico real con los resultados teóricos obtenidos en estudios anteriores. El objetivo principal fue la comparación de las curvas teóricas de tensión-deformación actualmente disponibles en la base de datos del simulador ABAQUS con las curvas obtenidas experimentalmente. Como resultado, se identificaron discrepancias significativas entre ambos conjuntos de datos, evidenciando una clara divergencia en la respuesta del material a las cargas aplicadas.

Estas diferencias sugieren deficiencias durante la caracterización previa de los anillos de crimpado, posiblemente atribuibles a la elección de modelos constitutivos simplificados o a suposiciones poco realistas sobre la homogeneidad del material. Comportamiento o condiciones de ensayo que no representaban el entorno operativo real.

El análisis concluye destacando la importancia de realizar una caracterización adecuada de los materiales implicados, no sólo para mejorar la precisión de los modelos predictivos, sino también para optimizar el diseño y la fiabilidad de los sistemas de suspensión neumática.

Índice de Términos – Amortiguador neumático, esfuerzo-deformación, estrés de material.

I. INTRODUCCIÓN

Los amortiguadores neumáticos son elementos indispensables en el sistema de suspensión de un vehículo, ya que son los encargados de controlar las vibraciones y mantener la estabilidad del vehículo durante la conducción. Un aspecto de suma importancia para el buen funcionamiento del amortiguador neumático es el correcto sellado durante su montaje, ya que la correcta retención de la presión interna determinará la rigidez del amortiguador [3].

Los principales componentes de un amortiguador neumático tipo RLAS (mostrado en la Fig. 1), son los siguientes:

- Tapa: es la tapa superior del amortiguador y funciona como soporte para realizar la fijación y conexión del chasis con el muelle neumático.
- Manga: juega un papel importante en el funcionamiento del amortiguador, ya que es la cámara encargada de contener la presión absoluta del amortiguador, proporcionando la rigidez vertical requerida.
- Pistón: funciona como la tapa inferior del muelle neumático y su contorno influye en la rigidez vertical.
- Anillos de crimpado: son los componentes utilizados para realizar la conexión mediante la deformación plástica de los anillos que mantienen unidas las piezas.

¹A. Avila. Posgrado CIATEQ A.C., Circuito de la Industria Poniente Lote 11, Manzana 3, No. 11 Col. Parque Industrial Exhacienda Doña Rosa, Lerma, Estado de México. C.P. 52004. aylinnorma.avila@gmail.com

²G. Leo-Avelino CIATEQ A.C., Av. Nodo Servidor Público 165, Col. Anexo Club de Golf Las Lomas, Zapopan, Jal. C.P. 45136



Fig. 1 Principales componentes de un amortiguador neumático.

El crimpado es el proceso de ensamblaje utilizado para unir los componentes de un amortiguador neumático, el cual consiste en aplicar una fuerza circunferencial uniforme hasta alcanzar la deformación plástica de los anillos de crimpado, esta deformación se crea por medio de mordazas que se mueven uniformemente sobre la circunferencia del componente hasta alcanzar un desplazamiento o fuerza objetivo [2].

El proceso de prensado consta de 4 etapas:

1. Deformación elástica del anillo de crimpado.
2. Deformación plástica hasta el contacto entre el anillo de crimpado y la manga.
3. La deformación continúa hasta que se alcanza la fuerza de crimpado requerida (F_x).
4. Apertura de las mordazas hasta que se interrumpe el contacto con los componentes [2].

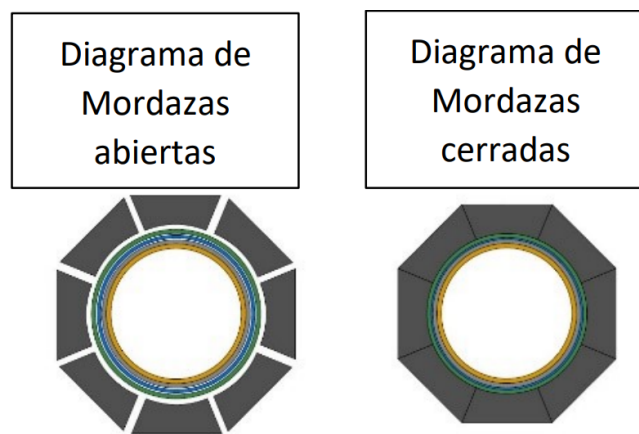


Fig. 2 Diagrama de la posición de las mordazas en el proceso de crimpado rodeando un anillo de crimpado.

El proceso se valida mediante un análisis de elemento finito, que tiene como condiciones de contorno los límites elásticos de

los anillos de crimpado y soporte, estos límites al ser teóricos son amplios y se consideran como factores de ruido, ya que estos límites pueden variar en función de la composición química del material e influyen directamente en la fuerza de crimpado soportada por el material [1]. La fuerza aplicada está directamente relacionada con la hermeticidad del conjunto ensamblado, que representa un parámetro crítico en el comportamiento funcional del amortiguador. En particular, la rigidez vertical del sistema depende de la presión interna, que debe mantenerse constante para conseguir una respuesta mecánica adecuada en las diferentes condiciones de carga a las que se somete [2].

En estudios previos [4] se realizó un diseño de experimentos de crimpado basado en simulación por elemento finito para el crimpado de un amortiguador neumático considerando los parámetros que influyen en el proceso de crimpado, en el que se obtuvieron las curvas de tensión-deformación plástica para los anillos de soporte mediante ensayos de tracción según la norma ISO 6892-1 (UNE-EN ISO 6892-1:2020, 2020).

Las condiciones de ensayo corresponden al método B que es específico para probetas planas (Tasa de Esfuerzo), para lo cual se utilizaron 3 muestras por cada material, con las siguientes dimensiones: $a_0 = 2,02\text{mm}$, $b_0 = 6,06\text{mm}$ y $S_0 = 12,18\text{mm}$ Ancho, Largo y Área transversal, respectivamente), por lo que la curva obtenida presenta más de 15 puntos de deformación elástica y 35 puntos de deformación plástica.

De acuerdo a la norma ISO 6892-1, el método B (también conocido como ensayo controlado por tasa de esfuerzo unitaria) consisten en controlar el ensayo en función de la velocidad de deformación en la zona uniforme de la probeta, particularmente para la zona de deformación plástica. Este método es especialmente útil para materiales sensibles a la velocidad de deformación como lo son ciertos aceros o aleaciones.

Sin embargo, en el trabajo [4] se identificó un error en la caracterización de los anillos de crimpado, que condujo a una simplificación excesiva de la curva tensión-deformación, ya que en lugar de utilizar 35 puntos solo se utilizaron 4 puntos del comportamiento mecánico de los anillos de crimpado. En este caso, la curva simplificada de tensión-deformación se aproximó mediante dos tramos lineales, con sólo cuatro valores representativos de la deformación plástica. Esta aproximación reducía drásticamente la fidelidad del modelo, limitando la capacidad de analizar propiedades fundamentales como el módulo de elasticidad y el límite elástico. Las curvas obtenidas en ese estudio se basaron en un único punto de datos para la región elástica y tres puntos para la región plástica debido al error en la caracterización, comprometiendo así la representatividad del comportamiento real del material.

En el presente trabajo se presenta un análisis crítico del proceso de caracterización de los anillos de crimpado utilizados en amortiguadores neumáticos, con el objetivo de evaluar la precisión de los datos utilizados actualmente en las simulaciones por elementos finitos. Para ello, se realizaron ensayos físicos del proceso de crimpado tanto en los anillos de soporte como en los anillos de crimpado, permitiendo obtener experimentalmente las curvas tensión-deformación reales. Estos ensayos se realizaron a las mismas condiciones en las que se ensambla un amortiguador neumático en la línea de producción, con el fin de replicar las condiciones a las que se somete el componente durante su montaje a escala industrial. Las curvas obtenidas se compararon con las generadas a partir de la base de datos actual del simulador ABAQUS, para identificar discrepancias y analizar su impacto en el comportamiento del sistema. A partir de esta comparación, se pretende verificar la hipótesis planteada en el estudio [1] que sugiere la existencia de un error en la caracterización del material, que afecta directamente a la precisión de las simulaciones por elementos finitos y genera una falta de correspondencia con los resultados experimentales.

II. METODOLOGÍA

Con el objetivo de evaluar la correspondencia entre las condiciones reales de operación de los anillos de crimpado en la línea de ensamble de los amortiguadores neumáticos y el modelo numérico, es fundamental obtener curvas esfuerzo-deformación representativas. Estas permiten validar, comparar y replicar el comportamiento mecánico observado en condiciones reales, así como identificar posibles discrepancias entre los datos experimentales y los resultados generados mediante la simulación en el software ABAQUS.

Para obtener las curvas tensión-deformación correspondientes al comportamiento mecánico de los anillos de engarce, se utilizó un anillo físico de material DC01+A, el cual fue ensamblado en la misma máquina de crimpado del área de producción en serie, con las mismas herramientas y configuración de máquina, para replicar las condiciones reales de operación de ensamble de los amortiguadores neumáticos. El anillo de crimpado se colocó con precisión entre las mordazas del sistema de sujeción para garantizar un contacto uniforme y simétrico. Posteriormente, se aplicó una fuerza circunferencial de 5 mm/s de forma controlada y progresiva, garantizando una distribución homogénea de la tensión en toda la circunferencia del anillo. Esta carga se incrementó progresivamente a medida que las mordazas avanzaban para realizar el cierre hasta alcanzar un diámetro objetivo, durante este proceso el anillo genera resistencia hasta que comienza a deformarse plásticamente y se alcanza el límite elástico del material, que se identifica como el inicio de la deformación plástica.

Durante el proceso, se registró la fuerza aplicada y el desplazamiento asociado, lo que permite construir la curva tensión-deformación característica del comportamiento mecánico del anillo de crimpado en condiciones reales de montaje. El experimento se replicó con 3 muestras del mismo anillo de crimpado para validar la repetibilidad de los resultados y minimizar la dispersión experimental.

Del mismo modo, se aplicó el mismo procedimiento experimental a dos muestras de los anillos de soporte del material DC01 C690, replicando las condiciones reales del proceso de montaje del amortiguador. Se utilizó la misma máquina de engarce, con las mismas mordazas y parámetros de funcionamiento utilizados en la línea de producción, garantizando así la fidelidad del entorno de ensayo. Al igual que con los anillos de crimpado, se registró la evolución de la fuerza durante el cierre progresivo de las mordazas hasta alcanzar el diámetro objetivo. Esta caracterización directa proporciona una base sólida para evaluar la precisión del modelo numérico y la validez de los parámetros de material empleados previamente.

III. RESULTADOS

La curva de tensión-deformación de los anillos de crimpado y soporte se construyó a partir de los datos de fuerza y desplazamiento de las mordazas registrados durante el proceso de crimpado, como se muestra en la Fig. 3 Debido a la falta de una caracterización precisa del material para el anillo de crimpado, los datos mecánicos actualmente disponibles en la base de datos del simulador ABAQUS presentan un grado considerable de incertidumbre cuando se comparan con los resultados experimentales. Esta limitación afecta a la correcta definición del comportamiento elástico inicial del material, tal y como se muestra en el gráfico. Aunque el límite elástico estimado experimentalmente cae dentro del rango de fuerzas teóricas predichas por el modelo, el desplazamiento asociado a ese límite elástico no coincide con el rango de deformaciones teóricas calculadas. Esta discrepancia sugiere que las propiedades mecánicas utilizadas en la simulación por elementos finitos, en particular el módulo de Young y el límite elástico, no reflejan con exactitud el comportamiento real del material. En consecuencia, la validez del modelo para predecir la respuesta estructural completa del componente se ve comprometida.

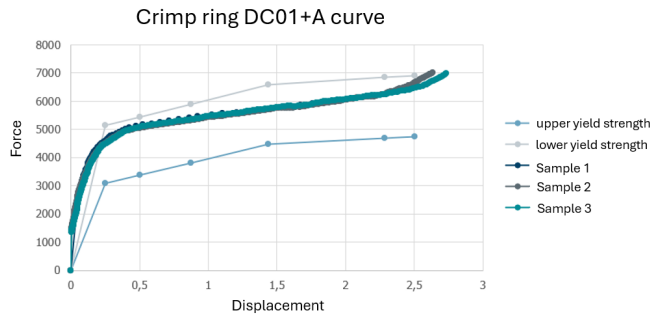


Fig. 3 Comparación de las curvas de tensión-deformación de la base de datos del simulador con las pruebas experimentales para el anillo de crimpado.

Este procedimiento se reprodujo para los anillos de soporte fabricados con material DC01 C690, con el fin de verificar la coherencia del protocolo experimental y validar la fiabilidad de la base de datos actual del simulador ABAQUS, que contiene los límites superior e inferior del límite elástico para este material, previamente caracterizado adecuadamente. Se aplicó el mismo protocolo de ensayo utilizado previamente para los anillos de crimpado, y se registró también la curva tensión-deformación correspondiente. A diferencia de lo observado para los anillos de crimpado, los resultados experimentales obtenidos para los anillos de soporte mostraron un alto grado de concordancia con la información contenida en la base de datos del simulador. Tanto la forma de la curva mostrada en la Fig. 3, como los puntos clave del límite elástico y de la región de deformación plástica, se encuentran dentro del rango definido por las curvas máximas y mínimas de la base de datos. Este resultado es de gran relevancia, ya que confirma que, en el caso de los anillos de soporte, los parámetros utilizados en la simulación por elementos finitos son fiables. Esto permite optimizar el proceso de ensamblaje, evitando retrabajos y reduciendo la necesidad de ajustes iterativos durante el proceso de crimpado.

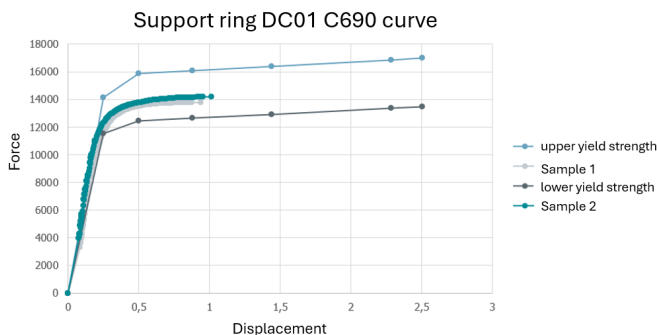


Fig. 4 Comparación de las curvas de tensión-deformación de la base de datos del simulador con las pruebas experimentales para el anillo de soporte.

El contraste evidenciado en la falta de correspondencia entre los datos experimentales obtenidos de las curvas esfuerzo-deformación de los anillos de crimpado y los resultados

arrojados por el modelo numérico en ABAQUS subraya la importancia crítica de contar con una caracterización mecánica precisa y representativa del material empleado. Una caracterización inadecuada puede conducir a simulaciones inexactas, afectando la predicción del comportamiento estructural bajo condiciones reales de operación, lo que a su vez compromete la confiabilidad del diseño y la integridad del producto final.

Con el objetivo de evaluar si una caracterización mecánica rigurosa del material permite generar curvas que se mantengan dentro de los límites establecidos en la base de datos del simulador ABAQUS (definidos por sus curvas del límite superior e inferior), se llevaron a cabo ensayos de tracción uniaxial en cinco probetas plana fabricadas con acero DC01+A. Las probetas fueron preparadas según los lineamientos de la norma ISO 6892-1, utilizando el método B (control de tasa y esfuerzo), específicamente para probetas planas, como es el caso de los anillos de crimpado.

Las pruebas se realizaron utilizando una máquina universal de ensayos, asegurando un montaje cuidadoso de cada probeta en las mordazas del sistema de sujeción, con el fin de evitar desalineaciones y concentraciones de esfuerzos no deseados Fig.4. Una vez alineadas las probetas y sujetadas, fueron sometidas a una carga axial de tracción controlada con una velocidad de 0.01mm/s, hasta alcanzar la fractura total del material como se muestra en la Fig.5. Durante el ensayo, se registraron de forma continua los valores de carga y desplazamiento, permitiendo obtener la curva de esfuerzo desplazamiento correspondiente a cada probeta. Estas curvas fueron posteriormente comparadas con los límites establecidos en la base de datos del simulador ABAQUS, con el objetivo de validar la representatividad del material modelado para corroborar la fiabilidad del modelo numérico.



Fig. 5 Probeta montada en la maquina universal.



Fig. 6 Probeta después de la fractura

La curva esfuerzo-desplazamiento obtenida mostro una excelente concordancia con los datos de referencia del simulador ABAQUS. Como se observa en la Fig.6, los resultados experimentales de encuentran dentro del rango delimitado por las curvas máxima (color naranja) y mínima (color verde) de la base de datos del modelo numérico. Específicamente, se identificó una fase elástica lineal bien definida, seguida por una transición clara al régimen plástico. Esta correlación valida la representatividad del comportamiento mecánico del material ensayado y confirma que una correcta caracterización reduce significativamente las discrepancias entre el modelo numérico y el comportamiento real del componente, aumentando así la confiabilidad de la simulación.

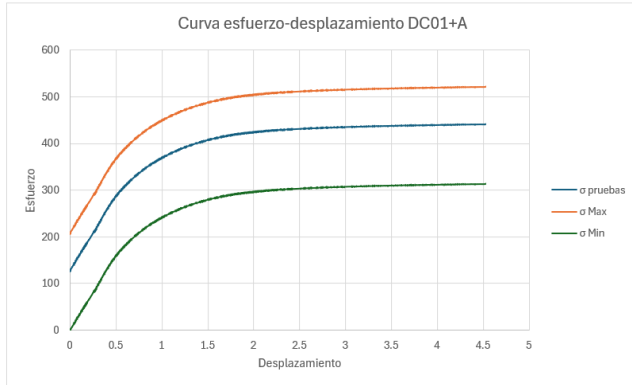


Fig. 7 Comparación de las curvas esfuerzo-desplazamiento de la base de datos del simulador con las pruebas de tensión del anillo de crimpado.

Adicionalmente las probetas fueron examinadas bajo un microscopio antes y después de los ensayos de tracción, con el objetivo de identificar posibles modificaciones en el material producidas por los esfuerzos internos en la microestructura del acero DC01+A. Previo a los ensayos, se documentó el estado inicial del material, en el cual se podría observar una estructura homogénea, sin evidencia de defectos significativos o deformaciones. Posteriormente, tras la aplicación de la carga de tracción y la consecuente fractura, se repitió el análisis en las regiones del cuello de la probeta como se muestra en la Fig. 8 donde ocurrió la fractura y cerca de ella. En la Fig.9 se muestra con claridad la diferencia de la estructura del material entre la condición (A) después de la prueba de tracción y la condición (B) previa a la prueba se pueden observar daños granulares y grietas como respuesta del material a la tensión.



Fig. 8 Análisis de la fractura en el cuello de la probeta

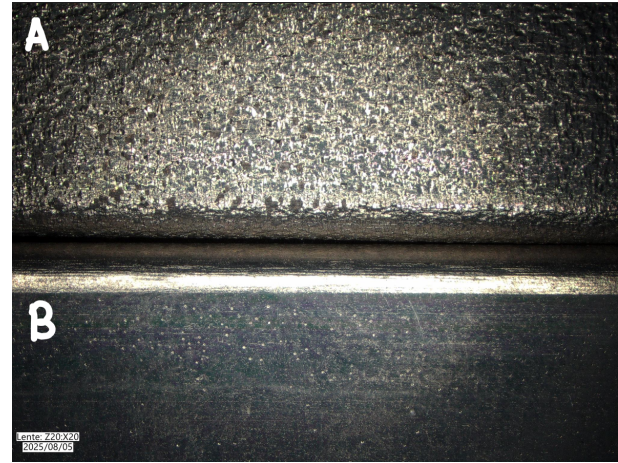


Fig. 9 (A) probeta después de la prueba, (B) probeta antes de la prueba de tensión.

IX. CONCLUSIÓN

Los datos obtenidos por medio de las pruebas de tracción axial refuerzan la importancia crítica de una adecuada y exhaustiva caracterización del material para garantizar la precisión de los modelos numéricos empleados en la simulación del proceso de crimpado de los amortiguadores neumáticos. En lo particular las curvas esfuerzo-deformación obtenidas experimentalmente constituyen la base fundamental para la definición de los parámetros consecutivos que rigen la respuesta del material en los modelos de análisis de elemento finito, ya que de ellas se derivan propiedades claves como el módulo de elasticidad, el límite elástico, la resistencia máxima y la ductilidad del material.

La comparación directa entre las curvas tensión-deformación experimentales y las curvas de la base de datos del simulador ABAQUS mostró una correlación satisfactoria en el caso de los anillos de soporte, cuya caracterización mecánica fue previamente validada. Por el contrario, los anillos de engarce presentaron discrepancias significativas atribuibles a la falta de datos fiables sobre sus propiedades elásticas y plásticas. Aunque el límite elástico se encontró dentro del rango teórico de resistencia, su desplazamiento asociado no coincidió con los valores predichos por el modelo, indicando inconsistencias en la definición del comportamiento mecánico del material.

Por lo tanto, se concluye que, para lograr una representación precisa del proceso de crimpado mediante simulaciones por elementos finitos, es imprescindible contar con una caracterización completa y rigurosa de los materiales involucrados, que abarque tanto su respuesta elástica como plástica, lo cual permite incluir fenómenos de endurecimiento ya sea por el proceso de manufactura del material o por tratamientos térmicos, teniendo así una aproximación integral con una correlación robusta entre los modelos computacionales y

los resultados experimentales, permitiendo una toma de decisiones informada en el diseño y un mejor control de los procesos industriales.

REFERENCES

- [1] Ugalde, J. A. (2023). Optimización de crimpado en amortiguadores neumáticos por medio de parámetros de diseño usando análisis de elemento finito y método de Taguchi. Revista INCAING. ISSN 2448-9131..
- [2] Gabriela-Petruta, M.-O. A. (2018). CRIMPING PROFILE OPTIMIZATION ON THE AIR SPRING USING FINITE ELEMENT . Obtenido de sciendo.com: <https://doi.org/10.2478/aucts-2018-0007>
- [3] Automotive vibration control and technology. (2015). In Vibracoustic. Hamburg: Vogel Bussines Media.
- [4] Bondarik. (2017). FEM-basierte Auslegung einer Luftfederverklebung unter Berücksichtigung der Fertigungsparameter.
- [5] Ugalde, J. A. (2024). Propuesta de método de optimización de crimpado en amortiguadores neumáticos por medio de parámetros de diseño usando análisis de elemento finito y método Taguchi. Toluca: CIATEQ.