

## Estudio de los mecanismos de fractura de un acero de bajo carbono ante diferentes estados de carga biaxial empleando un dispositivo tipo Arcan

*Study of fracture mechanics on low carbon steel under different biaxial loading states using an Arcan type device*

Juan Manuel Anduquía<sup>1</sup>   Santiago Vargas Salazar<sup>2</sup>   Deisy Valeria Ortiz<sup>2</sup>  
Carlos Alberto Narváez Tovar<sup>2\*</sup>   Rodolfo Rodríguez Baracaldo<sup>1</sup>

Recibido 03 de diciembre de 2020, aceptado 11 de marzo de 2022

*Received: December 03, 2020   Accepted: March 11, 2022*

### RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio de los mecanismos de fractura de un acero laminado de bajo carbono cuando es sometido a distintos estados de carga biaxial. Para la realización de los ensayos mecánicos se empleó un dispositivo tipo Arcan que se acopla a las mordazas de la máquina universal de ensayos y permite cambiar la orientación de la probeta respecto al eje de aplicación de la fuerza vertical, generando un estado de esfuerzo plano que varía desde la tensión uniaxial hasta el cortante puro, pasando a través de diferentes estados de esfuerzos combinados. Se eligió un acero AISI/SAE 1020 y se diseñó, con la asistencia de simulaciones de elementos finitos, una probeta mariposa cuya geometría específica concentra los esfuerzos críticos en el centro de su cuello. Se realizaron ensayos a tensión pura (0°), esfuerzo combinado con predominancia de esfuerzo cortante (60°) y cortante puro (90°). Se observó una clara deformación en los microvacíos generados en las probetas a 60° y 90° orientándolos en la dirección del esfuerzo cortante, favoreciendo su coalescencia y disminuyendo su resistencia mecánica. Aunque no se observó una diferencia apreciable en la morfología de la superficie de falla en las probetas a 60° y 90°, debido a la presencia predominante del esfuerzo cortante, sí se observa una clara diferencia con respecto a morfología de la probeta a 0°.

Palabras Clave: Acero de bajo carbono, dispositivo tipo Arcan, esfuerzo plano, superficie de fractura.

### ABSTRACT

*This work aims to study the fracture mechanisms of a low carbon laminated steel under different biaxial stress states employing a universal testing machine with an Arcan type device. The chosen material was an AISI/SAE 1020 steel. A specific butterfly specimen geometry was designed with the aid of finite element simulations to concentrate critical stresses at the center of its neck. The Arcan device can change the specimen's orientation regarding the machine loading axis, generating different biaxial stress states. Tests were carried out on pure tension (0°), combined stress with a predominance of shear stress (60°), and pure shear (90°). An evident deformation was observed in the microvoids generated in the specimens at 60° and 90°, orienting them in the direction of the shear stress, favoring their coalescence, and decreasing*

<sup>1</sup> Grupo de investigación IPMIM. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá, Colombia. E-mail: jumanduquie@unal.edu.co, rodriguezba@unal.edu.co

<sup>2</sup> Grupo de investigación GNUM. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.  
E-mail: savargassa@unal.edu.co, dvortizl@unal.edu.co, canarvaezt@unal.edu.co

\* Autor de correspondencia: canarvaezt@unal.edu.co

*their mechanical resistance. Although no apparent difference was observed between the failure surface morphologies of the specimens loaded at 60° and 90°, an evident difference was observed concerning the sample at 0° due to the dominant presence of shear stress.*

**Keywords:** *Low carbon steel, Arcan type device, plane stress, fracture surface.*

## INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente el diseño de componentes mecánicos fabricados en acero laminado está basado en teorías de falla que han sido desarrolladas bajo la suposición de un comportamiento isotrópico del material y, por lo tanto, requieren únicamente de la caracterización de su comportamiento mecánico mediante ensayos de tensión uniaxial. Sin embargo, la información obtenida del material bajo condiciones uniaxiales se limita para algunas operaciones de fabricación, siendo esto de poca utilidad en la obtención de una caracterización completa de elementos mecánicos que experimentan condiciones de esfuerzo plano, ya sea producto de condiciones de servicio con cargas combinadas de flexión torsión y carga axial [1], o por procesos de conformado plástico durante su fabricación. Los ensayos mecánicos a carga biaxial surgen como una alternativa para obtener información del comportamiento mecánico de materiales laminados bajo estados tensoriales de esfuerzo plano a partir del principio de descomposición de fuerzas aplicadas en direcciones ortogonales sobre una probeta plana de geometría personalizada [2]. La información de este tipo de ensayos permite reducir el factor de seguridad de los componentes y realizar diseños más livianos, así como reducir los costos y tiempo de los procesos de conformado plástico [3, 4].

Con el avance en el desarrollo de nuevas técnicas experimentales y computacionales, diferentes autores han propuesto nuevas metodologías híbridas experimental-computacional para estudiar la variación del campo de esfuerzos en materiales dúctiles a partir de la utilización de probetas y dispositivos mecánicos especializados como el tipo Arcan [1, 3, 4]. Este tipo de metodologías permiten analizar estados mecánicos complejos a partir de la aplicación de condiciones de carga biaxial, cálculo de esfuerzos y deformaciones equivalentes por métodos computacionales, y la respectiva obtención de sus valores límite [5].

Por otra parte, los aceros de bajo carbono AISI/SAE 1020 son de uso común en aplicaciones de ingeniería

mecánica y automotriz, su microestructura se compone de una matriz de ferrita y colonias de perlita, esto garantiza que las condiciones de falla sigan patrones definidos de fractura dúctil bajo diferentes entornos de estado límite por cargas combinadas que pueda experimentar el material [6]. Un análisis profundo del comportamiento mecánico es de gran importancia para identificar la cinética en los mecanismos de fractura en función de las condiciones de carga, siendo esta temática poco tratada dentro de las líneas de investigación en procesos de fabricación.

Este trabajo presenta un estudio de los mecanismos de fractura de un acero laminado AISI/SAE 1020 bajo distintos estados de esfuerzo plano, empleando una metodología híbrida experimental-computacional. Las condiciones de carga se alcanzan mediante el empleo de un dispositivo tipo Arcan y una probeta tipo mariposa cuya geometría fue diseñada con la asistencia del método de elementos finitos, realizándose simulaciones de las tres condiciones de carga biaxial para garantizar la concentración de esfuerzos en su área central [7, 8, 9].

El dispositivo Arcan se acopla a las mordazas de una máquina universal de ensayos mediante barras sólidas de sección circular, y un sistema de discos giratorios permite cambiar la orientación de la probeta respecto al eje de aplicación de la fuerza vertical, generando estado de esfuerzos por tensión uniaxial, tensión biaxial con diferentes combinaciones de carga y cortante puro. Finalmente se realiza el análisis de la superficie de fractura de las probetas a través de imágenes de estereoscopia y microscopio electrónico de barrido, evidenciando que el estado de esfuerzos modifica el mecanismo de fractura del material, pasando de la coalescencia de microvacíos circulares bajo tensión pura a la formación de microvacíos elípticos bajo cortante puro.

## METODOLOGÍA

Con el fin de estudiar diferentes mecanismos de fractura bajo estado de esfuerzo plano, un acero

laminado AISI/SAE 1020 de espesor 3,5 mm fue seleccionado para realizar ensayos experimentales. El dispositivo tipo Arcan se emplea con objeto de poder replicar tres condiciones de carga combinada en una probeta a partir de ángulos a  $0^\circ$ , donde este representa un estado de esfuerzo uniaxial a tensión pura,  $60^\circ$  con estado biaxial de esfuerzos cortantes y normales y  $90^\circ$  donde el material se ve sometido a un estado de cortante puro.

### Dispositivo tipo Arcan

El dispositivo fue diseñado y fabricado en un trabajo previo del grupo de investigación [10], aplicando metodologías de diseño mecánico para la formulación del problema de diseño, el diseño conceptual y de detalle. La función principal del dispositivo Arcan es generar estados de esfuerzos críticos por cargas combinadas en la sección central de la probeta a partir de la fuerza uniaxial ejercida por una máquina universal de ensayos. La Figura 1a ilustra la configuración general del dispositivo que está compuesto por semi-discos principales (1) acoplados a una varilla superior (2) que conecta la celda de carga con el dispositivo Arcan y otra varilla adicional inferior (9) que sirve como punto de anclaje al bastidor de la máquina. Tanto las varillas como los discos poseen perforaciones que permiten variar el ángulo del ensayo con una resolución de  $15^\circ$ . Adicionalmente, la cavidad que

presentan los semi-discos para posicionar la probeta dentro del dispositivo, posee un sistema de cajera y fuerza de fricción a través del uso de tapas de sujeción (5). Finalmente, el Arcan utiliza uniones desmontables tipo pasador-anillo de retención (3-4) y perno-arandela-tuerca (6-7-8) para completar la configuración del dispositivo. La Figura 1b presenta el montaje del Arcan en la máquina universal del laboratorio de ensayos mecánicos y deformación plástica de la Universidad Nacional de Colombia. La Tabla 1 proporciona información sobre los componentes en el dispositivo, de acuerdo con la numeración de la Figura 1a.

Tabla 1. Lista de componentes empleados en el dispositivo Arcan [10].

| Número de Componente | Descripción               | Cantidad |
|----------------------|---------------------------|----------|
| 1                    | Semi-disco principal      | 2        |
| 2                    | Varilla ranurada superior | 1        |
| 3                    | Pasador                   | 4        |
| 4                    | Anillo de retención       | 8        |
| 5                    | Tapa de sujeción          | 2        |
| 6                    | Perno de sujeción         | 16       |
| 7                    | Arandela de sujeción      | 16       |
| 8                    | Tuerca de sujeción        | 16       |
| 9                    | Varilla ranurada inferior | 1        |

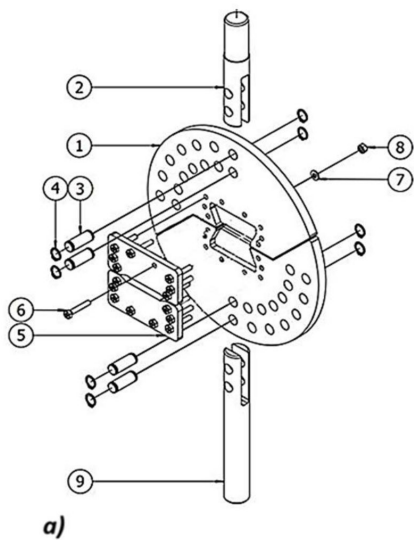


Figura 1. Configuración del dispositivo tipo Arcan: a) explosionado con numeración de componentes. [10], b) montaje en la máquina de ensayos universales Shimadzu UH-500-knNI.

### Diseño de la probeta

El comportamiento multiaxial de un material es por lo general estudiado a través de pruebas de tensión y torsión en probetas con forma cilíndrica, y ensayos límite de conformado en probetas con forma plana; sin embargo, este tipo de ensayos requieren el empleo de múltiples geometrías y dispositivos mecánicos para alcanzar un amplio rango de estados de esfuerzo. Estas variantes en las condiciones de los ensayos introducen mayor complejidad durante las etapas de análisis de resultados, debido a la influencia que tienen las variables geométricas de las probetas sobre el comportamiento del material [11]. Para el diseño de esta probeta se tienen en cuenta los siguientes puntos:

- Evitar el pandeo en la sección media producto de los esfuerzos de cizallamiento con una relación entre la altura de la probeta ( $H$ ) y el espesor de la zona de medición ( $t$ ) menor que ocho ( $H/t < 8$ ).
- Lograr uniformidad del campo de esfuerzo en el centro de la probeta a través de una relación entre el ancho de los hombros de la probeta ( $W$ ) y la altura interna de la zona de medición ( $h$ ) mayor que doce ( $W/h > 12$ ).
- La deformación plástica solo se puede presentar en la sección media de la probeta. Los hombros siempre deben permanecer en zona elástica a través de una relación de espesores entre los hombros y la zona de medición ( $T/t$ ) menor que 0,5 y curvatura de hombros ( $R$ ) mayor que cien milímetros ( $R > 100$  mm).
- Evitar concentración de esfuerzos en los extremos laterales de la zona de medición de

la probeta empleando curvaturas cóncavas de radios internos ( $r$ ) mayor que diez milímetros ( $r > 10$  mm).

- La rugosidad superficial en la zona de medición debe ser menor a  $25\text{ }\mu\text{m}$  para evitar efectos de bandas de corte inducidas por procesos de fabricación de la probeta.

En la Figura 2 se presenta la geometría utilizada para el diseño de la de la probeta tipo mariposa y su orientación respecto a la dirección de laminado del acero.

El trabajo de Dunand y Mohr [5] se utiliza como referencia para adoptar un estudio tangencial de los parámetros geométricos de la probeta que permita llegar a las dimensiones finales utilizadas en el proyecto. Entre las principales características que provee la geometría de la probeta se encuentra en poder garantizar el inicio de grieta dentro de la sección central de la zona de medición, sin producir alta concentración de esfuerzos de las regiones que experimentan cambios de espesor. Igualmente, el concepto de geometría tipo mariposa desarrollado por Dunand y Mohr [5] incluye en tener la capacidad de confinar la deformación plástica dentro de la zona de medición sin producir plastificación en los hombros de la probeta bajo modos de ensayos a tensión predominante y/o cortante predominante.

Estudios de la geometría de las probetas en aleaciones laminadas confirman que las geometrías tipo mariposa son adecuadas para la caracterización de fracturas cuasiestáticas en estados de tensión que van desde el corte hasta la deformación plana [12]. Así, las

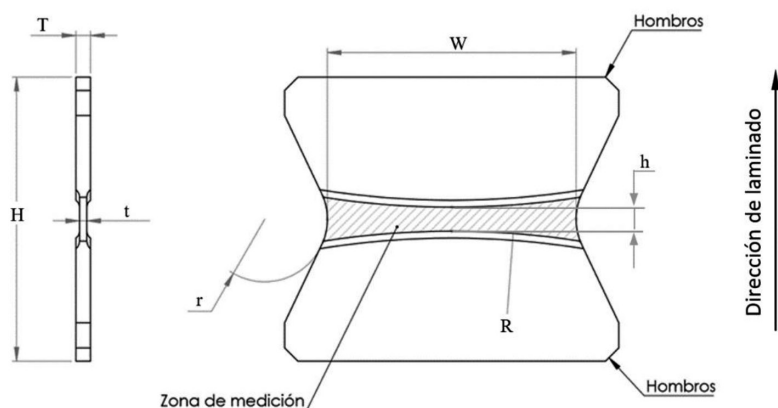


Figura 2. Geometría de la probeta.

características geométricas de la probeta se diseñaron con el fin de garantizar la distribución homogénea de esfuerzos en el área central del cuello, con el propósito de provocar el inicio de grieta en esta zona y una adecuada propagación de ésta a lo largo de toda el área de análisis. También se debe tener en cuenta que los esfuerzos en cualquier sección de la probeta fuera de la zona de análisis, como por ejemplo los esfuerzos de contacto con el Arcan, no provocan deformaciones apreciables o significativas por lo que estas secciones se pueden considerar como un cuerpo rígido. Debido a las condiciones que debía satisfacer la probeta respecto a su comportamiento mecánico, fue necesario asistir su diseño mediante simulaciones de elementos finitos, con las cuales fue posible verificar el comportamiento de la probeta antes de fabricarla.

El material empleado en las probetas del ensayo es un acero AISI/SAE 1020, ya que su microestructura

garantiza que las condiciones de falla sigan patrones característicos de fractura dúctil a partir de una apreciable deformación plástica, formación de microvacíos por la incompatibilidad entre la ferrita y las colonias de perlita que producen estricción localizada debido a la condición geométrica que empleamos para la probeta, y fractura final producto de la coalescencia o unión de esos microvacíos. Una vez se definió el diseño de la probeta, se procedió a la fabricación de las muestras mediante corte láser y mecanizado CNC, culminando con un pulido en el área del cuello con el propósito de disminuir cualquier factor de acumulación de esfuerzos no deseado provocado por la rugosidad superficial.

### Montaje del dispositivo Arcan

La Figura 3 presenta un diagrama de flujo con el procedimiento para el montaje e inicio del ensayo con ayuda del dispositivo Arcan, el cual fue validado ensayando una geometría preliminar de probeta con

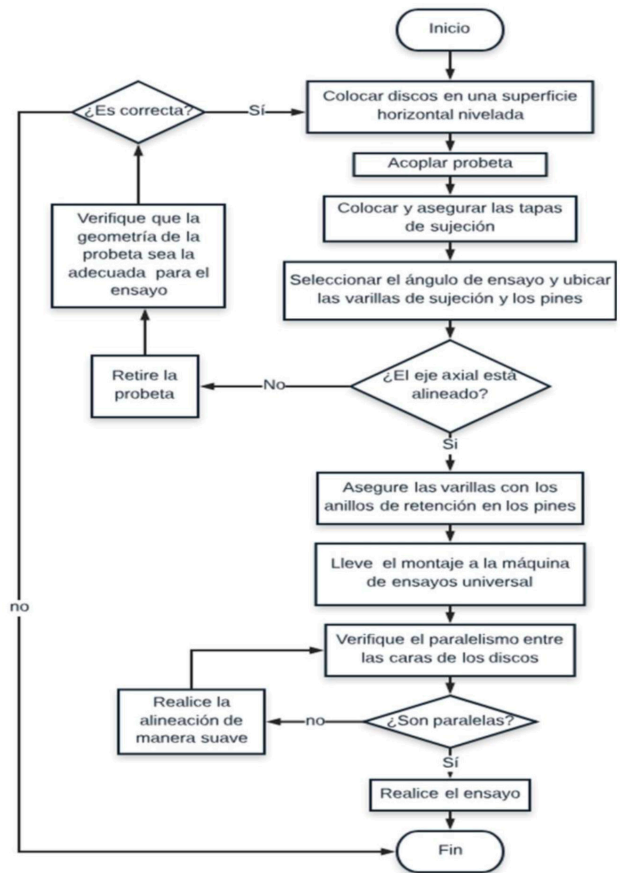


Figura 3. Diagrama de flujo para el montaje del dispositivo Arcan.



$h = 3,5 \text{ mm}$  y  $t = 1,7 \text{ mm}$  [13]. El ensayo se realizó en una máquina de ensayos universales Shimadzu UH-500-kN con una celda de carga de 500 kN a una velocidad de 1mm/min para garantizar condiciones cuasiestáticas independientes de los efectos inerciales del material. Los reportes de temperatura y humedad relativa fueron: 21,5 °C y 43% respectivamente.

### Análisis de la fractura

Para realizar un análisis inicial de la superficie de fractura se empleó un estereoscopio OLYMPUS para obtener imágenes del área de fractura y analizar tanto las características iniciales de las fracturas como las diferencias superficiales que se presentan entre ellas. Posteriormente, se realizó una toma de microfotografías de la superficie de fractura de las probetas empleando un microscopio electrónico de barrido (MEB) VEGA3 TESCAN, con el fin de identificar los mecanismos de fractura para cada condición de carga biaxial.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Diseño de la probeta

La geometría de la probeta, cuyas dimensiones finales son reportadas en la Tabla 2, fue verificada con el software ABAQUS/Standard para análisis por elementos finitos, evidenciando la concentración de esfuerzos en la zona central de la probeta bajo tres ángulos de carga elegidos para el desarrollo experimental. En la Figura 4 se observa la distribución de esfuerzos equivalentes von Mises obtenidos, que corresponden al instante crítico de deformación plástica equivalente de la zona de medición, la cual es calculada a partir del concepto de resistencia máxima a tensión mediante ensayos complementarios realizados al material por carga uniaxial simple, empleando probetas tipo ASTM E8.

Tabla 2. Dimensiones de probeta para ensayos de carga multiaxial en acero AISI/SAE 1020.

| Dimensiones probeta | Valor (mm) |
|---------------------|------------|
| H                   | 68,00      |
| h                   | 1,88       |
| W                   | 60,00      |
| T                   | 3,50       |
| t                   | 1,17       |
| R                   | 150,00     |
| r                   | 15,00      |

En general, se observa que la probeta presenta uniformidad en el campo de esfuerzos alrededor del centro geométrico de la zona de medición, concretamente para el ensayo a 0° se presenta un patrón en forma de elipse horizontal de la distribución del esfuerzo equivalente crítico. En cuanto a los ensayos con ángulos de carga de 60° y 90°, se aprecia que la respuesta mecánica presenta valores de mayor resistencia distribuidas en forma de bandas inclinadas a medida que predominan las fuerzas cortantes sobre el material. Adicionalmente la reducción de esfuerzos concentrados en regiones que experimentan cambios de espesor garantiza que la deformación plástica solo esté presente dentro de la región de análisis.

### Análisis de la superficie de fractura

La Figura 5 muestra las superficies de fractura de las probetas en las tres condiciones de carga tomadas con el microscopio estereográfico. Para las tres condiciones se incluye una imagen del centro geométrico de la probeta y una imagen del borde de la fractura.

Para las tres condiciones se observa una fractura regular y simétrica correspondiente a condiciones de carga homogéneas como es el objetivo en los cálculos computacionales de diseño de la probeta y del dispositivo Arcan. La Figura 5a muestra que la superficie de la probeta a tensión pura presenta un encuellamiento pronunciado evidenciado en la reducción de área. Las imágenes muestran una superficie con apariencia típica granular de fractura dúctil [14, 15], también conocida como dúctil súbita [16], con labios de corte de una limitada proporción de la superficie, señalados por flechas rojas.

La Figura 5b correspondiente al ensayo de 60° presenta nuevamente una textura granular y adicionalmente zonas de textura lisa debido al aumento de esfuerzo cortante. En comparación con el caso anterior, se evidencia menor presencia de los labios de corte de tamaño limitado en los bordes de la probeta. La Figura 5c correspondiente al ensayo de 90° presenta una textura mayoritariamente lisa. En comparación con los casos anteriores, no se evidencia estricción ni presencia de labios de corte sobre la superficie de fractura de la probeta debido al fenómeno de zonas de arrastre del material que produce deslizamiento entre las partes de la probeta fracturada, lo cual genera texturas tersas y poco rugosas [15, 16].

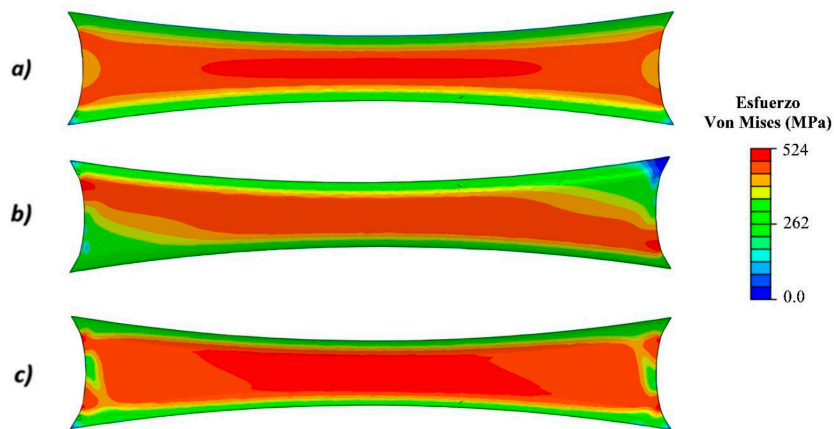


Figura 4. Resultados por elementos finitos del esfuerzo equivalente de von Mises en la zona de medición de la probeta para diferentes estados de esfuerzo biaxial: a) tensión pura  $0^\circ$ , b) esfuerzo plano con predominancia de esfuerzo cortante  $60^\circ$ , y c) cortante puro  $90^\circ$ .

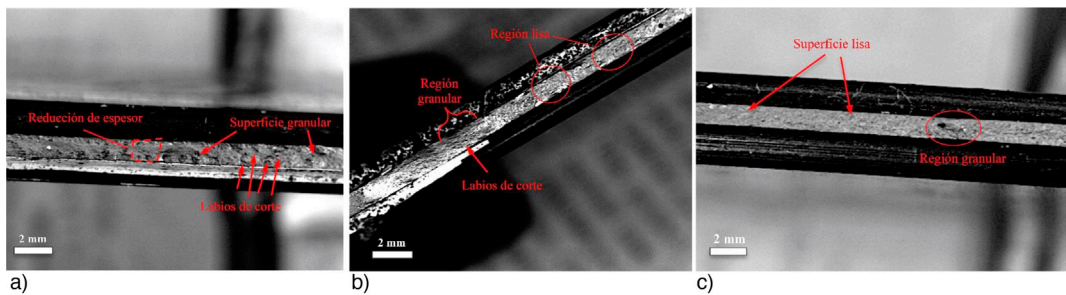


Figura 5. Fotografías de las superficies de fractura, obtenidas con estereoscopio. a)  $0^\circ$ , b)  $60^\circ$ , c)  $90^\circ$ .

La Figura 6 presenta las superficies de fractura obtenidas a través del microscopio electrónico de barrido. La Figura 6a muestra la probeta con estado de carga a tensión pura  $0^\circ$ . Se evidencia una superficie formada por microvacíos circulares claramente definidos. Al interior de algunos microvacíos se evidencian partículas de segunda fase. Sin embargo, no se observa una presencia generalizada de partículas al interior de los microvacíos por lo que la formación de la mayoría de ellos posiblemente se generó por el apilamiento de dislocaciones. Finalmente, se observa algunos microvacíos de gran tamaño posiblemente originados por inclusiones de tipo óxido y sulfuros en el material (flechas amarillas). No es evidente la presencia de marcas radiales o de río que permitan identificar el origen y dirección de propagación de la fractura. En este caso el mecanismo predominante de crecimiento de grieta está dado por la coalescencia de microvacíos en múltiples direcciones.

La Figura 6b corresponde al ensayo a  $60^\circ$ . Los microvacíos que se aprecian sobre la superficie tienen una forma elíptica, producto de la combinación de esfuerzos normales y cortantes, orientados en la dirección de la carga. Al igual que en el caso anterior, se observa unos microvacíos alrededor de partículas de segunda fase. Existe presencia combinada de crecimiento de grieta por coalescencia de microvacíos y algunas zonas de clivaje producto de la deformación preferencial en granos orientados adecuadamente. El mecanismo de fractura corresponde a transgranular, evidenciando la menor resistencia a la propagación de la fractura al interior del grano que en los bordes del mismo.

La Figura 6c presenta la probeta con estado de carga a corte puro  $90^\circ$ . Aquí es evidente el fenómeno de arrastre por aplastamiento de las dos superficies de fractura. Teniendo una superficie

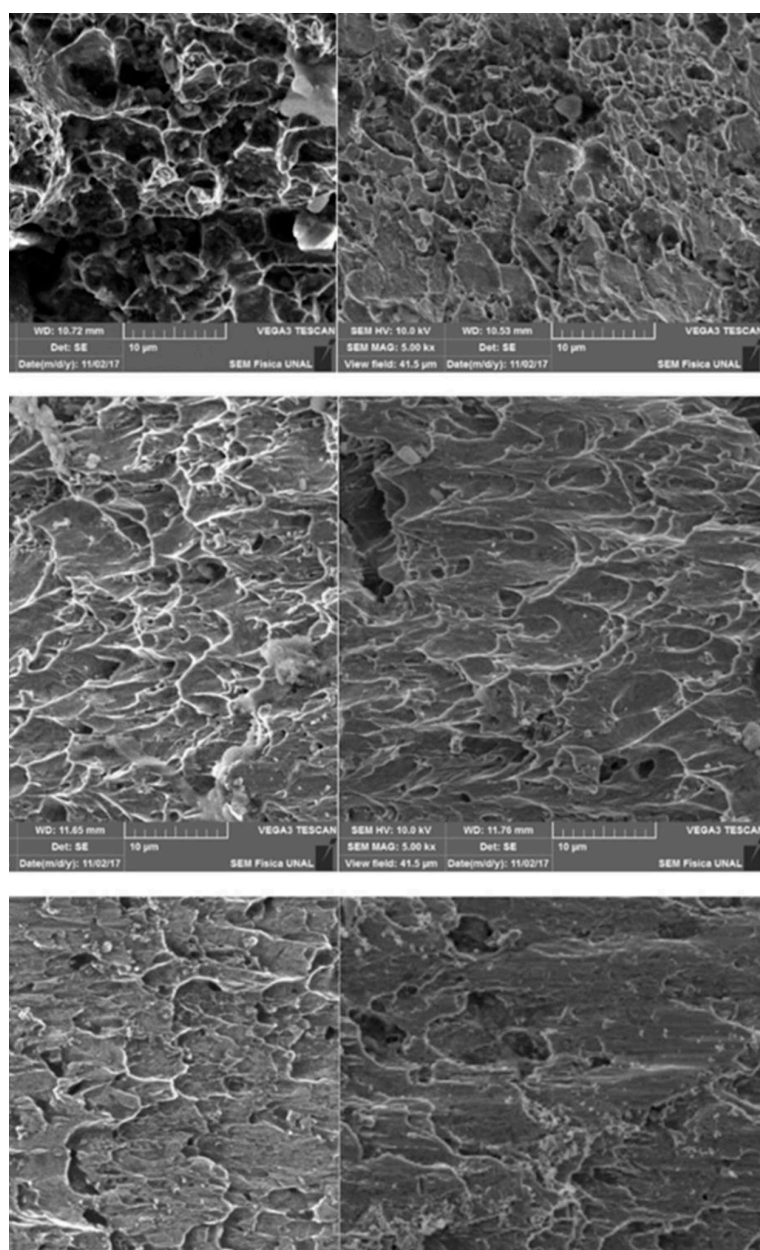


Figura 6. Superficies de fractura, obtenidas con microscopio electrónico de barrido a) 0°, b) 60°, c) 90°.

alterada difícil de identificar en sus características de textura y orientación. Aquí es menos evidente que en los casos anteriores la micro deformación de los granos antes de la fractura. El montaje del Arcan favorece la fricción entre las dos partes de la probeta, afectando parte de la superficie producto del aplastamiento por frotamiento, posiblemente aplastando los microvacíos. La forma elíptica de

los microvacíos es más cerrada para los ensayos realizados a 90°, debido a la presencia predominante del esfuerzo cortante.

## CONCLUSIONES

Este trabajo presentó un estudio de los mecanismos de fractura en un acero AISI/SAE 1020 sometido



a tres diferentes estados de carga biaxial: tensión pura, esfuerzo combinado con predominancia del esfuerzo cortante, y cortante puro. Se realizaron ensayos mecánicos en una máquina universal de ensayos junto con un dispositivo tipo Arcan, el cual fue diseñado y fabricado para esta investigación, con el objetivo de cambiar la orientación de la probeta respecto al eje de carga vertical entre tensión pura y cortante puro. Para realizar los ensayos fue necesario diseñar una probeta tipo mariposa que garantizara la concentración de esfuerzos en el área central del cuello, además, debía evitar el pandeo en la sección media y asegurar que la deformación plástica solo ocurra en la sección media, manteniendo los hombros siempre en la zona elástica. Estas condiciones fueron verificadas a través de simulaciones por elementos finitos, con lo cual fue posible definir las dimensiones presentadas.

Los ensayos mecánicos fueron realizados con ángulos de 0°, 60° y 90°, y posteriormente las superficies de falla de las probetas fueron analizadas usando imágenes obtenidas con microscopio estereográfico y microscopio electrónico de barrido. De acuerdo con el análisis de la superficie de falla se determina una falla de tipo dúctil rápida correspondiente a la naturaleza dúctil del acero elegido. Comparando las superficies de falla, se concluye que la coalescencia de microvacíos es favorecida por la componente cortante durante la deformación de la probeta. No se observa una presencia generalizada de partículas al interior de los microvacíos por lo que la formación de la mayoría de ellos posiblemente se generó por el apilamiento de dislocaciones. Además, no es evidente la presencia de marcas radiales o de río que permitan identificar el origen y dirección de propagación de la fractura. Finalmente, se evidenció que el montaje realizado en el dispositivo Arcan favorece la fricción entre las superficies de la probeta a 90°, perdiéndose parte de la información de la fractura en la superficie debido al aplastamiento por frotamiento.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia, a través del proyecto Número 202010026334-50317 financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia MINCIENCIAS.

#### REFERENCIAS

- [1] T. Wierzbicki, Y. Bao, Y.W. Lee and Y. Bai. "Calibration and evaluation of seven fracture models". *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 47 N° 4-5, pp. 719-743. 2005. ISSN: 0020-7403. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2005.03.003.
- [2] D. Mohr and S. Henn. "Calibration of stress-triaxiality dependent crack formation criteria: A new hybrid experimental-numerical method". *Experimental Mechanics*. Vol. 47 N° 6, pp. 805-820. 2007. ISSN: 0014-4851. DOI: 10.1007/s11340-007-9039-7.
- [3] L. Malcher, F.M. Andrade Pires and J.M.A. César de Sá. "An assessment of isotropic constitutive models for ductile fracture under high and low stress triaxiality". *International Journal of Plasticity*. Vol. 30-31, pp. 81-115. 2012. ISSN: 0749-6419. DOI: 10.1016/j.ijplas.2011.10.005.
- [4] F. Ebnoether and D. Mohr. "Predicting ductile fracture of low carbon steel sheets: Stress-based versus mixed stress/strain-based Mohr-Coulomb model". *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 50 N° 7-8, pp. 1055-1066. 2013. ISSN: 0020-7683. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.11.026.
- [5] M. Dunand and D. Mohr. "Optimized butterfly specimen for the fracture testing of sheet materials under combined normal and shear loading". *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78 N° 17, pp. 2919-2934. 2011. ISSN: 0013-7944. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2011.08.008.
- [6] B. Wu, N.J. Vajragupta Lian, U. Hangen, P. Wechsuanmanee and S. Münstermann. "Prediction of plasticity and damage initiation behaviour of C45E + N steel by micromechanical modelling". *Materials and Design*. Vol. 121, pp. 154-166. 2017. ISSN: 0264-1275. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.02.032.
- [7] G. Gruben, O. Hopperstad and T. Børvik. "Simulation of ductile crack propagation in dual-phase steel". *International Journal of Fracture*. Vol. 180, pp. 1-22. 2012. ISSN: 0376-9429. DOI: 10.1007/s10704-012-9791-2.
- [8] N. Mokhtar, S. Hassan, Y. Ahmad, N. Jamaluddin and B. Omar. "Finite element modeling of Arcan testing method for ductile

- and brittle material under different loading configuration”. *Journal of Built Environment, Technology and Engineering*. Vol. 1, pp. 289-298. 2016. ISSN: 0128-1003.
- [9] G. Gruben, E. Fagerholt, O. Hopperstad, T. Børvik and M. Langseth. “Numerical simulation of ductile fracture in modified Arcan test”. *Procedia Materials Science*. Vol. 3 pp. 661-666. 2014. ISSN: 2211-8128. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.109.
- [10] N.E. Jimenez, D.F. Londoño, L.N. López, R.A. Sarmiento, J.M. Anduquía, D.V. Ortiz, S. Vargas, H.O. Cortés and C.A. Narváez. “Diseño y construcción de un dispositivo tipo Arcan para ensayos de plasticidad.” XIII Congreso Ibero-americano de Ingeniería Mecánica CIBEM 2017. Lisboa, Portugal. 23-26 de octubre de 2017.
- [11] D. Mohr and M. Oswald. “A new experimental technique for the multi-axial testing of advanced high strength steel sheets”. *Experimental Mechanics*. Vol. 48, pp. 65-77. 2008. ISSN: 0014-4851. DOI: 10.1007/s11340-007-9053-9.
- [12] A. Abedini, C. Butcher and M.J. Worsick. “Fracture Characterization of Rolled Sheet Alloys in Shear Loading: Studies of Specimen Geometry, Anisotropy and rate Sensitivity”. *Experimental Mechanics*. Vol. 57, pp. 75-88. 2017. ISSN: 0014-4851. DOI: 10.1007/s11340-016-0211-9.
- [13] J.M. Anduquía, D.V. Ortiz, S. Vargas, H.O. Cortés y C.A. Narváez. “Análisis experimental de la superficie de fractura de un acero estructural bajo distintos estados de esfuerzos planos”. *Memorias del IX Congreso Internacional de Materiales IX CIM 2017*, pp. 75. 2019. ISSN 2500-6452.
- [14] Y. Lou, J.W. Yoon, H. Huh, Q. Chao and J.H. Song. “Correlation of the maximum shear stress with micro-mechanisms of ductile fracture for metals with high strength-to-weight ratio”. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 146-147, pp. 583-601. 2018. ISSN: 0020-7403. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.03.025.
- [15] R.W. Hertzberth. “Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials”. John Wiley & Sons. Fourth Edition. ISBN: 0471012149.1996.
- [16] H. Hernández Albañil y E. Espejo Mora. “Mecánica de fractura y análisis de falla”. Universidad Nacional de Colombia Editorial UN. ISBN: 9587012429. 2002.