



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**Determinación de parámetros mediante simulación  
computacional para la implementación del Prensado  
Semi-Restringido en un acero microaleado.**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

Maestro en Metalurgia e Ingeniería de Materiales

Presenta:

Ing. Humberto Octavio García Cedillo

Asesor:

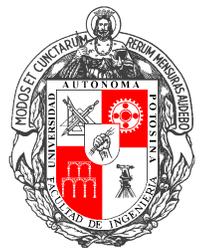
Dr. José de Jesús Cruz Rivera

Co-Asesor:

Dr. José Luis Hernández Rivera

San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero de 2020



---

## Resumen.

Los aceros microaleados, en el ámbito automotriz, se utilizan en forma de lámina por sus propiedades mecánicas, además porque presentan buena resistencia a la corrosión, soldabilidad y una adecuada formabilidad. En este trabajo se empleó una lámina de acero microaleado deformada severamente mediante un proceso denominado prensado semi-restringido (PSR). Se busca obtener una reducción significativa en el tamaño de grano. Para obtener mapas de deformación efectiva y mapas de área de contacto entre la lámina y los dados, se simularon las diferentes etapas del proceso PSR, usando el software DEFORM 3D, que está basado en el método de elemento finito (MEF). La simulación efectuada permitió optimizar el proceso PSR en aspectos como: el diseño de los dados, la determinación del coeficiente de fricción, el área óptima de la lámina, así como de la carga necesaria, limitada por la capacidad de la prensa a utilizar. La lámina de acero microaleado, deformado severamente, se caracterizó microestructuralmente mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB). Se evaluaron las propiedades mecánicas del material severamente deformado, mediante ensayos de tensión, microdureza y resistencia al impacto, obteniendo un incremento de un 23% de la resistencia última a la tensión y un 23% en la microdureza durante el primer ciclo del proceso PSR. Durante el segundo ciclo la resistencia última se incrementó 13% más y la microdureza en 18% más. La elongación disminuyó un 79% y la energía de impacto se redujo un 60% para el primer ciclo; para el segundo ciclo la elongación y la energía de impacto se redujeron un 6% y 1% adicional respectivamente.

---

## **Abstract.**

Microalloyed steels, in the automotive field, are used in sheet form for their mechanical properties, also because they also have corrosion resistance, weldability and adequate formability. In this work a sheet of microalloyed steel severely deformed was used by a process called semi-constrained groove pressing (SCGP). It seeks to obtain a significant reduction in grain size. To obtain effective strain maps and contact area maps between the sheet and the dice, the different stages of the SCGP process were simulated, using DEFORM 3D software, which is based on the finite element method (FEM). The simulation carried out allowed to optimize the SCGP process in aspects such as: the design of the die, the determination of the coefficient of friction, the optimum area of the sheet, as well as the necessary load, limited by the capacity of the press to be used. The severely deformed microalloyed steel sheet was microstructurally characterized by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The mechanical properties of the severely deformed material were evaluated by means of tension, microhardness and impact resistance tests, obtaining a 23% increase in the ultimate tensile strength and a 23% increase in the microhardness during the first cycle of the PSR process. During the second cycle, the last resistance increased 13% more and the microhardness increased 18% more. Elongation decreased 79% and impact energy was reduced 60% for the first cycle; for the second cycle, elongation and impact energy were reduced by an additional 6% and 1% respectively.

---

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de investigación a todas las personas que colaboraron y que me apoyaron durante esta etapa de mi vida y de forma muy especial, quiero dedicar este trabajo a:

La memoria de mi padre Gabriel García García, porque es la fuente de inspiración y motivación para la culminación de este logro.

Mi madre, Raquel Cedillo Zuñiga, por su amor, fé, comprensión y sobre todo el apoyo incondicional que me brindó.

Mi hermano y su familia, Gabriel Fernando García Cedillo, María de Lourdes Andrade Hernández, Mariana Alizé García Andrade y Gabriel Alejandro García Andrade, porque son mi motivación para cumplir mis metas y espero poder motivar a mis sobrinos en sus aspiraciones.

Mi prometida Alva Melania De La Puente Hernández por toda su paciencia, cariño, palabras de aliento y sobre todo por su amor incondicional.

Mis asesores Dr. José de Jesús Cruz Rivera y Dr. José Luis Hernández Rivera por su enseñanza, paciencia, supervisión y esfuerzo. Fueron parte esencial en mi trabajo y sin su apoyo y dedicación no hubiese podido completar mis estudios de maestría.

Y a mis amigos Alfonso Cruz, Perla Vazquez, Claudia González, Jorge Díaz, Ludwika Sagarminaga, Amelia Carreón y Cristian Mata.

---

## Agradecimientos

Al CONACYT por el apoyo económico otorgado a través de la beca con no. CV: 928993 para el desarrollo del presente trabajo de tesis.

A la empresa PEASA S.A. de C. V. por proporcionar el material que fue usado para este trabajo de investigación.

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, la Facultad de Ingeniería, al Centro de Capacitación e Ingeniería de Materiales (CCIM) y al Instituto de Metalurgia por brindarme las facilidades en el uso de sus instalaciones y equipo utilizado en el presente trabajo.

A los miembros de mi comité tutorial, el Dr. José de Jesús Cruz Rivera, el Dr. José Luis Hernández Rivera, la Dra. Esperanza Elizabeth Martínez Flores, al Dr. Mitsuo Osvaldo Ramos Azpeitia y al Dr. Salvador Antonio Palomares Sánchez por la colaboración y tiempo que le dedicaron a mi trabajo.

Al técnico Francisco Nuñez Ruiz por su enorme colaboración para la fabricación del herramental utilizado para el prensado semi-restringido.

A la técnica M.M.I.M. Claudia Guadalupe Elías Alfaro por el apoyo en la preparación de muestras mediante electropulido para la caracterización vía microscopía electrónica de transmisión. A los técnicos: M.M.I.M. Rosa Lina Tovar Tovar y L. Q. Claudia Hernández Galván por apoyar en la caracterización vía difracción de rayos X.

A la técnica M.M.I.M. Maria Guadalupe Hernández Miranda por su colaboración para la preparación de diversas muestras. Al técnico Alfredo Ruiz Prado por su colaboración para el uso de equipo en el laboratorio de metalografía y en la preparación de muestras.

A las alumnas de licenciatura: Anahí Ramírez Pozos y Daniela Ruíz Cigarrillo, por su colaboración y tiempo para el uso de la prensa con la que se implementó el prensado semi-restringido.

---

# Contenido

Resumen. ....	i
Abstract. ....	ii
Dedicatoria .....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido .....	v
Índice de Figuras .....	vii
Índice de Tablas.....	xi
Introducción.....	1
Capítulo 1 Prensado semi-restringido.....	2
1.1. Estado del arte de los procesos de deformación plástica severa. ....	3
1.2. Procesos de deformación plástica severa para láminas. ....	5
1.3. Prensado restringido de ranura (PRR).....	8
Capítulo 2 Determinación de los requerimientos para la simulación y la implementación del proceso PSR.....	18
2.1. Materia prima .....	19
2.2. Geometría de los dados.....	19
2.3. Simulación del prensado semi-restringido .....	21
Capítulo 3 Evaluación de las propiedades mecánicas y caracterización de la lámina de acero microaleado sometido al proceso de PSR. ....	24
3.1. Evaluación de propiedades mecánicas de la lámina de acero microaleado .....	24
3.2. Caracterización microestructural de la lámina de acero microaleado.....	27
Capítulo 4 Resultados de la simulación e implementación del proceso PSR....	29

---

4.1.	<i>Pre-proceso de la simulación del PSR.</i>	29
4.2.	<i>Simulación del PSR con geometría de 45 x 128 mm.</i>	34
4.3.	<i>Simulación del PSR con geometría de 12 x 128 mm.</i>	36
4.4.	<i>Simulación del primer ciclo de PSR con geometría de 6 x 128 mm.</i>	38
4.5.	<i>Simulación del segundo ciclo de PSR con una geometría de 6 x 128 mm.</i>	44
4.6.	<i>Resultados de la implementación del PSR.</i>	50
4.7.	<i>Implementación del primer ciclo del PSR.</i>	51
4.8.	<i>Imágenes de la microestructura vía MO de la lámina.</i>	53
4.9.	<i>Imágenes de la microestructura vía MEB de la lámina.</i>	56
4.10.	<i>Tamaño de grano</i>	61
<b>Capítulo 5 Discusión de los resultados de los ensayos de tensión, microdureza y resistencia al impacto.</b>		<b>63</b>
5.1.	<i>Resistencia a la tensión.</i>	63
5.2.	<i>Microdureza Vickers.</i>	67
5.3.	<i>Resistencia al impacto.</i>	69
<b>Conclusiones</b>		<b>72</b>
<b>Referencias</b>		<b>74</b>
<b>Apéndice.</b>		<b>79</b>

---

## Índice de Figuras

<i>Figura 1.1</i> Número de investigaciones por año de los procesos ECAP, HPT, MDF y ARB obtenidos de la plataforma digital de scopus.com	4
<i>Figura 1.2</i> Ilustración esquemática de la secuencia del PSR.	11
<i>Figura 1.3</i> Ilustración esquemática del proceso de refinamiento de la microestructura debido a la deformación plástica severa.	12
<i>Figura 1.4</i> Coordenadas nodales (i, j, k) y desplazamientos de los nodos de un elemento finito [22].	14
<i>Figura 2.1</i> Metodología experimental.	18
<i>Figura 2.2</i> Representación de la lámina de acero microaleado, con el esquema de tres probetas para el ensayo de tensión.	19
<i>Figura 2.3</i> Diseño del dado corrugado a) medidas de la corruga y b) diseño de las corrugas del dado.	20
<i>Figura 2.4</i> Ilustración del programa DEFORM 3D de la pieza de trabajo dividida en 140,000 elementos.	21
<i>Figura 2.5</i> Curva de esfuerzo-deformación del acero microaleado SAEJ-2340 añadida al programa DEFORM 3D.	22
<i>Figura 3.1</i> Esquema de la probeta de tensión.	24
<i>Figura 3.2</i> Medidas de la probeta de impacto [24].	26
<i>Figura 3.3</i> Esquema de las probetas de acero microaleado a) como materia prima y b) después del PSR para el ensayo de resistencia al impacto.	27
<i>Figura 4.1</i> a) Lámina de acero microaleado dividida en 140,000 elementos además del b) acomodo y zonas de contacto (color verde y azul) de los dados y la lámina (color amarillo) en el software DEFORM 3D.	30
<i>Figura 4.2</i> Paso 6 de 21 de la simulación del proceso PSR con una escala de colores correspondiente a la deformación efectiva para la lámina con un esquema de este paso.	31
<i>Figura 4.3</i> Paso 12 de 21 de la simulación del proceso PSR con una escala de colores de la deformación efectiva para la lámina con un esquema de este paso.	31

---

<i>Figura 4.4 Paso 21 de la simulación del proceso PSR con una escala de colores de la deformación efectiva para la lámina, junto con un esquema de este paso.</i>	32
<i>Figura 4.5 Lámina de acero microaleado deformada por el prensado con (a) dados corrugados y con (b) los dados planos en el programa DEFORM 3D.</i>	33
<i>Figura 4.6 Lámina de acero microaleado deformada después del (a) primer corrugado {primera etapa} y (b) primer aplanado {segunda etapa} en el programa DEFORM 3D.</i>	34
<i>Figura 4.7 Gráfica de carga contra desplazamiento del dado superior en el primer corrugado de la lámina.</i>	35
<i>Figura 4.8 Mapa de deformación efectiva después del primer corrugado de la lámina de 45 mm de ancho.</i>	36
<i>Figura 4.9 Gráfica de carga contra desplazamiento del dado superior en el primer corrugado de la lámina.</i>	37
<i>Figura 4.10 Mapa de deformación efectiva después del primer corrugado de la lámina con geometría de 12 mm de ancho.</i>	37
<i>Figura 4.11 Gráfica de la carga predicha vs el desplazamiento del dado superior del proceso PSR para las cuatro etapas del primer ciclo.</i>	39
<i>Figura 4.12 Imagen de la simulación del proceso PSR del primer ciclo en la primera etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.</i>	40
<i>Figura 4.13 Imagen de la simulación del proceso PSR del primer ciclo en la segunda etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.</i>	41
<i>Figura 4.14 Imagen de la simulación del proceso PSR del primer ciclo en la tercera etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.</i>	42

---

<i>Figura 4.15 Imagen de la simulación del proceso PSR del primer ciclo en la cuarta etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.</i>	43
<i>Figura 4.16 Gráfica de la carga predicha vs el desplazamiento del dado superior del proceso PSR en las cuatro etapas del segundo ciclo.</i>	44
<i>Figura 4.17 Imagen de la simulación del proceso PSR del segundo ciclo en la primera etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.</i>	45
<i>Figura 4.18 Imagen de la simulación del proceso PSR del segundo ciclo en la segunda etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.</i>	46
<i>Figura 4.19 Imagen de la simulación del proceso PSR del segundo ciclo en la tercera etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.</i>	47
<i>Figura 4.20 Imagen de la simulación del proceso PSR del segundo ciclo en la cuarta etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.</i>	48
<i>Figura 4.21 Gráfica de las dimensiones de la lámina predichas después de cada etapa de la simulación.</i>	49
<i>Figura 4.22 Lámina de acero microaleado sin deformar y después de la primera etapa del PSR.</i>	50
<i>Figura 4.23 Fotografías de la lámina en las cuatro etapas del primer ciclo del PSR, (a) primer corrugado, (b) primer prensado, (c) segundo corrugado y (d) segundo prensado.</i>	52

---

<i>Figura 4.24 Fotografías de la lámina en las cuatro etapas del segundo ciclo, (a) primer corrugado, (b) primer prensado, (c) segundo corrugado y (d) segundo prensado del PSR.</i>	53
<i>Figura 4.25 Micrografías de la lámina vía MO a) antes de la deformación y b) con dos ciclos de PSR.</i>	55
<i>Figura 4.26 Micrografías de la lámina de acero microaleado antes de la deformación en (a-b) RD, (c-d) ND y (e-f) TD vía MEB.</i>	57
<i>Figura 4.27 Micrografías de la lámina de acero microaleado después de dos ciclos de PSR en (a-b) RD, (c-d) ND y (e-f) TD vía MEB.</i>	58
<i>Figura 4.28 Microestructura de la lámina después de dos ciclos de PSR en la dirección ND (a-b) 6,000x y (c-d) ampliación de la zona indicada.</i>	59
<i>Figura 5.1 Gráfica del cambio de la elongación y del UTS.</i>	64
<i>Figura 5.2 Gráfica de la curva de esfuerzo-deformación de la lámina de acero microaleado en materia prima, con uno y dos ciclos de PSR.</i>	66
<i>Figura 5.3 Gráfica de los resultados de microdureza en la lámina de acero microaleado en su estado inicial y después de uno y dos ciclos de PSR.</i>	68
<i>Figura 5.4 Gráfica de los resultados del ensayo de impacto para los diversos ciclos de deformación.</i>	70
<i>Figura I.1 Diseño de los dados en 3D con el programa de AutoCAD 2018.</i>	79
<i>Figura I.2 Fotografías de la fabricación de los dados (a) rectificación de los dados con la fresadora (b) dados rectificadas.</i>	80
<i>Figura I.3 Fotografías de la fabricación de los dados (a) prueba del ranurado en un polimero, (b) ranurado del dado.</i>	81
<i>Figura I.4 Fotografías de la fabricación de los dados (a) dados ranurados terminados, (b) dado ranurado inferior.</i>	81
<i>Figura I.5 Fotografías de la fabricación de los dados planos en una fresadora.</i>	82

---

## Índice de Tablas

<i>Tabla 1.1 Procesos SPD para lámina según su año de invención.</i>	6
<i>Tabla 1.2 Aceros y grados según la resistencia [26].</i>	17
<i>Tabla 2.1 Composición química nominal del acero microaleado (% en peso).</i>	19
<i>Tabla 2.2 Datos de la lámina de acero microaleado SAEJ2340 añadidos al programa DEFORM 3D</i>	23
<i>Tabla 2.3 Valores de los parámetros usados en la simulación.</i>	23
<i>Tabla 3.1 Medidas de las probetas de tensión</i>	25
<i>Tabla 3.2 Medidas de la probeta de impacto [24].</i>	26
<i>Tabla 4.1 Predicción de la modificación de las medidas de la lámina después de cada etapa de la simulación del PSR en los dos ciclos.</i>	49
<i>Tabla 4.2 Datos de la medición de tamaño de grano, para la muestra en materia prima.</i>	62
<i>Tabla 5.1 Valores de esfuerzo último a la tensión y elongación para la lámina de acero microaleado con diferentes pasos de PSR.</i>	64
<i>Tabla 5.2 Valores de microdureza HV promedio en la lámina de acero microaleado en estado inicial y después de uno y dos ciclos de PSR.</i>	67
<i>Tabla 5.3 Datos de los resultados del ensayo de impacto por cm<sup>2</sup> para los diversos ciclos de deformación.</i>	69

## **Introducción.**

La importancia que tienen los procesos de deformación plástica severa, como el prensado semi-restringido, es que permiten refinar la microestructura de aleaciones alcanzando un tamaño de grano ultrafino (100 – 1000 nm) o nanométrico (<100 nm) [1]. Esta reducción, producirá un incremento en las propiedades mecánicas, como resistencia a la tensión, resistencia a la fatiga y dureza de láminas utilizadas en la industria automotriz [2].

Este trabajo tiene como principal objetivo determinar los parámetros óptimos del proceso de prensado semi-restringido (PSR), mediante simulación computacional basada en el método de elemento finito (MEF), para la implementación del PSR en una lámina de acero microaleado. La simulación computacional se llevará a cabo en el software DEFORM 3D versión 11.1. Los resultados de la simulación del proceso PSR, como la carga de procesamiento y la deformación efectiva de la lámina, nos permitirá obtener sus dimensiones apropiadas para la implementación del PSR en una prensa uniaxial con capacidad de 60 ton.

Se realizará la validación de los parámetros obtenidos en el proceso de simulación del PSR sobre una lámina de acero microaleado. Posteriormente se caracterizará su microestructura para evaluar la reducción en el tamaño de grano. Por último, se determinaron las propiedades mecánicas de la lámina, para correlacionarlas con el cambio microestructural provocado por el PSR.

## Capítulo 1 Prensado semi-restringido

Las propiedades mecánicas de metales y aleaciones pueden mejorarse usando diferentes mecanismos de endurecimiento: por tamaño de grano, por deformación, por solución sólida, por dispersión y por envejecimiento.

El refinamiento en el tamaño de grano de las aleaciones permite incrementar de manera significativa las propiedades mecánicas como: resistencia a la tensión, dureza, además de que también mejora el comportamiento a la fatiga de éstas. Para lograr lo anterior, es deseable lograr el refinamiento de la microestructura de una aleación para alcanzar un tamaño de grano ultrafino (100-1000 nm), pero es aún más deseable conseguir un tamaño de grano nanométrico (menor a 100 nm) [1].

Los materiales con tamaño de grano nanométrico pueden obtenerse partiendo de una construcción de átomo por átomo hasta producir el sólido (método ascendente), o bien se pueden obtener partiendo de un sólido con tamaño de grano micrométrico, sobre el cual se provocan grandes cantidades de deformación para refinar el grano (método descendente). El método ascendente presenta desventajas ya que se produce una muy pequeña cantidad de sólido y la estructura que se obtiene puede ser porosa. En el caso del método descendente, que se utilizará en esta investigación, se puede partir de piezas (lingotes, tubos o láminas) de tamaño comercial y a través de algún proceso de formado, provocar deformación plástica severa empleando la combinación de endurecimiento por tamaño de grano y endurecimiento por deformación [2]–[5].

Existen varios procesos que se pueden utilizar para producir deformación plástica severa, los cuales requieren de grandes presiones hidrostáticas y varias etapas de procesamiento, pero que no alteran la geometría de la pieza de manera significativa [3], [6]. En este trabajo de investigación nos enfocaremos en el prensado semi-restringido (PSR), que es una técnica especializada para la deformación severa de láminas, las cuales tienen aplicaciones en industrias aeronáutica y/o automotriz a nivel mundial.

Iniciaremos con una revisión del estado del arte de los procesos de deformación plástica severa, para posteriormente enfocarnos en los procesos especializados para láminas y finalmente revisaremos los detalles del prensado semi-restringido (PSR).

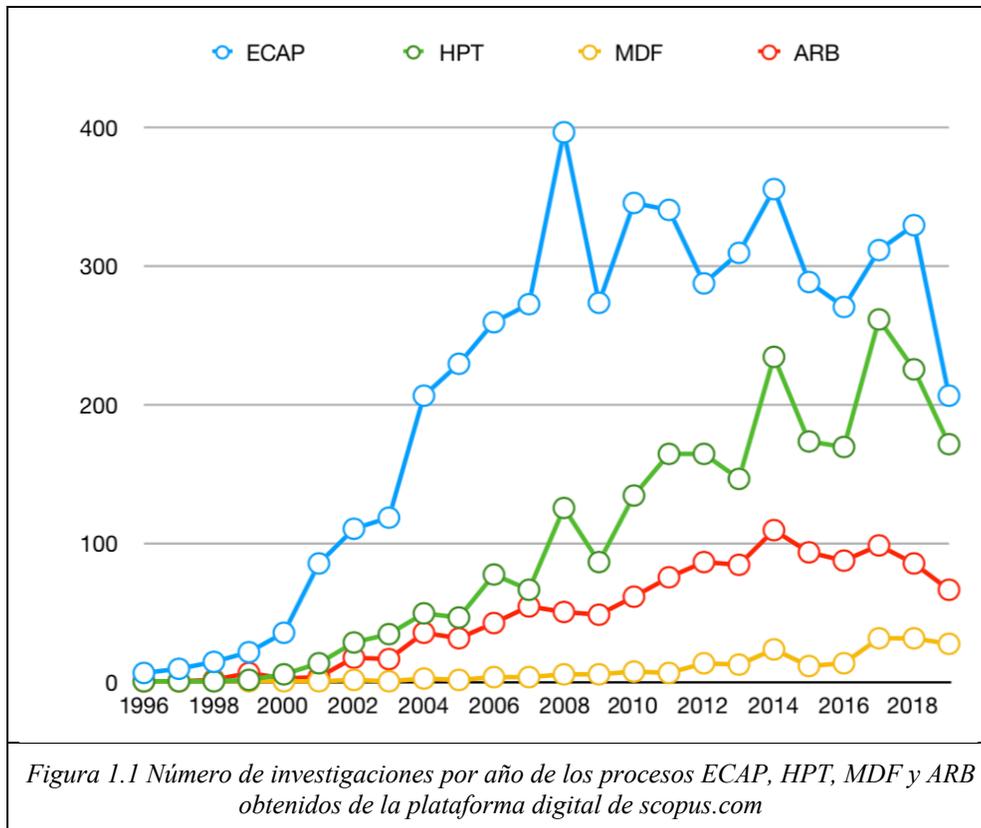
### 1.1. Estado del arte de los procesos de deformación plástica severa.

En 1930 el profesor Bridgman de la Universidad de Harvard [7], [8] realizó los primeros experimentos utilizando un proceso de deformación plástica severa, en el que aplicó alta presión sobre muestras sólidas. El profesor Bridgman utilizó un aparato que provoca un gran esfuerzo de torsión combinado con un esfuerzo de compresión, induciendo grandes cantidades de deformación a la aleación. Este proceso se perfeccionó más tarde en la Unión Soviética y se le dio el nombre de torsión a alta presión (*High Pressure Torsion*, HPT).

En 1980 el Dr. Segal *et al.* [7] desarrollaron el proceso de prensado en canal angular constante (*Equal Channel Angular Pressing*, ECAP). Sin embargo, en esa época se carecía de equipo especializado para el análisis detallado de la microestructura con una resolución adecuada para un tamaño de grano nanométrico. En 1990 Valiev *et al.* [5] reportaron resultados de un material nanoestructurado producido mediante ECAP y HPT. Demostraron que usando estos procesos se logra refinar la microestructura hasta un tamaño de grano promedio de 200 nm; utilizando aleaciones de aluminio (Al-1.5% Mg, Al-4% Cu-0.5% Zr y Al-5% Mg-2% Li-0.1% Zr) y acero (Fe -0.03% C- 1.3% Mn -0.15% Si 0.2% V -0.2% Cr. Para las aleaciones de aluminio el límite de cedencia incrementó hasta un 60% y la resistencia a la tensión en un 30%. Para el acero el tamaño de grano se redujó hasta un promedio de 700 nm, incrementando en 300% su límite de cedencia y en 200% su resistencia a la tensión, lo cual captó la atención de la comunidad científica.

En la Fig. 1.1 se presenta una gráfica del número de publicaciones por año relacionadas con los cinco procesos de deformación plástica severa más estudiados desde 1996 a la fecha, estos son: prensado de canal angular constante (ECAP), forja multidireccional (*Multi-Directional Forging*, MDF), torsión a alta presión (HPT) y unión por laminación acumulativa (*Accumulative Roll Bonding*, ARB). Esta figura muestra que a partir del año 2000 hay un

auge en las investigaciones de estos procesos debido a su optimización y al desarrollo de técnicas avanzadas de microscopía, las cuales permiten un análisis microestructural adecuado de las diversas aleaciones con tamaño de grano en escala nanométricas. En la Fig. 1.1 se observa que el proceso de ECAP es el mas ampliamente estudiado con un promedio anual de 300 publicaciones en los últimos diez años. Los procesos de deformación plástica severa se pueden dividir en tres grandes grupos según la geometría de la muestra que se va a deformar, estos son: muestras volumétricas (ECAP, HPT y MDF), de tubos y de láminas (ARB). De todos los procesos que se mencionan en la Fig. 1.1, el ARB es el único diseñado para deformar láminas, este proceso se empezó a estudiar en 1999 y los trabajos han aumentado hasta que a partir del año 2010 se tiene un promedio de 90 publicaciones por año. Otro proceso diseñado para láminas es el prensado semi-restringido (PSR) que no aparece en la gráfica, éste fue desarrollado en el año 2002 y hasta la fecha solo existen aproximadamente 73 publicaciones en total. Los estudios en este tipo de procesos son relevantes para su uso industrial por la mejora que producen en algunas propiedades mecánicas de la pieza sin modificar su forma.



## 1.2. Procesos de deformación plástica severa para láminas.

Las láminas se usan en diversas industrias como: construcción, manufactura de alimentos, formado de metales y la industria automotriz; en esta última es deseable contar con materiales resistentes y con un bajo peso, para ser usados en los vehículos. Por tanto, son de gran interés los procesos que mejoren las propiedades mecánicas de materiales en forma de lámina, sin modificar su geometría.

En la Tabla 1.1 se presentan, esquemática y cronológicamente, los procesos más usados para la deformación severa de láminas [7]. El primer proceso de deformación plástica severa para láminas fue el ARB, este proceso consiste en laminar la muestra, incrementando su longitud al doble, posteriormente la lámina se corta por la mitad, apilando una mitad sobre otra, para volver a laminar y alcanzar el espesor original. Durante el proceso se pueden presentar defectos o huecos entre las láminas unidas lo que representa una desventaja.

En el proceso de laminación asimétrica se tiene que controlar la velocidad, la dirección y el diámetro de los rodillos para lograr provocar una gran cantidad de deformación en la lámina.

El corrugado y enderezado repetitivo (CER) consta solamente de dos pasos: corrugado y enderezado; este proceso tiene dos variantes: continua y la discontinua. La presión que se aplica en este proceso es relativamente baja, en consecuencia, la deformación que experimenta la lámina también lo es. En el corrugado y enderezado por laminación repetitivo (CERL) se lamina la muestra a partir de dos tipos de rodillos: corrugados y planos. Sin embargo, no es un proceso continuo, ya que después de que la lámina pase por los rodillos corrugados y por los planos, se debe girar 180°, para posteriormente repetir el laminado corrugado y plano.

La laminación en canal angular constante (LCAC) y la extrusión de canal angular constante (EAFC) son similares, la diferencia es que la LCAC es un proceso continuo y el EAFC no lo es, no obstante, la dificultad de fabricación de los herramientales es un factor que se debe

tomar en cuenta. En el método cono-cono (MCC) la lámina procesada tiene la curvatura del herramental, para ciertas aplicaciones esto puede ser benéfico, pero para otras no.

El prensado de ranura restringido (PRR) propuesto por Shin *et al.* [3] es una técnica para deformar severamente una lámina. Los dados que se utilizan tienen una restricción longitudinal y transversal, para impedir el flujo de la lámina. El proceso que se utilizará en este trabajo de investigación es una variante del PRR. Se hará una revisión de las variantes de este proceso en la sección 1.3.

*Tabla 1.1 Procesos SPD para lámina según su año de invención.*

Proceso SPD	Inventor y año	Esquema
Unión por laminación acumulada, (ARB)	Saito <i>et al.</i> (1999)	
Laminación asimétrica	Kim <i>et al.</i> (2001)	
Corrugado y enderezado repetitivo, (CER)	Haung <i>et al.</i> (2001)	

Tabla 1.1 Continuación.		
Nombre del proceso	Inventor y año	Esquema
Laminación en canal angular constante, (LCAC)	Lee <i>et al.</i> (2002)	
Prensado restringido de ranura, (PRR)	Shin <i>et al.</i> (2002)	
Extrusión angular de fricción continua, (EAFC)	Huang <i>et al.</i> (2007)	
Método cono-cono, (MCC)	Bouaziz <i>et al.</i> (2007)	
Corrugado y enderezado por laminación repetitivo, (CERL)	Mirsepasi <i>et al.</i> (2012)	

### 1.3. Prensado restringido de ranura (PRR)

El prensado de ranura restringido (PRR) consiste en deformar una lámina usando dos pares de dados. En el primer par, los dados son corrugados y en el segundo, son planos que tienen una restricción longitudinal y transversal, estos se utilizan de manera alternativa para inducir una gran cantidad de deformación plástica [3]. El PRR se ha aplicado a diversos materiales, en primer lugar, Shin *et al.* [9] estudió el refinamiento de la microestructura de una lámina de aluminio puro mediante PRR obteniendo un tamaño de grano promedio de  $0.8 \mu\text{m}$  con 16 ciclos (los ciclos se describen en la sección del prensado semi-restringido). Zrník *et al.* [10] refinaron la microestructura de un aluminio puro hasta alcanzar un tamaño de grano promedio de  $\sim 1 \mu\text{m}$  con 4 ciclos de PRR. Los materiales que se han procesado mediante el PRR son: aleaciones de aluminio, cobre puro, aleaciones de cobre, acero de bajo contenido de carbono, níquel, titanio puro y magnesio [3]. El PRR tiene seis variantes, éstas se diferencian en el diseño de los dados o en la secuencia de deformación de la lámina tal como se describe a continuación.

El prensado de ranura (PR) es aquel en el que se usan dados corrugados y planos sin restricciones, por lo que la lámina puede fluir en todas las direcciones. Con este proceso se han trabajado metales como: aluminio puro, aleaciones de aluminio, cobre puro, titanio puro y magnesio [3]. Otra variante es el prensado de ranura con almohadilla de goma (PR-AG), en este proceso se fabrican tres dados en total, el primero es un dado corrugado, el segundo es un dado plano, y el tercero tiene una almohadilla de goma flexible que cumple con la función del dado corrugado y del dado plano, dependiendo con cual dado sea usado, sin perder la restricción longitudinal y transversal, sin embargo el PR-AG solo se ha utilizado con aluminio puro [11].

El prensado de ranura restringido de ruta cruzada (PRR-RC) reportado por Khodabakhshi *et al.* [12], utiliza al igual que en las otras variantes, dos pares de dados: uno corrugado y uno plano con restricciones longitudinal y transversal. Sin embargo, un ciclo de este proceso consta de ocho etapas, a diferencia de las cuatro etapas que utilizan las demás variantes del

PRR. Las primeras cuatro etapas se muestran en la Fig. 1.2, inmediatamente después se gira la lámina  $90^\circ$  sobre su eje y se realizan las mismas cuatro etapas, de manera que la lámina al terminar con un ciclo completo ha pasado por ocho etapas de formado. Otra característica del PRR-RC es que se debe utilizar una lámina de forma cuadrada, ya que, de no ser así, la deformación en la lámina no sería homogénea. Con el PRR-RC se han procesado láminas de acero de bajo contenido de carbono [3], [12]. Por último, el prensado semi-restringido (PSR) se diferencia del prensado de ranura restringida (PRR) en el diseño de sus dados. Los dados que se utilizan en el PSR restringen a la lámina solo longitudinalmente, esto tiene la ventaja de que la fabricación del herramental es más sencilla. El PSR solo se ha utilizado para láminas de aluminio puro [3], [13].

El prensado semi-restringido es el proceso que se utilizará en el presente trabajo de investigación, por lo que en la siguiente sección se detallarán las etapas en qué consiste el proceso, proponiendo un modelo para el cambio en la microestructura en una lámina procesada mediante el PSR.

- **Prensado semi-restringido**

En la mayoría de los procesos antes mencionados (PRR, PR, PR-AG y PSR) se llevan a cabo cuatro etapas que constan de dos corrugados y dos aplanados que se detallarán a continuación.

En la Fig. 1.2 (A) se presenta un esquema del diseño de los dados corrugados, [3], [6] mostrando un detalle de la corruga del dado. Se nombra a la parte más alta como cresta, a la más baja como valle y la sección que las une como flanco. El dado corrugado tiene una geometría que depende del espesor de la lámina, el ancho de cada corruga es igual a 3 veces el espesor de la lámina ( $3 \cdot t$ ), mientras la altura de la corruga es igual al espesor de la lámina ( $t$ ) (ver Fig. 1.2 A) y el flanco tiene un ángulo  $\theta$  de  $45^\circ$ . Es importante recalcar que las ranuras de los dados corrugados empiezan con una cresta y termina con el inicio de un valle como se muestra en la Fig. 1.2 (A), es decir, que son asimétricas. En la misma figura se observan unas paredes grises que son las restricciones del dado que impiden el flujo longitudinal de la lámina. En la Fig. 1.2 (B-F) se muestra la secuencia de etapas del PSR. Al conjunto de las

etapas de corrugado-prensado y corrugado-prensado se le denomina un ciclo del proceso. Al completar un ciclo del PSR la lámina tendrá una deformación efectiva de 1.16 teóricamente.

- **Etapas del PSR**

A continuación, detallaremos las etapas del PSR. En primer lugar, se alinean los dados corrugados y se coloca entre ellos la lámina, de manera que el dado superior esté separado una distancia  $2t$  ( $t$  es el espesor de la lámina) del dado inferior. Se procede con el prensado de la lámina, esto proporcionará un esfuerzo cortante en los flancos de las ranuras induciendo una deformación efectiva de 0.58, que se indica con la región rayada de color morado de la Fig.1.2 (B). En las crestas y valles que se forman en la lámina no se provoca deformación, representado con las zonas blancas de la muestra de la Fig.1.2 (B).

En la segunda etapa, se endereza la lámina usando los dados planos, en esta etapa las regiones deformadas están sujetas a un esfuerzo por cizallamiento inverso, llegando hasta 1.16 de deformación efectiva (zonas moradas), mientras los valles y crestas no sufren deformación, zonas en blancas en la Fig. 1.2 (C). Antes de empezar la tercera etapa, la lámina se gira  $180^\circ$  sobre su eje vertical, representado en la Fig. 1.2(D), esto permitirá deformar las zonas de la lámina que no habían sido deformadas. En la tercera etapa, la lámina aplanada se prensa con los dados corrugados como en la primera etapa, induciendo 0.58 de deformación efectiva en las zonas blancas que no habían sido deformadas como se ve en la Fig. 1.2 (E). En la cuarta etapa, la lámina corrugada se endereza con los dados planos, induciendo una deformación efectiva de 0.58 en las zonas achuradas de la Fig. 1.2 (F). La lámina enderezada ahora tiene una deformación homogénea de 1.16, como se representa con la línea morada en la Fig. 1.2 (F). Se acumula 1.16 de deformación efectiva por cada ciclo del PSR que se le aplique a la lámina.

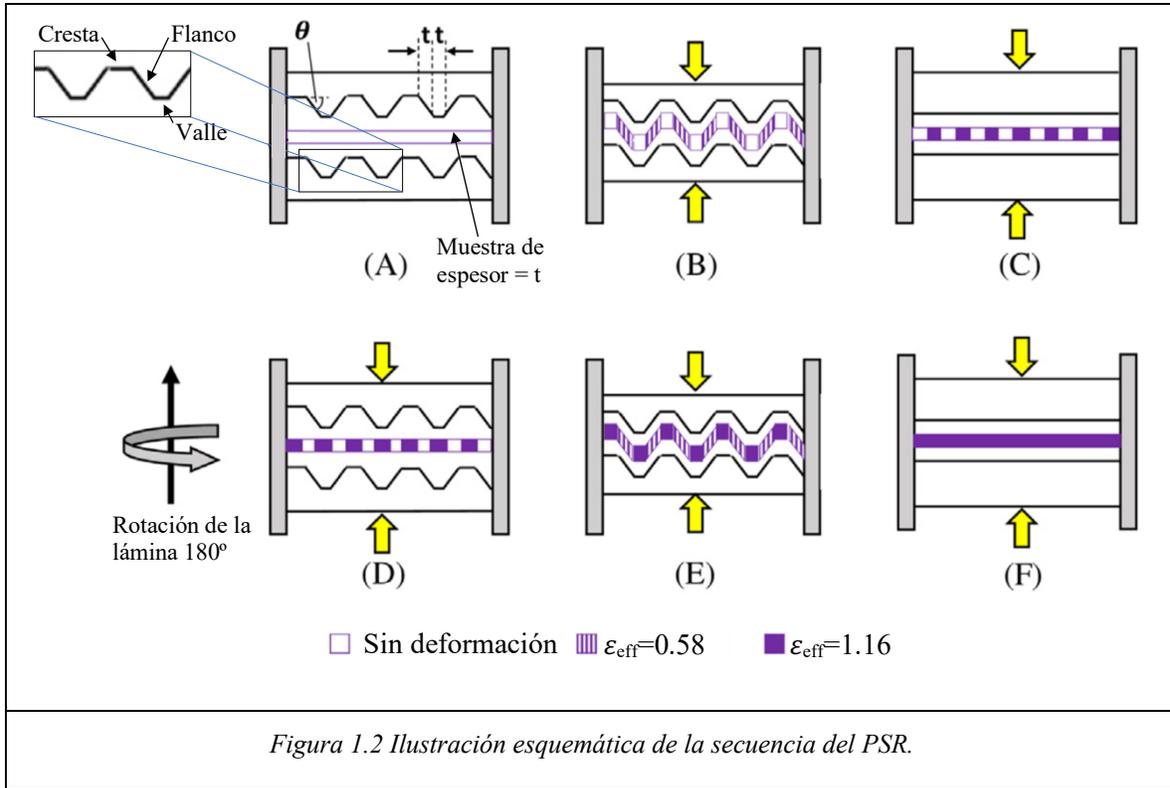
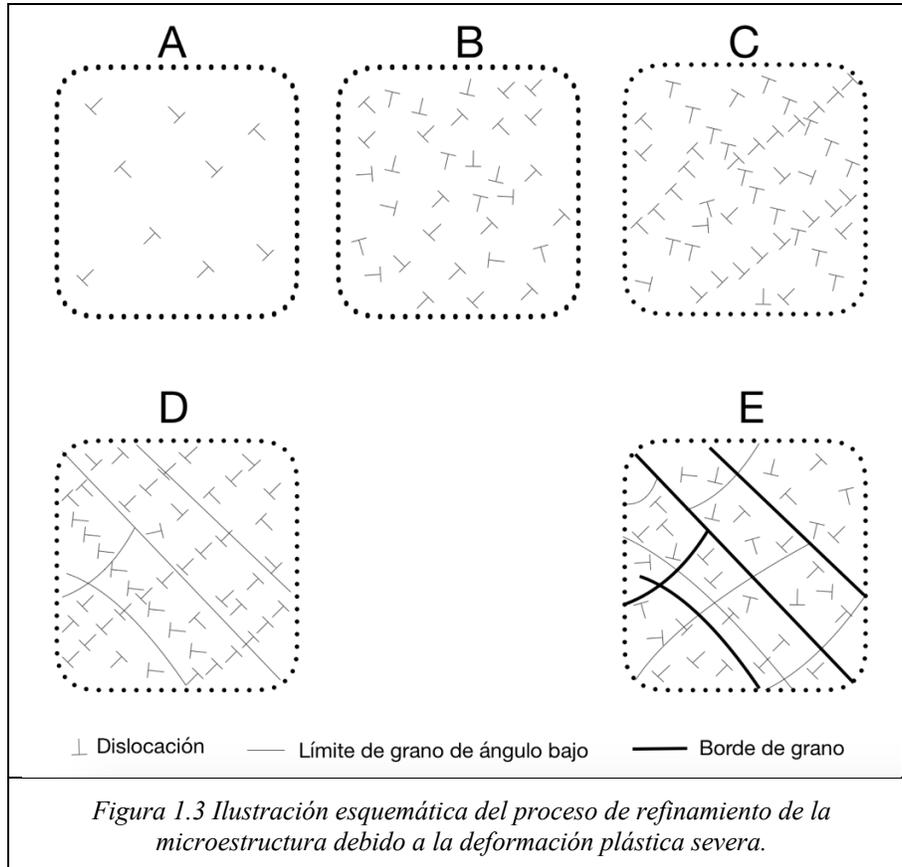


Figura 1.2 Ilustración esquemática de la secuencia del PSR.

• **Modelo para el refinamiento de la microestructura**

Al hacer un ciclo completo de prensado, se provoca una gran cantidad de deformación plástica como resultado del gran esfuerzo cortante inducido con los dados, a esto se le denomina deformación plástica severa. [7], [13], [14]. En la Fig. 1.3 se representa de forma esquemática el proceso del refinamiento microestructural de la lámina debido a un proceso de deformación plástica severa [15]. En la condición inicial un grano del material recocido contiene una baja densidad de dislocaciones representadas con una T invertida como se muestra en la Fig. 1.3A. Después de cierta cantidad de deformación, se crean más dislocaciones, Fig. 1.3B, éstas se acumulan formando una maraña de dislocaciones, Fig. 1.3C. Al inducir más deformación se van acumulando más dislocaciones, de tal manera que éstas pueden formar sub-granos debido a la formación de bordes de grano de ángulo pequeño, como un acomodo de varias dislocaciones alineadas, Fig. 1.3D. Esto es provocado porque se reduce localmente el número de sistemas de deslizamiento activos [16]. Si se sigue deformando la aleación, algunos bordes de ángulo pequeño pueden transformarse en bordes de grano de ángulo grande debido al desorden acumulado en estas zonas, esto se representa en forma de líneas continuas de color negro en la Fig. 1.3E. Por último, después de una gran

cantidad de deformación vemos como el grano original se dividió formando granos más pequeños, pudiendo llegar hasta tamaños ultrafinos o nanométricos, lo cual provoca el refinamiento de la microestructura de la aleación como se muestra en la Fig. 1.3E. El refinamiento de la microestructura produce un aumento en las propiedades mecánicas como: la dureza, resistencia a la tensión y a la fatiga [3].



Shirdel *et al.* [17] reportó que hay un incremento del esfuerzo máximo a la tensión (*ultimate tensile strength*, UTS) y en el límite de cedencia en una lámina de aluminio puro, provocado por cuatro ciclos de PSR. Adicionalmente, utilizó el software ABAQUS/Explicit con el fin de conocer la deformación plástica, la fuerza de prensado y el flujo de la lámina durante el PSR.

ABAQUS/Explicit es un software basado en el método de elemento finito (MEF) el cual es de ayuda para calcular parámetros que no es posible sean determinados experimentalmente. El uso de simulación computacional basada en el MEF ayuda a la optimización de un proceso como es el PSR. En este trabajo se utilizará simulación computacional, por lo que en la siguiente sección se establecerán las bases del método, haciendo un análisis de los resultados publicados por otros autores a partir de los mapas de deformación y esfuerzo efectivos obtenidos mediante este método.

- **Simulación computacional del PSR mediante el método de elemento finito (MEF).**

La ventaja de utilizar simulación computacional en el PSR es la optimización del proceso, ahorrando recursos y tiempo. La simulación se realiza mediante el método de elemento finito (MEF), para la determinación de parámetros necesarios para la implementación experimental adecuada del proceso. El método de elementos finitos (MEF) es una técnica matemática para resolver ecuaciones diferenciales parciales asociadas a un fenómeno físico para estructuras discretas. Considera a la estructura o pieza como un ensamble de pequeñas partículas de tamaño finito. Las partículas de tamaño finito son llamadas elementos finitos. Los puntos donde los elementos finitos están interconectados se conocen como nodos o puntos nodales y el procedimiento de seleccionar los nodos se denomina discretización. Existen diferentes formas de elementos para discretizar un objeto el más común son los triángulos (2D) o tetraedros (3D), estos son los tipos de elementos que aunque permiten mallar geometrías complejas, generan mallas con el mayor número de interconexiones. En cambio con formas como cuadriláteros (2D) o hexaedros (3D) son formas más sencillas y reducen la exactitud del objeto a discretizar [18].

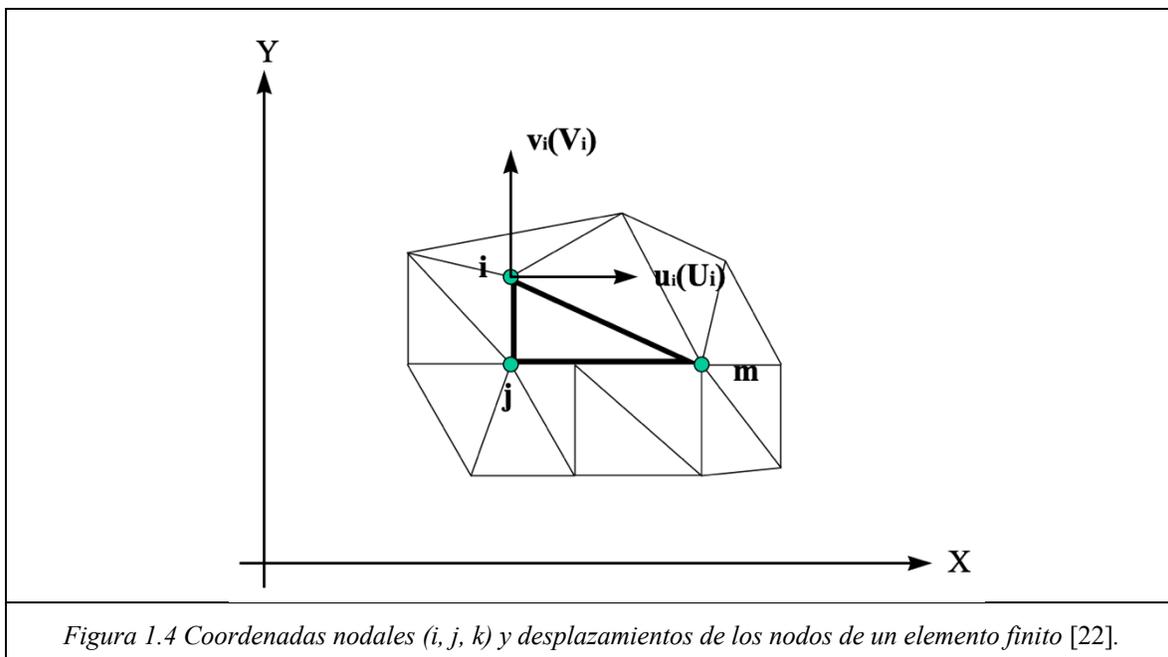
Para resolver los problemas mediante MEF es común usar el método de desplazamiento o método de rigidez, el cual asume el desplazamiento de nodos como las incógnitas del problema. El método necesita de elementos que se interconecten por nodos entre sí, a lo largo de un eje o una superficie común, de tal manera que aún después de alguna deformación, los nodos permanezcan conectados. Las ecuaciones son expresadas en términos de desplazamiento nodales usando ecuaciones de equilibrio en cada nodo. Esto resulta en dos

diferentes incógnitas (fuerzas y desplazamientos) en el análisis y el uso de diferentes matrices asociadas a sus planteamientos (flexibilidad y rigidez) [19]–[21].

Los métodos matriciales, son una herramienta necesaria en el uso del método de elementos finitos, ya que por la cantidad de ecuaciones que se emplean, es necesario la simplificación de las ecuaciones de elementos de rigidez y una de sus grandes aplicaciones, es en la programación[18], [22].

En la actualidad existe un a gran variedad de programas basados en el MEF, que fueron creados para acelerar el proceso de solución de cierto fenómeno. Los programas identifican pequeñas regiones para resolver la ecuación matricial para posteriormente sumarlas nodo por nodo. El resultado por dicho método es aproximado y resultará en el desarrollo de ecuaciones matriciales globales. Para ejemplificar se toma en cuenta un elemento finito  $e$  que esta definido por sus nodos  $(i, j, m)$  y por su contorno formado por líneas que los unen. Los desplazamientos  $\mathbf{u}$  de cualquier punto del elemento se aproxima por un vector columna  $\vec{\mathbf{u}}$ :

$$\vec{\mathbf{u}} = \sum N_i a_i^e = [N_i \ N_j \ \dots] \begin{pmatrix} \vec{a}_i \\ \vec{a}_j \\ \dots \end{pmatrix}^e = N a^e \quad (1)$$



Donde  $N$  son funciones de posición y  $a^e$  es un vector formado por los desplazamientos nodales de elementos considerados. En un caso de una tensión plana tenemos que:

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix}, \quad a_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Donde  $u$  son los movimientos horizontales y verticales en cada punto cualquiera del elemento y  $a_i$  son los desplazamientos del nodo  $i$ . Las funciones  $N_i$ ,  $N_j$  y  $N_m$  han de escogerse de tal forma que al sustituir en (1) las coordenadas nodales, se obtengan los desplazamientos nodales. Al conocer los desplazamientos de todos los puntos del elemento, se pueden determinar las deformaciones ( $\epsilon$ ) en cualquier punto [18]–[20], [22].

El grado de exactitud del método depende del nivel de discretización del elemento, entre más fina sea la discretización el grado de error será menor, lo cual implica utilizar una gran cantidad de recursos de cómputo para poder ser resueltos. De forma sencilla, existen seis pasos de análisis de elementos finitos que se resumen de la siguiente manera:

1. Discretizar el dominio. Este paso implica la subdivisión del dominio en elementos y nodos.
2. Formar las matrices de rigidez de los elementos. Las ecuaciones de rigidez se describen para cada elemento en el dominio.
3. Montaje de la matriz de rigidez global. Mediante el enfoque directo de rigidez.
4. La aplicación de las condiciones de frontera. A su vez aplicando las cargas aplicadas y los desplazamientos.
5. Resolver las ecuaciones. Esto se hará mediante la partición de la rigidez total.
6. Post-procesamiento. Obteniendo información adicional como las fuerzas y tensiones [19].

La simulación computacional se ha utilizado en diversos trabajos de deformación plástica severa, sin embargo, Shirdel *et al.* [17] son los únicos que han realizado simulación computacional del prensado semi-restringido en una lámina de aluminio puro, obteniendo mapas de deformación efectiva y de esfuerzos efectivos aplicados a la lámina en las diversas etapas del proceso. También definieron tres etapas relevantes durante el corrugado del PSR comparando con una gráfica que muestra la carga del proceso contra el desplazamiento del dado superior. Con estos parámetros se puede conocer la capacidad de la prensa que debe utilizar y si el material se está deformando como se reporta la literatura [2].

El material por usar en este trabajo de investigación es una lámina de acero microaleado el cual suele tener una composición con un bajo contenido de carbono (0.05 - 0.25% C) para aumentar su formabilidad y soldabilidad y un contenido de manganeso de hasta 2.0%. Puede incluir diferentes elementos aleantes como: cromo, níquel, molibdeno, cobre, nitrógeno y circonio en diversas combinaciones según su aplicación, y su principal característica es contener elementos de microaleación (alrededor de 0.15 – 0.1% en peso) como lo son el niobio, titanio y vanadio [23], [24]. Las propiedades son influenciadas, además de su composición, por su procesamiento termomecánico controlado (*Thermomechanical Controlled Processes*, TMCP) y las condiciones de templado acelerado posterior a la TMCP [25].

El acero que utilizaremos lo describe la norma SAE J2340 en forma de lámina, en específico el grado 490XF que se puede apreciar en la Tabla 1.2. Esto significa que esta aleado con elementos formadores de nitruros y carburos, tales como el niobio, titanio y vanadio, ya sea por separado o en combinación. El niobio, titanio o vanadio como mínimo debe de haber 0.005% en peso. También en su fabricación se controla la forma y la fracción en volumen de las inclusiones de sulfuro de manganeso para mejorar la flexión de la lámina para algunas aplicaciones. Estos aceros se usan en aplicaciones de conformado plástico y generalmente para componentes exteriores de carros [26].

Tabla 1.2 Aceros y grados según la resistencia [26].

Descripción del acero	Tipo y grado	Grados de resistencia disponibles (MPa)
Dent Resistant Non-Bake Hardenable	A	180, 210, 250, 280
Dent Resistant Bake Hardenable	B	180, 210, 250, 280
High Strength Solution Strengthened	S	300, 340
High Strength Low Alloy	X & Y	300, 340, 380, 420, 490, 550
High Strength Recovery Annealed	R	490, 550, 700, 830
Ultra-High Strength Dual Phase	DH & DL	490, 550, 700, 800, 950, 1000
Ultra-High Strength Low Carbon Martensite	M	800, 900, 1000, 1200, 1300, 1400, 1500

El objetivo de este trabajo es optimizar el PSR mediante simulación computacional, para posteriormente implementar el proceso deformando una lámina de acero microaleado. Se realizará la caracterización microestructural y evaluación de las propiedades mecánicas de esta lámina, al ser sometida a 1 y 2 ciclos de deformación plástica severa mediante el proceso PSR.

## Capítulo 2 Determinación de los requerimientos para la simulación y la implementación del proceso PSR.

Para lograr la simulación del proceso PSR en el software DEFORM 3D se alimentó la curva de esfuerzo deformación real así como datos de conductividad térmica, capacidad calorífica y emisividad térmica, para posteriormente optimizar los parámetros del proceso PSR. En la Fig. 2.1, se muestra la metodología y la secuencia de experimentos que se utilizará en el presente trabajo de investigación.

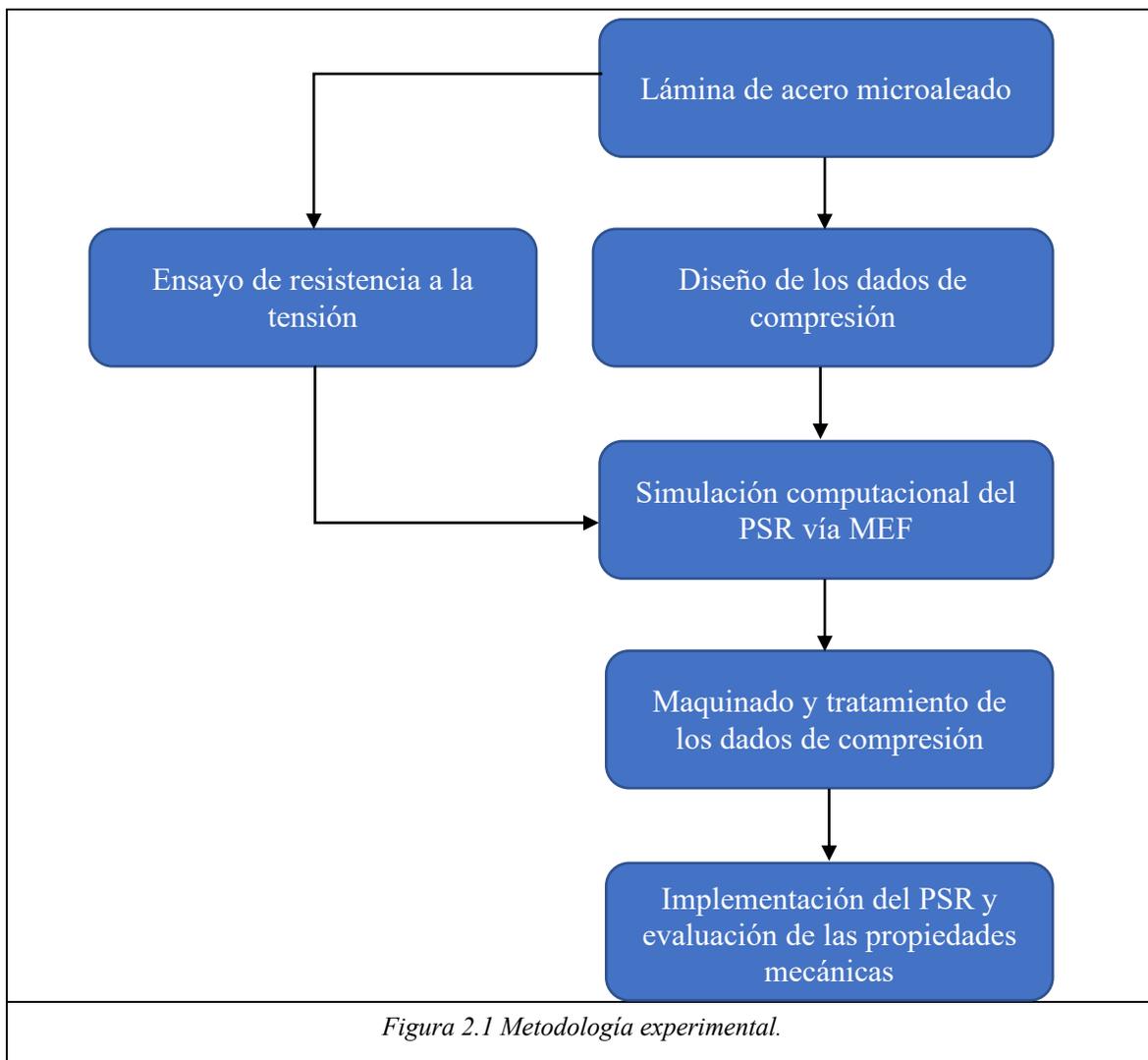


Figura 2.1 Metodología experimental.

## 2.1. Materia prima

La materia prima fue una lámina donada por la empresa “PEASA – Productos Especializados de Acero S.A. de C.V.”. Esta lámina de acero pertenece a la norma SAE-J2340 [26]. En la Tabla 2.1 se muestra la composición nominal de la materia prima.

Tabla 2.1 Composición química nominal del acero microaleado (% en peso).

Fe	Carbono	Manganeso	Fósforo	Azufre	Silicio	Aluminio
Base	0.056	1.483	0.008	0.004	0.185	0.035
Vanadio	Titanio	Cromo	Molibdeno	Cobre	Níquel	Niobio
0.061	0.043	0.015	0.004	0.028	0.015	0.062

## 2.2. Geometría de los dados

El diseño de los dos pares de dados se realizó con el programa de AutoCAD 2018. El área de prensado de la lámina fue diseñada para poder obtener tres probetas proporcionales para el ensayo de tensión que cumplan las medidas estándar según la norma ASTM E8 [27], como se observa en la Fig. 2.2.

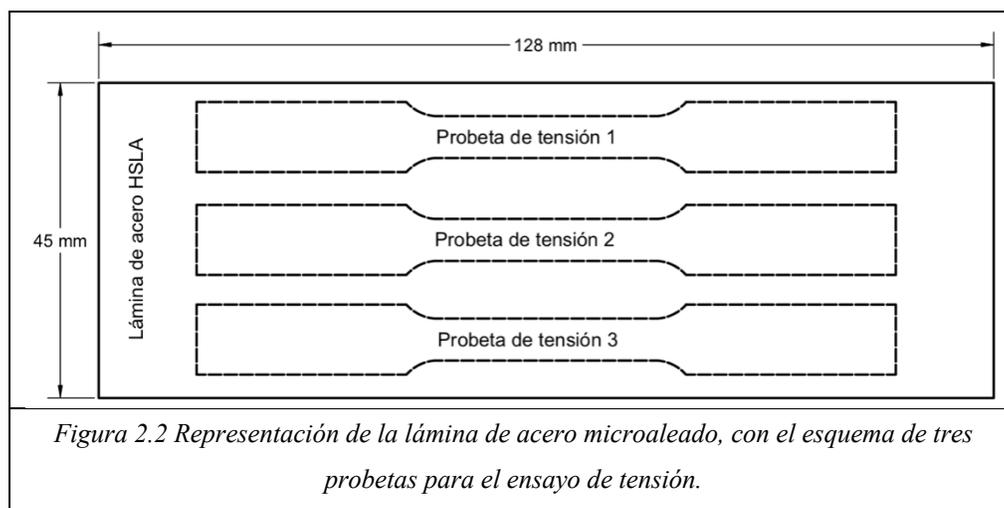
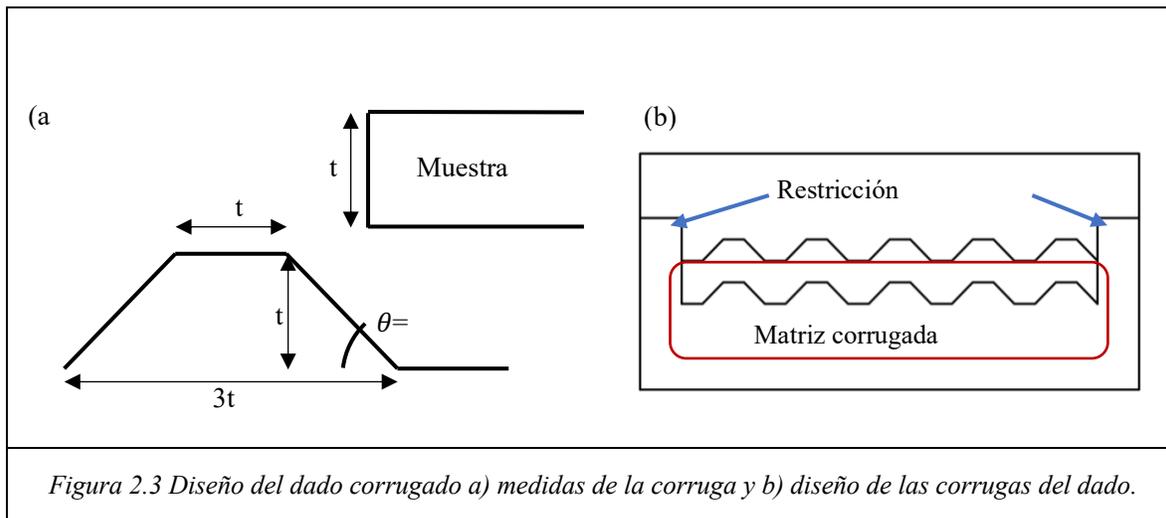


Figura 2.2 Representación de la lámina de acero microaleado, con el esquema de tres probetas para el ensayo de tensión.

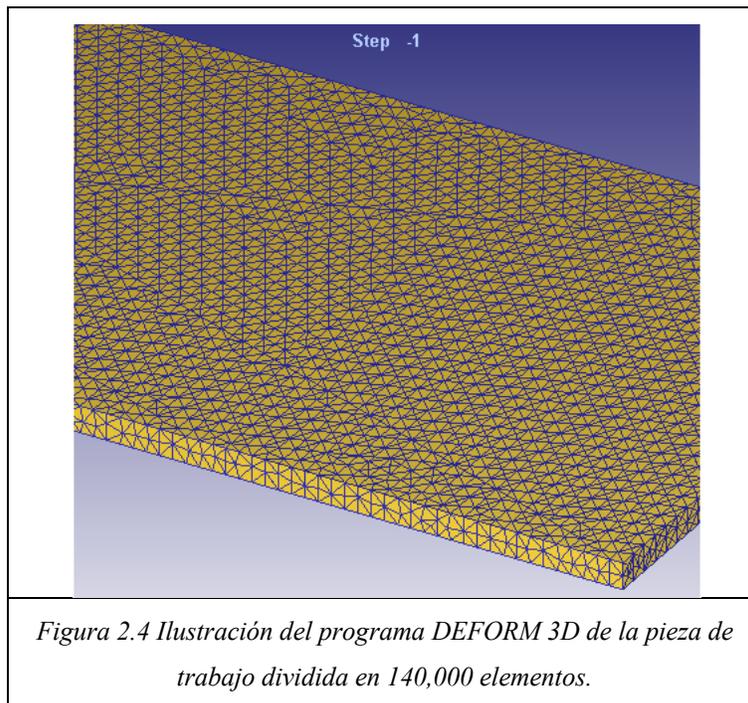
Además del área de prensado, otro factor relevante es la dimensión de los dientes en los dados corrugados, en el trabajo de Gupta *et al.* [3] se especifica que cada diente debe ser de una altura equivalente al espesor de la lámina, el ancho de la base mayor del diente equivalente a tres veces el espesor de la muestra y el ángulo del plano inclinado debe ser de  $45^\circ$ . Las medidas son especificadas en la Fig. 2.3(a). El diseño de las corrugas en cada dado deben coincidir, el valle del dado inferior con una cresta del dado superior. Otro parámetro relevante en los dados corrugados, es que la matriz tiene que ser asimétrica con el fin de que la lámina pueda deformarse en diferentes zonas después de corrugarse y aplanarse en la posición original y girándola  $180^\circ$ , se vuelve a deformar por el par de dados corrugados y finalmente se deforma con los dados planos, provocando con esto una deformación homogénea en la lámina. En el caso de los dos pares de dados en el prensado semi-restringido, se tiene una barrera para que la lámina no pueda fluir longitudinalmente, estas características se pueden apreciar en la Fig. 2.3(b).



Se estableció que las medidas del área de prensado de la lámina de acero microaleado fueran de (128 x 45 mm) y con un espesor de 2 mm. El diseño de los dados fue realizado como un modelo en 3D del tipo sólido, con el fin de exportar el archivo correspondiente con la extensión “\*.stl” de cada pieza para posteriormente poder hacer la simulación del prensado semi-restringido en el programa DEFORM 3D versión 11.1.

### 2.3. Simulación del prensado semi-restringido

La simulación del proceso de prensado semi-restringido se realizó en el programa DEFORM 3D versión 11.1, el cual está basado en el MEF. Al importar los dos pares de dados (ranurados o planos) y la pieza de trabajo, tienen que ser alineados entre sí y colocar la lámina encima del dado inferior y el dado superior por encima, para posteriormente continuar con los parámetros de la simulación. La pieza de trabajo que en este caso es la lámina de acero microaleado, tiene que ser dividida en elementos tetragonales que abarquen todo el espesor de la pieza de trabajo, esto se puede observar en la Fig. 2.4. Para una aproximación más exacta se dividió la pieza de trabajo en 140,000 elementos tetragonales.



A cada par de dados y a la pieza de trabajo se les tuvo que agregar ciertas características para la simulación, los pares de dados se consideraron como objetos de tipo rígido, el material de los dados fue un acero D2 que se buscó en la base de datos del programa DEFORM 3D versión 11.1. La lámina de acero microaleado fue tomada como un material tipo plástico, sin embargo, sus propiedades térmicas, elásticas y plásticas no estaban disponibles en la base de datos del programa, por lo cual se tuvieron que agregar. Para agregar un nuevo material, se

tiene que agregar la curva de esfuerzo-deformación real y propiedades térmicas del material. La curva de esfuerzo-deformación real fue obtenida a través de un ensayo de tensión aplicado a la lámina de acero microaleado, descrito en la sección 3.1.

La sección plástica de la curva de esfuerzo-deformación de la lámina de acero microaleado se añadió al software DEFORM 3D versión 11.1 en las condiciones en las que el material fuese a trabajar como se presenta en la Fig. 2.5, donde se observa dicha curva y los valores del esfuerzo verdadero y de la deformación verdadera con una velocidad de deformación de  $1s^{-1}$  a una temperatura de  $20^{\circ}C$ . También se agregaron propiedades térmicas como: conductividad térmica, capacidad calorífica, emisividad térmica y la densidad, presentados en la Tabla 2.2, los cuales fueron tomadas de un acero equivalente en la norma europea EN 10149-2, específicamente el acero S460MC [28].

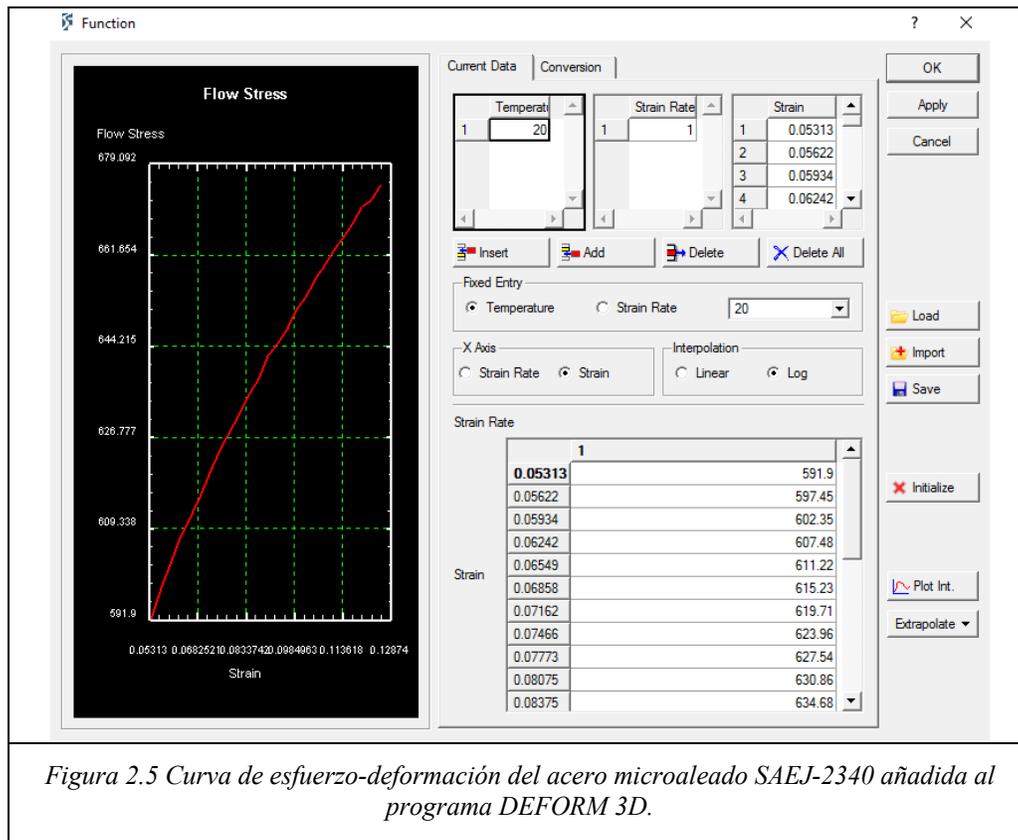


Figura 2.5 Curva de esfuerzo-deformación del acero microaleado SAEJ-2340 añadida al programa DEFORM 3D.

*Tabla 2.2 Datos de la lámina de acero microaleado SAEJ2340 añadidos al programa DEFORM 3D*

<b>Descripción</b>	<b>Parámetro</b>
Modulo de Young	210,000 MPa
Coefficiente de Poisson	0.3
Expansión térmica	0.000012 C <sup>-1</sup>
Conductividad térmica	48.49 W/m·K
Capacidad calorífica	474.1 kJ/kg·K
Emisividad	0.7
Densidad	7.87x10 <sup>-9</sup> ton/mm <sup>3</sup>

Los siguientes parámetros de proceso (Tabla 2.3) fueron introducidos en el software para realizar la simulación .

*Tabla 2.3 Valores de los parámetros usados en la simulación.*

<b>Descripción</b>	<b>Parámetro</b>
Tipo de pieza para la lámina	Plástica
Tipo de pieza para los dados	Rígidos
Coefficiente de fricción	0.12
Profundidad de interferencia de la malla relativa.	0.7
Constante de deformación (Formado en frío)	0.08
Coefficiente de transferencia de calor	5000 W/(m <sup>2</sup> ·°C)
Coefficiente de convección	20 W/(m <sup>2</sup> ·°C)
Temperatura de rabajo	20°C
Número de pasos	20
Velocidad del dado superior	0.5 mm/s
Tamaño del paso	0.1 mm/paso
Desplazamiento del dado superior	2 mm

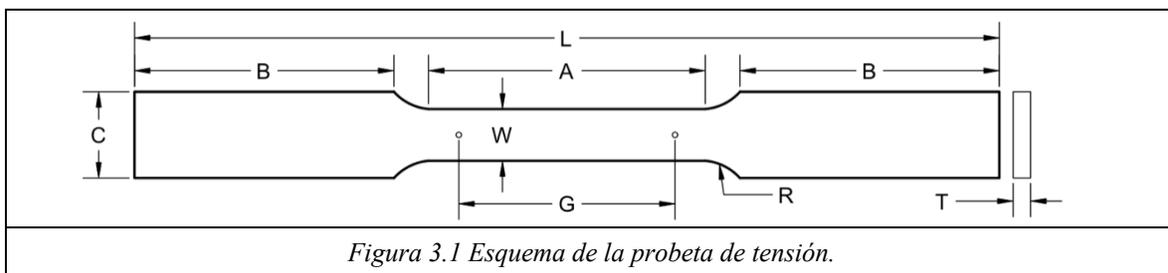
## Capítulo 3 Evaluación de las propiedades mecánicas y caracterización de la lámina de acero microaleado sometido al proceso de PSR.

Se realizaron diversos ensayos para comprobar los valores de las propiedades mecánicas del acero microaleado antes y después de uno y dos ciclos del prensado semi-restringido, de igual manera se efectuó una caracterización microestructural para verificar si estos cambios son ocasionados por un refinamiento en el tamaño de grano como se ha reportado previamente en la literatura consultada [3], [6], [12], [29].

### 3.1. Evaluación de propiedades mecánicas de la lámina de acero microaleado

Las propiedades mecánicas que han sido reportadas en diferentes trabajos de investigación [6], [12], [29] y las que se midieron con el propósito de comprobar el efecto de la deformación plástica severa en la lámina de acero microaleado para esta tesis fueron: resistencia a la tensión, resistencia al impacto y microdureza.

El ensayo de tensión de la materia prima se realizó en una probeta con geometría plana de acuerdo a la norma ASTM E8 [27] con las dimensiones que se muestran en la Tabla. 3.1, sin embargo, las dimensiones de las probetas para los ensayos de las muestras deformadas vía el prensado semi-restringido se tuvieron que modificar, estas se especifican en la Tabla 3.1. Los ensayos se realizaron en una máquina universal marca “SHIMADZU” modelo UH-600KNI con capacidad de 60 toneladas y con una velocidad de cabezal de 0.5 mm/s. La evaluación de la resistencia a la tensión para los diferentes ciclos del prensado comprobarán el cambio en la microestructura del material.



<i>Tabla 3.1 Medidas de las probetas de tensión</i>	Sub-tamaño (mm)	Sub-tamaño modificada (mm)
G — Longitud calibrada	25.0	25.0
W — Ancho	6.0	3.0
T — Espesor	2.0	2.0
R — Radio del hombro	6.0	7.0
L — Longitud total	100.0	128.0
A — Longitud de la sección reducida	32.0	36.0
B — Longitud de la sección de agarre	30.0	42.0
C — Anchura de la sección de agarre	10.0	6.0

El ensayo de microdureza se realizó en la lámina de acero microaleado según la norma ASTM E384 [30], se utilizó un microdurometro marca Shimadzu modelo HMV-G 21DT, usando una punta piramidal con una carga de 200 gramos-fuerza y un tiempo de permanencia de 15 segundos. Se hicieron diez indentaciones para obtener la microdureza promedio.

Por último se realizó el ensayo de resistencia al impacto de acuerdo a la norma JIS Z 2242 [31], desarrollada por la empresa HONDA para la evaluación de la tenacidad en láminas, esto debido a que la norma ASTM E23 [32] es específica para muestras con espesores de 10 mm. La norma JIS Z 2242 contempla, que la muestra debe ser de 55 mm de largo por 10 mm de ancho y 10 mm de espesor, con una muesca de tipo V en medio de la probeta en caso de que la muestra no alcance el espesor indicado se acoplarán las muestras hasta obtener el espesor de 10 mm, es decir la muestra debe tener un espesor de 10 mm al empalmar dos o más muestras, colocando tornillos para poder unir las muestras acopladas. El número de muestras a utilizar dependerá directamente del espesor de la muestra, teniendo como referencia la Tabla 3.1, las medidas de la probeta se especifican en la Fig. 3.2.

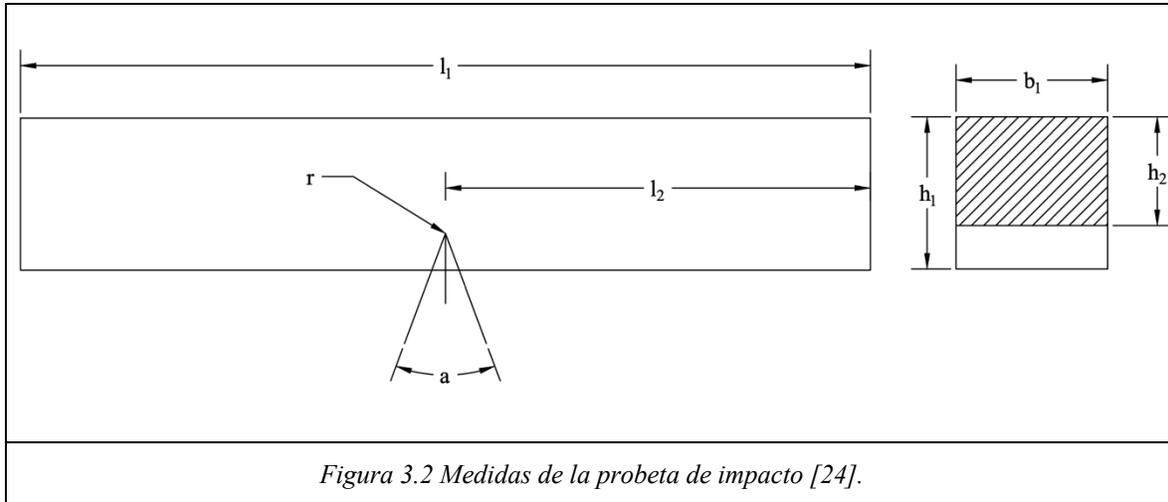
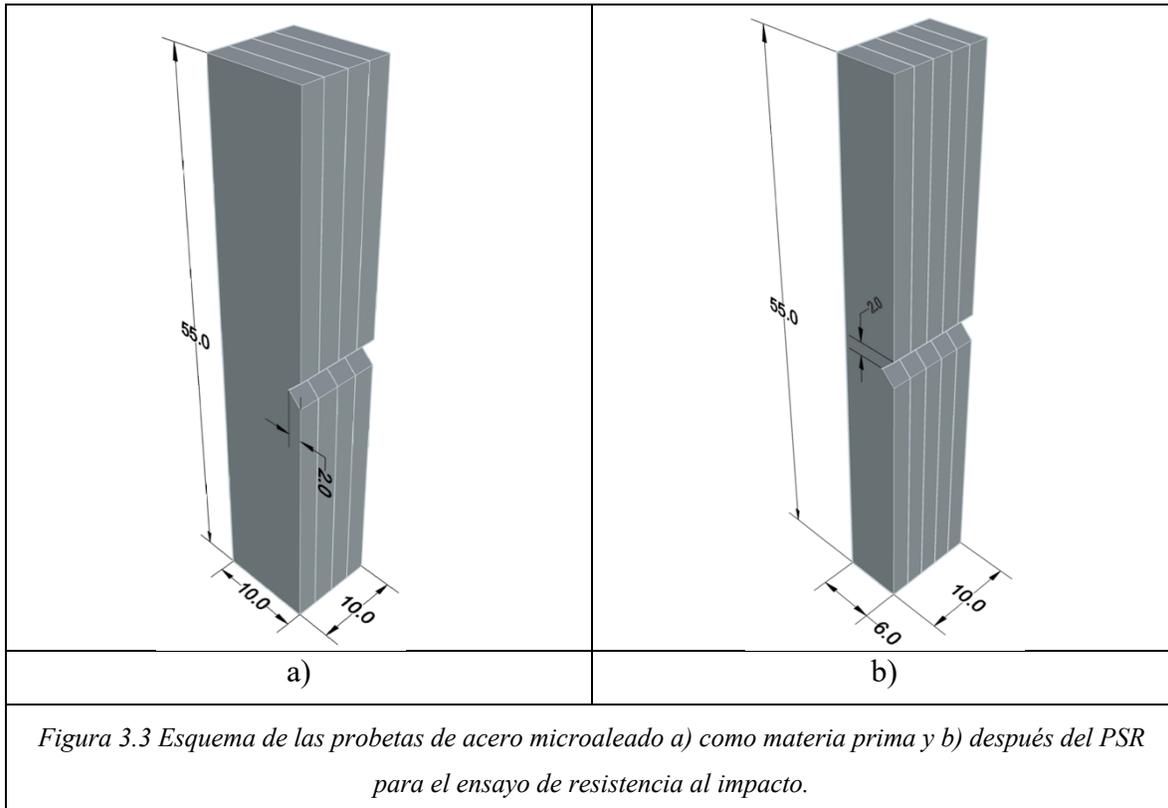


Figura 3.2 Medidas de la probeta de impacto [24].

Tabla 3.2 Medidas de la probeta de impacto [24].

Designación	Símbolo	Dimensión	Tolerancia
<b>Largo</b>	$l_1$	55 mm	$\pm 0.60$ mm
<b>Ancho</b>	$h_1$	10 mm	$\pm 0.05$ mm
<b>Espesor</b>	$b_1$	10 mm	$\pm 0.05$ mm
		7.5 mm	$\pm 0.05$ mm
		5 mm	$\pm 0.05$ mm
		2.5 mm	$\pm 0.05$ mm
		2 mm	$\pm 0.05$ mm
<b>Ángulo de la muesca <math>v</math></b>	$a/b_2$	45°	$\pm 2^\circ$
<b>Radio de curvatura de la base de la muesca</b>	$r$	0.25 mm	$\pm 0.025$ mm
<b>Distancia del plano de simetría de la muesca desde la base de la muestra</b>	$l_2$	27.5 mm	$\pm 0.40$ mm

Para realizar el ensayo de resistencia al impacto se utilizó la máquina para ensayos tipo Charpy marca SHIMADZU con capacidad de 490 J. Las probetas fueron maquinadas de materia prima y para láminas deformadas con uno y dos pasos de PSR, las medidas y formas son especificadas en la Figura 3.3. Con esta prueba se determina el cambio de la tenacidad de la lámina antes y después de la deformación que se le indujo.



### 3.2. Caracterización microestructural de la lámina de acero microaleado.

La caracterización microestructural se realizó para evaluar los efectos de la deformación plástica severa al realizar una evaluación de la microestructura antes y después del PSR, por ello es que se utilizará la caracterización vía microscopía óptica (MO) y microscopía electrónico de barrido (MEB). Por tal razón se detalla el equipo de cada técnica a usar.

- **Preparación Metalográfica**

La preparación metalográfica de la lámina de acero microaleado fue mediante etapas sucesivas de desbaste y pulido. Para el desbaste se utilizaron lijas de carburo de silicio con los siguientes grados: 120, 220, 400, 600, 1000 y 1200. El pulido se realizó utilizando pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  y 0.5  $\mu\text{m}$ . El reactivo químico utilizado para revelar el tamaño de grano fue NITAL 2% (98% de alcohol etílico y 2% ácido nítrico), el cual fue aplicado durante 20 segundos.

- **Caracterización vía Microscopía Óptica (MO)**

La caracterización vía MO fue realizada con el fin de observar en las probetas, cambios en la morfología y tamaño de los granos después del proceso de PSR. La caracterización fue realizada en un microscopio óptico de platina invertida marca “Olympus” modelo GX-51.

- **Caracterización vía Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)**

El objetivo de la caracterización vía MEB es evaluar la microestructura antes y después del proceso de prensado semi-restringido y a su vez para medir el tamaño de grano de la microestructura en distintas condiciones. La caracterización mediante MEB se realizó en un microscopio de marca JEOL modelo JSM-6610 LV operado en alto vacío a 20 kV, equipado con un detector de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) marca Oxford.

- **Determinación de tamaño de grano**

Para determinar el tamaño de grano promedio, se realizó la medición según la norma E112-8 de la ASTM mediante el método de Abrams [33], este procedimiento se basa en utilizar tres círculos concéntricos sobrepuestos en las micrografías cuya suma de los perímetros debe ser de 500 mm. Los conteos se pueden hacer tanto por número de granos o por el número de límites de grano interceptados por los tres círculos. Los conteos deben de realizarse en al menos cinco campos aleatorios y utilizando una magnificación que permita tener un conteo mínimo de entre 400 a 500 conteos. Se realizó el conteo de intersecciones y posteriormente se calcularon los valores de la intercepción lineal media, su desviación estándar, el límite de confianza al 95% y el porcentaje de precisión relativa con las ecuaciones (3), (4) y (5) que se presentan a continuación.

$$s = \left[ \frac{\sum (P_{Li} - \bar{P}_L)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$95\% CI = \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

$$\%RA = \frac{95\% CI}{P_L} \cdot 100 \quad (5)$$

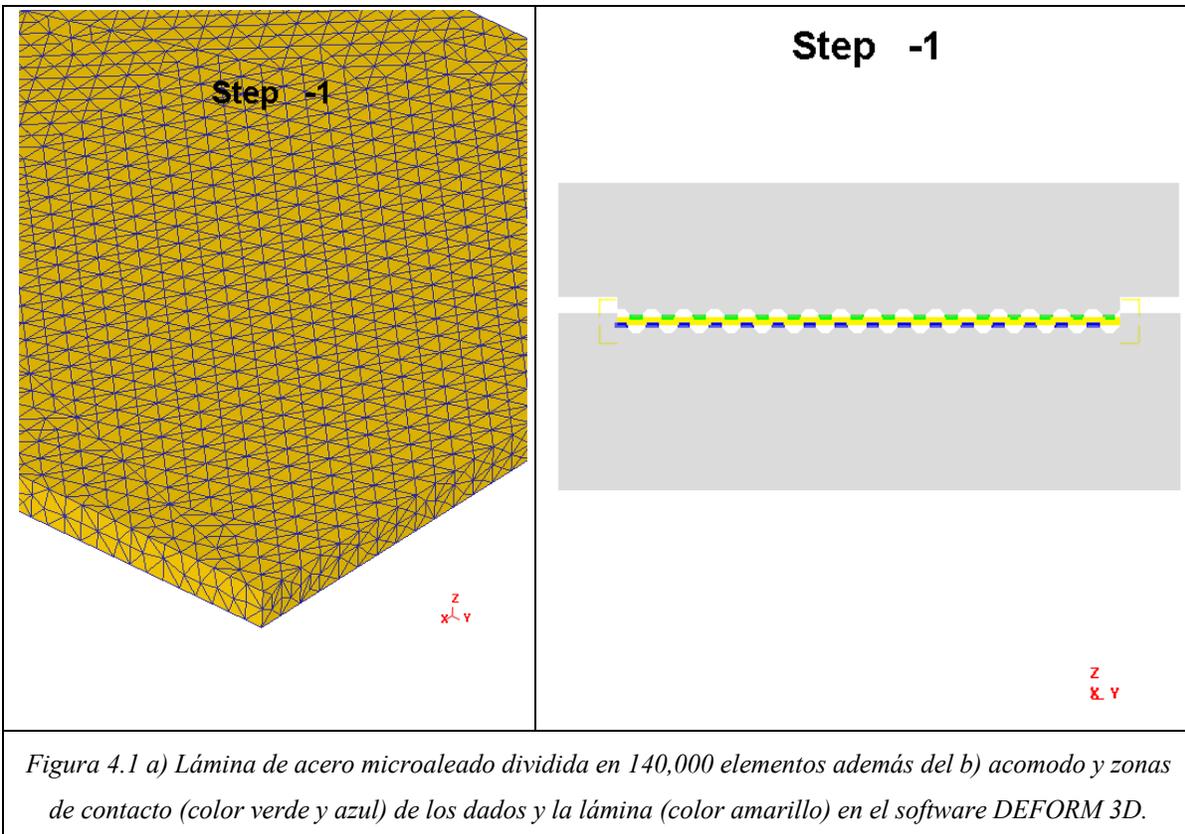
## **Capítulo 4      Resultados de la simulación e implementación del proceso PSR**

La simulación del proceso PSR se realizó con diferentes configuraciones geométricas de la lámina para establecer los parámetros óptimos del proceso que son: la carga, la relación ancho/espesor de la lámina, la fricción en la intercara herramental-pieza, la deformación efectiva, las zonas de contacto entre la pieza y el herramental, así como el posible ensanchamiento en la dirección transversal de la lámina para poder efectuar las pruebas del proceso en forma experimental. A continuación, se presentan las simulaciones realizadas con diferentes configuraciones geométricas y condiciones de fricción.

### **4.1. Pre-proceso de la simulación del PSR.**

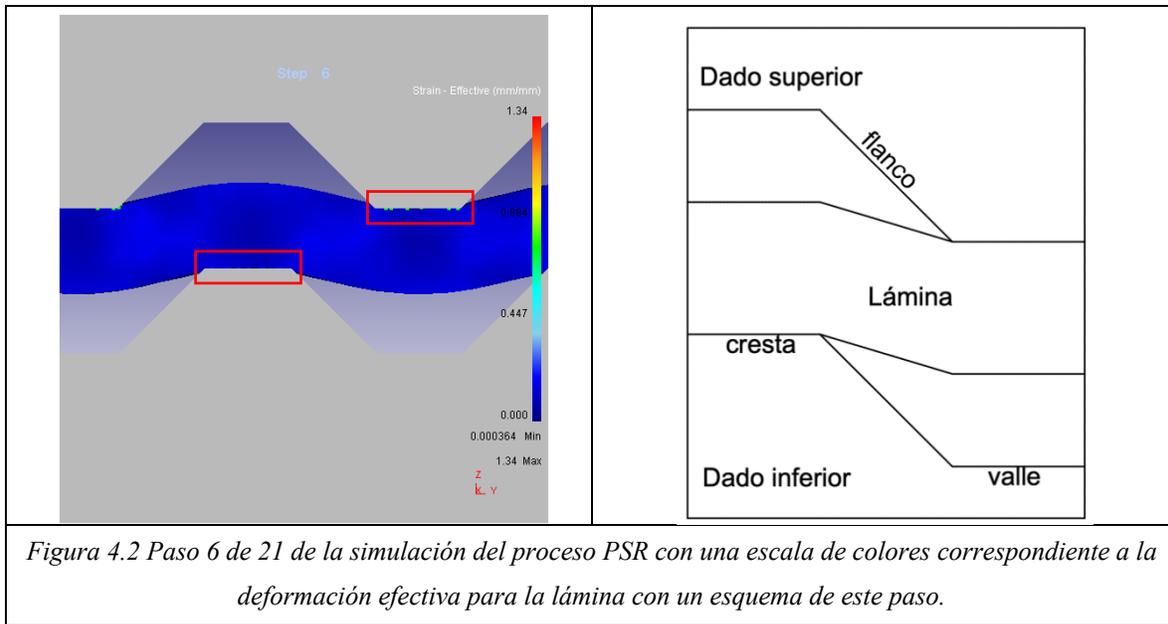
La simulación se realizó con los parámetros definidos en el capítulo 2, enseguida se podrán analizar algunos pasos que demuestran la deformación que tuvo la lámina en el corrugado junto con un esquema de la nomenclatura empleada, estos detalles pueden ser observados en la simulación efectuada mediante el programa DEFORM 3D.

Para iniciar la simulación se tienen que añadir los herramentales y la pieza de trabajo. Entre los herramentales se tendrá que elegir cuál será el primario (siendo el que se mueva o deforme la pieza) y la lámina se tiene que mallar (dividir en elementos finitos) que será el objeto por estudiar como se puede ver en la Fig. 4.1, todos los parámetros que se usaron para la simulación se detallaron en la sección 2. Después de alinear las piezas se tienen que definir los contactos que tendrán entre los dados y la lámina, los cuales se observan en la Fig. 4.1 de color verde y azul, estos permitirán identificar las áreas que están en contacto.

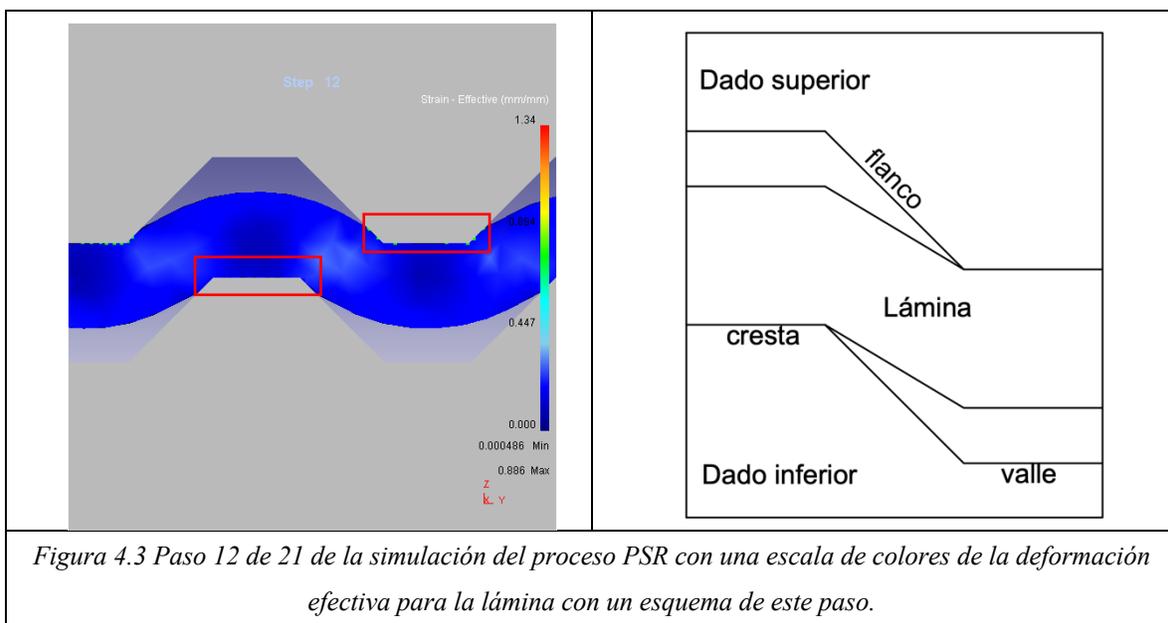


Posteriormente se agregan los parámetros del proceso como son: número de pasos, velocidad del dado superior, velocidad del proceso y distancia que se moverá el dado superior, estos parámetros son los que delimitarán la simulación del proceso, es decir, cuando la simulación complete el número de pasos, ésta se detendrá y mostrará los resultados.

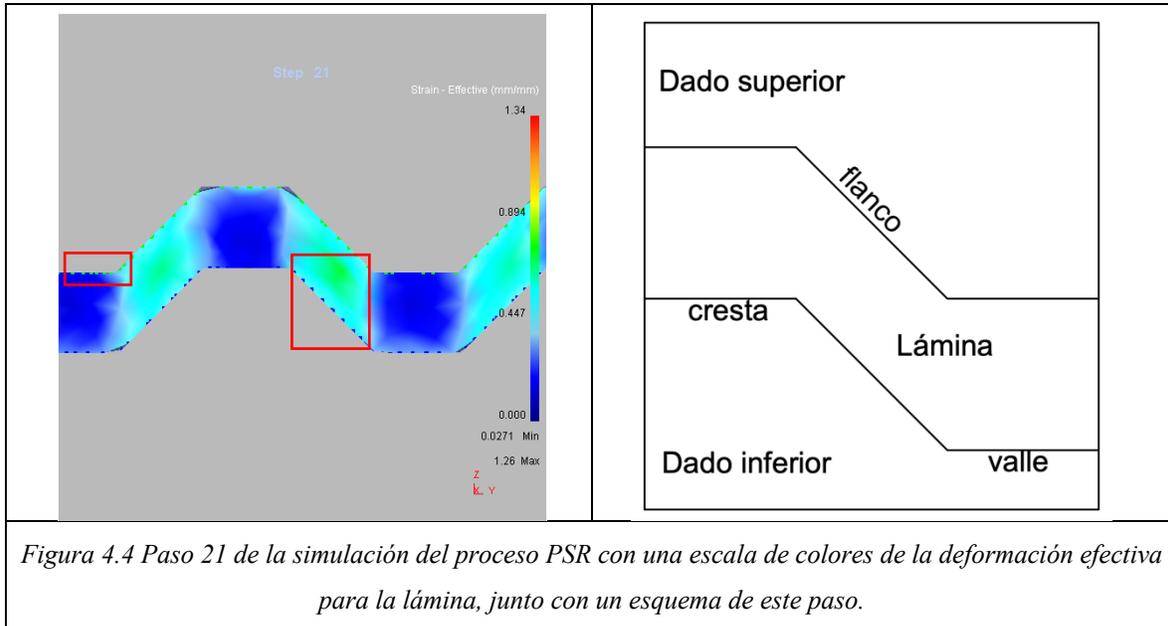
En la Fig. 4.2 se presenta el paso 6 de 21 de la simulación del proceso PSR. Se observa de color azul la lámina, de color gris los dados y a la derecha se observa en escala de colores la deformación efectiva que experimenta la lámina. En esta etapa de la simulación se observa que el dado superior dobla la lámina sobre el dado inferior para formar la corruga. También se pueden observar encerrados en rectángulos de color rojo unos puntos verdes y azules que representan el área de contacto entre el dado y la lámina.



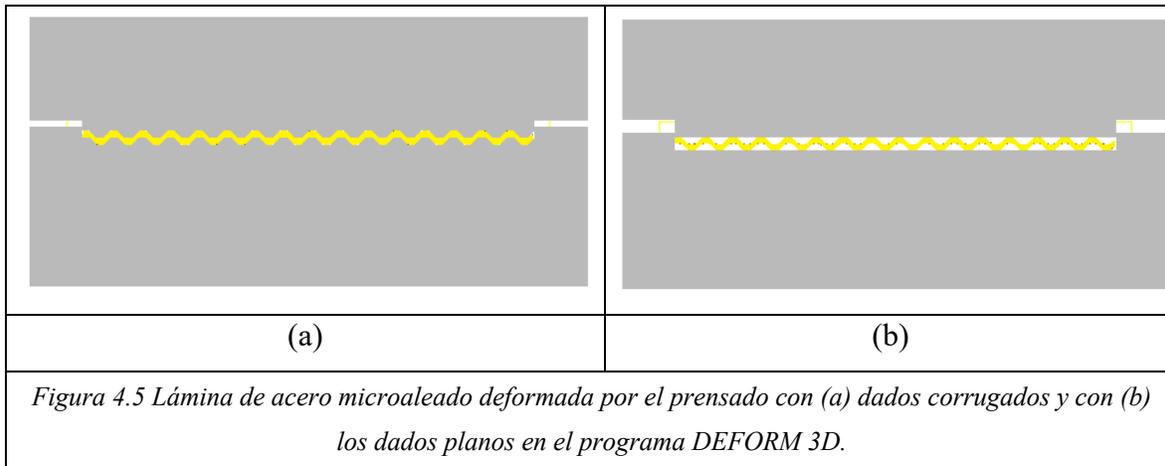
En la Fig. 4.3, que muestra el paso 12 de 21 de la simulación del PSR con la configuración antes mencionada, se observa que la lámina está más doblada y se alcanzan a distinguir las zonas que se están deformando (en color azul claro). En este paso, el dado superior estira a la lámina para que toque la parte del valle del dado inferior formando la ranura, mientras que un evento similar sucede con el dado inferior. El área de contacto se incrementa durante este proceso de estirado y la lámina empieza a exhibir una disminución en el radio de curvatura del valle y la cresta.



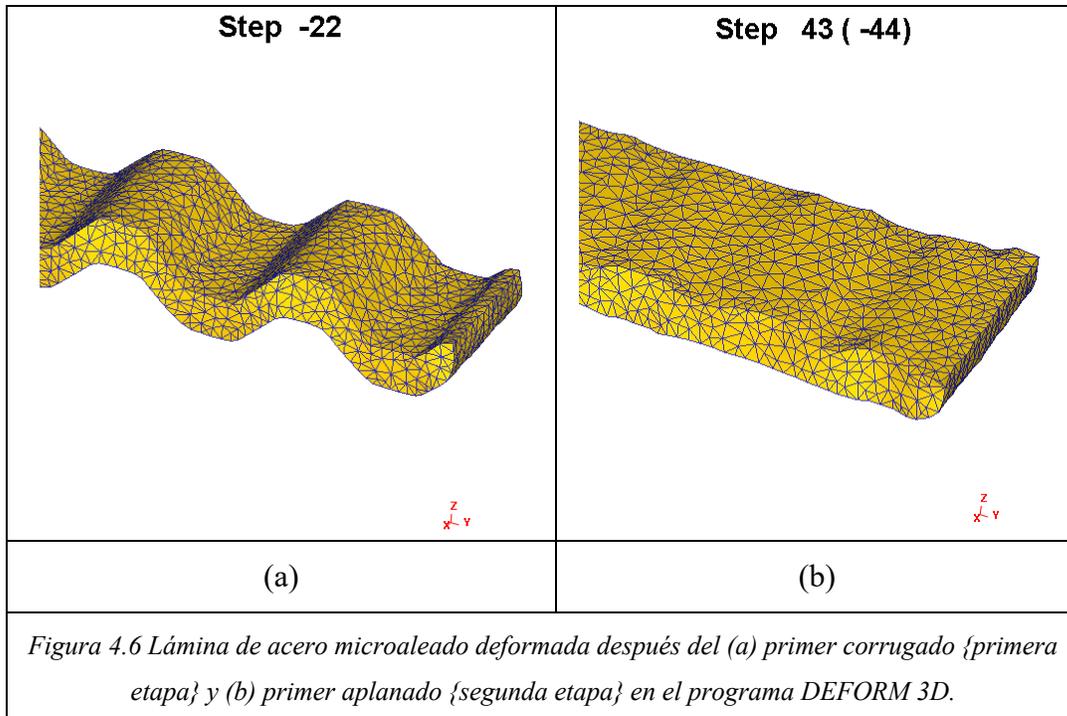
En la Fig. 4.4 se observa el último paso del corrugado del PSR para la geometría citada. En la lámina deformada se denota, en escala de colores, una deformación efectiva aproximada de 0.6 (de color verde y azul) en las zonas de los flancos, mientras en los valles y crestas se observa una deformación menor a 0.1.



Al terminar la simulación del prensado, el archivo usado se modifica, quitando los dados corrugados, colocando y alineando los dados planos, esto con el fin de realizar con la misma lámina deformada la siguiente etapa, la cual sería el aplanado, se muestra la lámina deformada por el dado corrugado en la Fig. 4.5. Al continuar con la misma lámina, esto permite añadir la deformación realizada con el dado plano y que esta simulación sea lo más fidedigna posible.



Para continuar con la siguiente etapa se realizan los mismos pasos que se mencionaron anteriormente, modificando el archivo para colocar los dados corrugados (para la tercera etapa). La lámina de acero microaleado esta deformada por dos etapas del PSR, lo cual se muestra en la Fig. 4.6. Esto continua después del segundo corrugado y para el segundo aplanado. En un segundo ciclo del PSR se continúa modificando el archivo para realizar el cambio de dados y se repite en cada etapa, con el fin de ir añadiendo mas deformación a la pieza y se presentan los resultados en la siguiente sección.



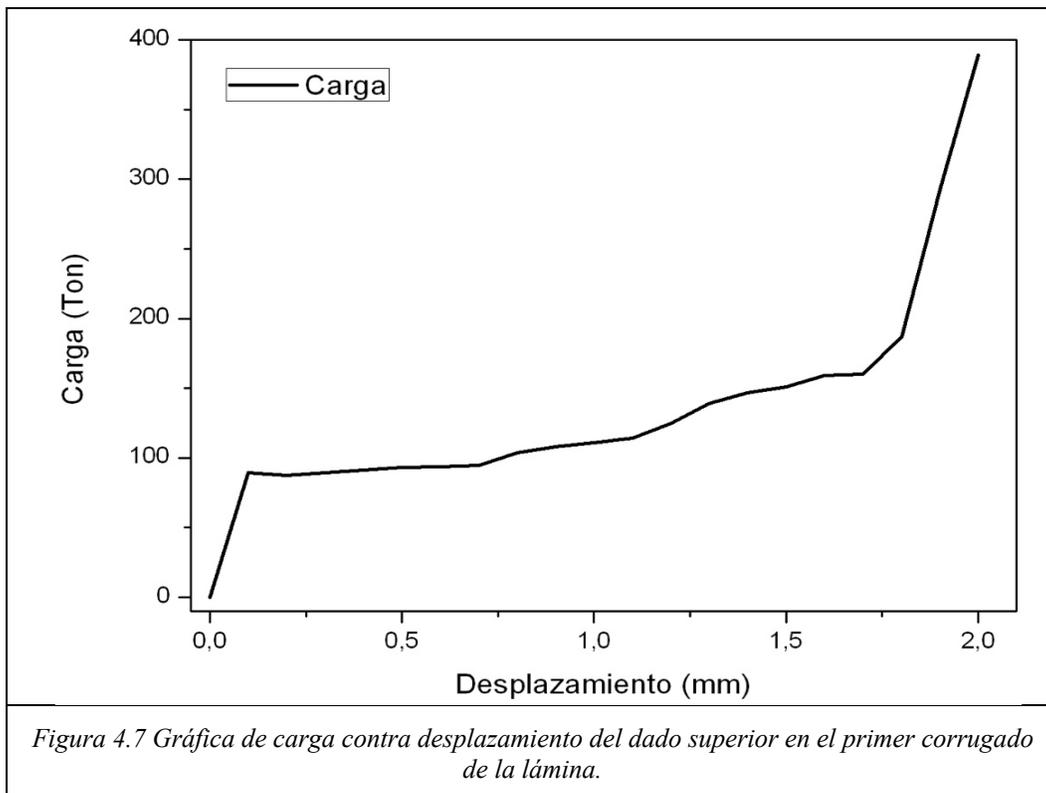
#### 4.2. Simulación del PSR con geometría de 45 x 128 mm.

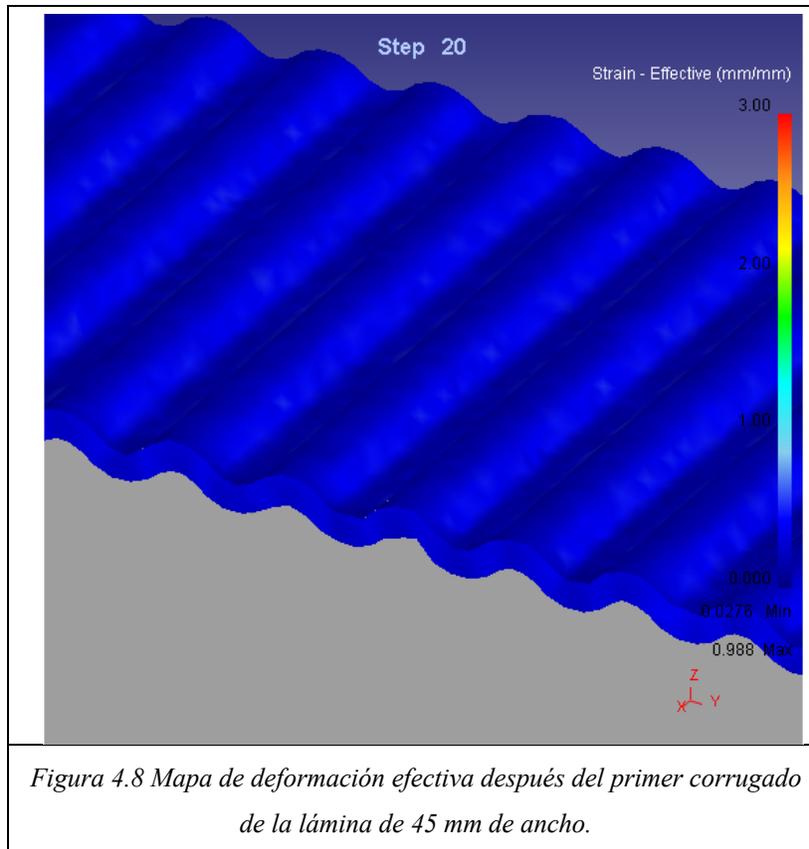
Una simulación del primer paso del proceso PSR se realizó con una probeta de 45 x 128 mm (ancho y largo), estas dimensiones se escogieron considerando que fuera posible obtener 3 probetas de tensión de tamaño proporcional después de un ciclo completo de PSR. En la Fig. 4.7 se observa la gráfica de la carga necesaria para generar la corruga. En la gráfica se pueden observar las tres etapas a las que está sometida la lámina en el proceso PSR de acuerdo con lo propuesto en el trabajo de Nazari F. [34]. La primera parte de la gráfica, donde se eleva la carga de forma lineal, corresponde a la etapa de doblado; mientras que en la zona II, donde la carga pasa de un comportamiento lineal a no lineal, la carga se incrementa paulatinamente debido al estirado de la lámina. Por último, existe una tercera etapa conocida como forjado, donde la carga aumenta abruptamente y se maximiza el área de contacto entre los dados y la lámina, terminando el corrugado.

En la Fig. 4.8 se presenta el mapa de deformación efectiva obtenido en la lámina después del primer paso. A partir de esta figura, se puede observar que la lámina obtuvo una deformación

efectiva mínima de 0.02 en las zonas de las crestas y valles (zonas de adherencia) y máxima de 0.98 entre los valles y las crestas (zonas de deformación por estiramiento); estos mapas de deformación fueron denominados en el trabajo de Gupta *et al.* como zonas libres de deformación y zonas de deformación severa, respectivamente [3]. La simulación predijo un incremento en su ancho de 2.7 mm, lo que ocasionó que la lámina sobresaliera de los dados.

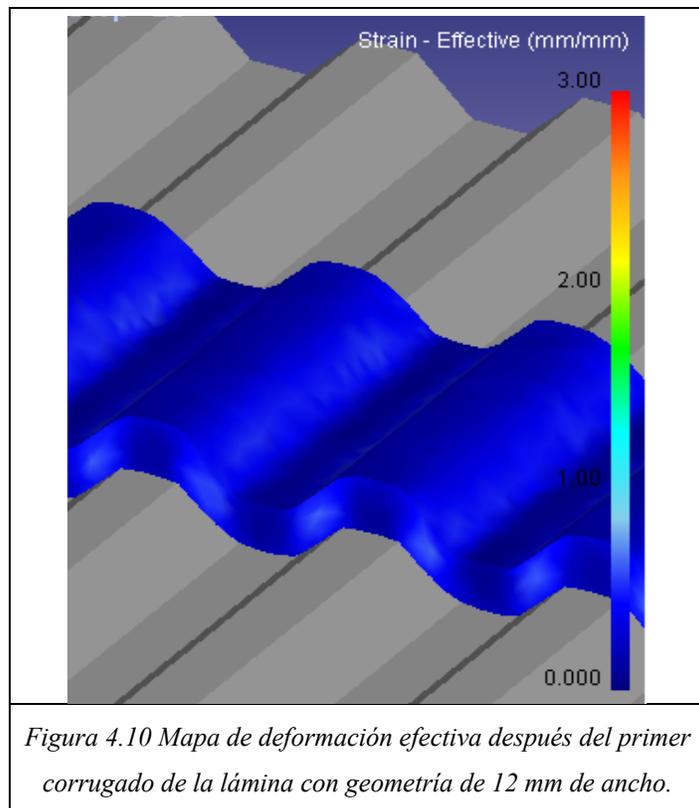
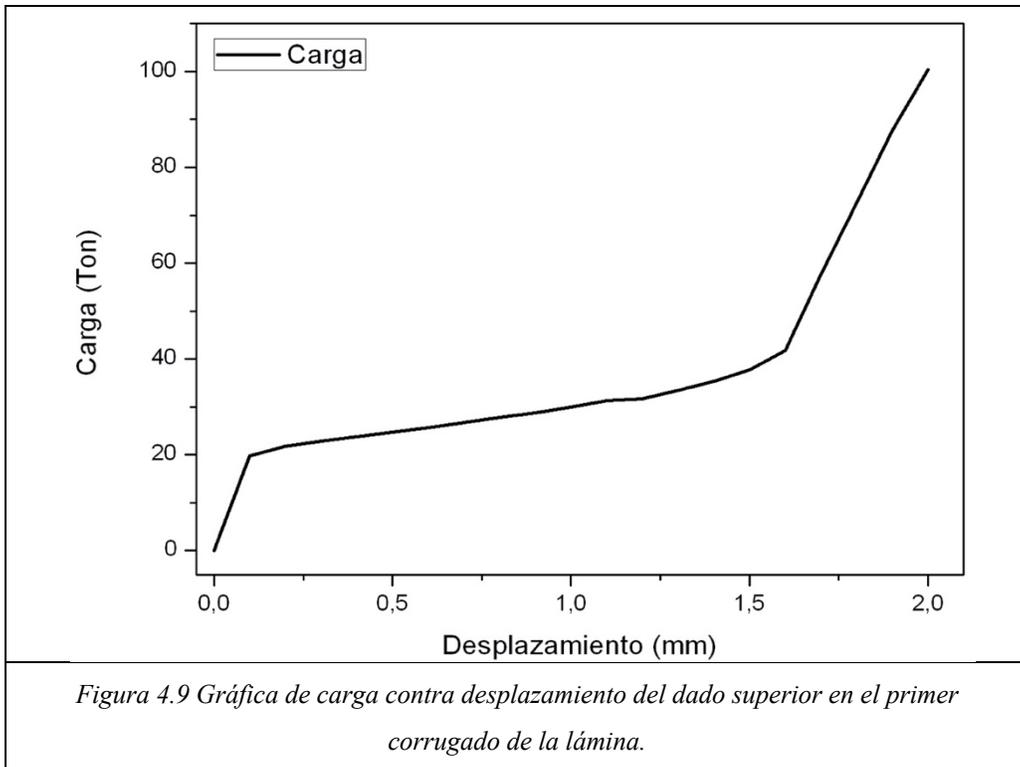
La carga máxima para este proceso fue de 389.4 Ton y debido a que para la etapa experimental se cuenta con una maquina universal de 60 Ton, esta carga requerida rebasaría su capacidad disponible; por tal motivo se requiere reducir el área para reducir la carga y minimizar la fricción. Debido a lo anterior, no se simularon más etapas con esta geometría.





### 4.3. Simulación del PSR con geometría de 12 x 128 mm.

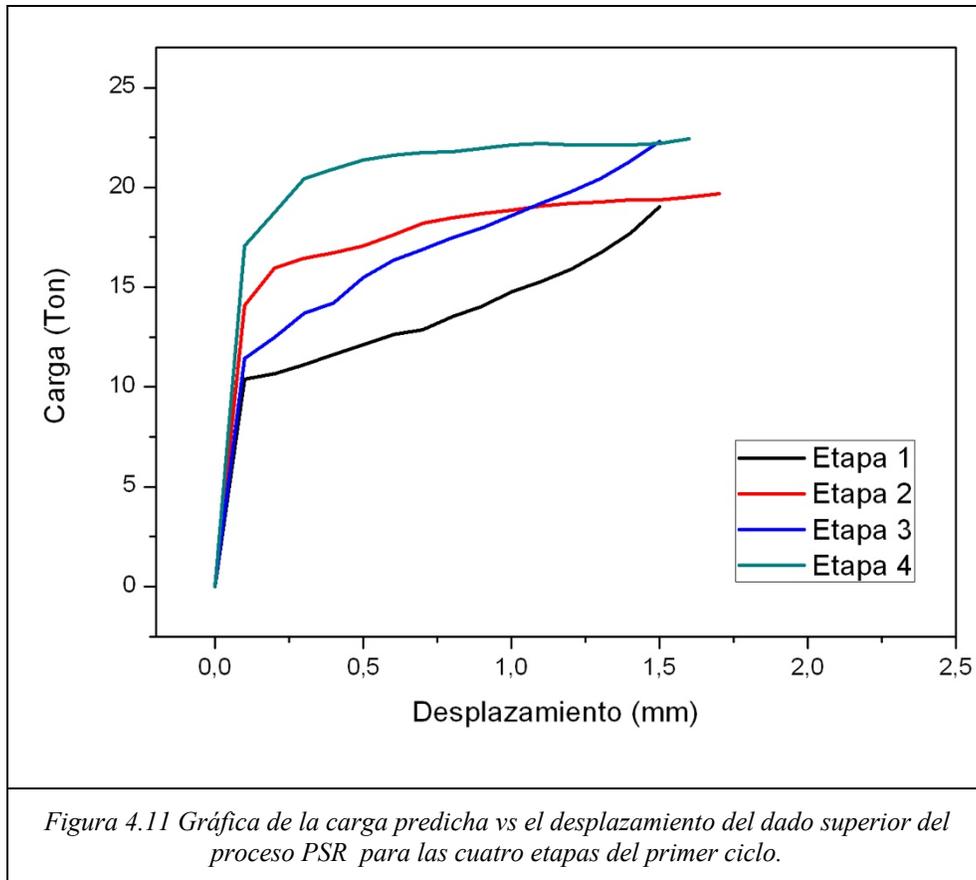
Una segunda simulación del proceso del PSR se realizó reduciendo las dimensiones en el ancho de la probeta un 73 % (12 x128 mm) para intentar obtener 2 probetas de tensión por cada ciclo, además se utilizó un coeficiente de fricción más bajo (0.12 a 0.08) para intentar reducir la carga máxima. Con los parámetros de proceso antes mencionados se simuló la primera etapa del PSR obteniéndose los resultados de las Figuras 4.9 y 4.10. En la Fig. 4.9 se muestra el mapa de deformación efectiva en donde se obtuvieron deformaciones mínimas de 0.01. En la Fig. 4.10 se presenta la gráfica de carga vs el desplazamiento del dado superior, la carga máxima fue de 100.4 Ton; si se compara con la carga simulada en la sección anterior, existió una reducción del 73%. La forma de las curvas es similar a las reportadas en trabajos de Shirdel [17] y Nazari *et al.* [34] en el PSR y PRR, respectivamente, en donde se tiene una zona elástica y plástica similar a la presentada en la Fig. 4.9. Sin embargo esta carga predicha aun es mayor a las 60 Ton de la maquina disponible.



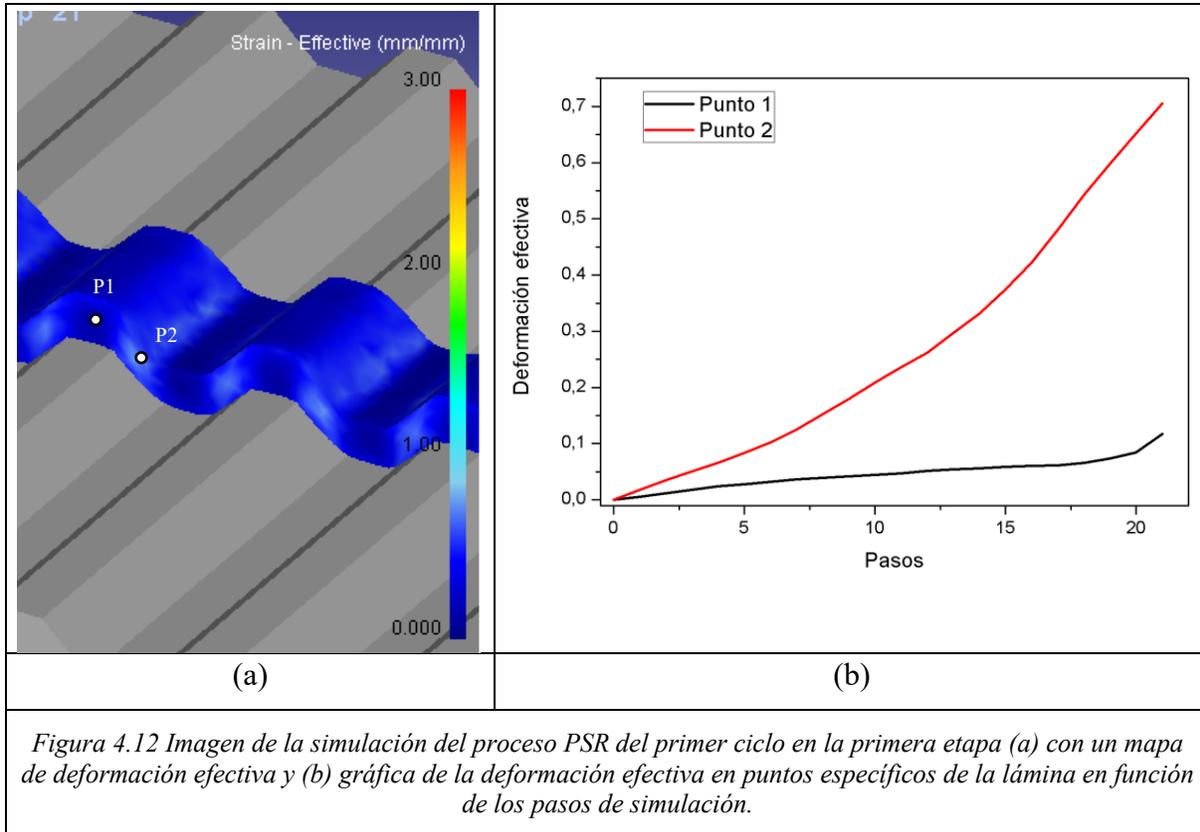
Debido a lo anterior descrito, se realizaron simulaciones adicionales reduciendo aún más el ancho y manteniendo el largo de la lámina. En las Fig. 4.7 y 4.9 se observa cómo la carga aumenta abruptamente después de 1.5 mm de recorrido del dado superior y esto es debido a que los dados llegan a la etapa del forjado de la lámina, por tanto, las simulaciones siguientes se detendrán justo cuando se incrementa abruptamente la carga, ya que el área de contacto entre dados y lamina hasta antes de esta etapa, alcanza casi el 90 % y se incrementa muy poco posteriormente.

#### **4.4. Simulación del primer ciclo de PSR con geometría de 6 x 128 mm.**

En la Fig. 4.11 se presenta la gráfica de carga simulada en función del desplazamiento del dado superior para las 4 etapas del primer ciclo de PSR utilizando la geometría de 6 x 128 mm. Es importante resaltar que la carga máxima que presenta la gráfica es mucho a 60 Ton, por lo que esta es la dimensión de la lámina que se usará en la implementación del PSR. A partir de esta figura, se observa que la carga máxima para las cuatro etapas es menor a 22.5 Ton. En las etapas 1 y 3 (etapas de corrugado) se observa un incremento de la carga lineal de 10 y 11 Ton respectivamente, asociado al inicio de la cedencia del material. Posteriormente la carga presenta un incremento exponencial hasta alcanzar valores de 18 y 22 Ton, en cada caso; esta región corresponde a la deformación plástica severa del material durante el corrugado. Por otro lado, en las etapas 2 y 4 (etapas de prensado), se observa que la carga incrementa linealmente en la zona elástica hasta valores de 13 y 17 Ton respectivamente. Posteriormente la carga presenta un comportamiento parabólico hasta alcanzar un valor estable de 20 y 23 Ton respectivamente. Lo anterior está asociado a la etapa del endurecimiento por deformación durante el prensado. Es importante mencionar que al rotar la muestra 180 grados, las zonas sin deformar ahora serán sometidas a deformación vía corrugado y prensado, de tal forma que si se compara la curva de la carga de la zona elástica cuando inicia la deformación plástica en las etapas del corrugado (Etapas 1 y 3) y del prensado (Etapas 2 y 4), se observa que existe un incremento aproximado de 4 y 5 Ton respectivamente, debido al endurecimiento por deformación de la etapa previa.



La simulación de las cuatro etapas del proceso PSR para la geometría de la lámina de 6 x 128 mm se presenta en las Figuras 4.12 – 4.15. En la Fig. 4.12 (a) se presenta la simulación de la deformación efectiva en una escala de colores para la primera etapa de corrugado. A partir de dicha figura se pueden distinguir dos zonas: la primera de color azul claro corresponde a las zonas de mayor deformación localizada en los flancos; la segunda zona de azul oscuro que corresponde a las zonas de menor deformación, en los valles y en las crestas. En la Fig. 4.12 (b) se muestra la gráfica de deformación efectiva en zonas de baja y de alta deformación (Punto 1 y Punto 2, respectivamente) en función de los pasos de la simulación (cada paso corresponde a un avance vertical de 0.1 mm del dado superior). La simulación de la deformación efectiva en el punto 1 inicia en 0 y se incrementa ligeramente hasta un valor de 0.1. Por su parte, en el punto 2 la deformación efectiva inicia en 0 e incrementa en forma exponencial hasta 0.7.



La Fig. 4.13 (a) presenta la simulación de la segunda etapa del primer prensado. En dicha figura las zonas de color azul claro corresponden a las zonas de deformación efectiva mayor (estirado y prensado), mientras que las zonas de color azul oscuro corresponden a zonas de deformación efectiva menor (únicamente prensado). En la Fig. 4.13 (b) se muestra la deformación efectiva de las zonas mencionadas en función de los pasos de la simulación, la deformación efectiva en el punto 1 inicia cerca de 0.1 y se incrementa linealmente hasta 0.4, mientras que en el punto 2 inicia con 0.65 (deformación efectiva en el primer corrugado) e incrementa linealmente hasta 1.0.

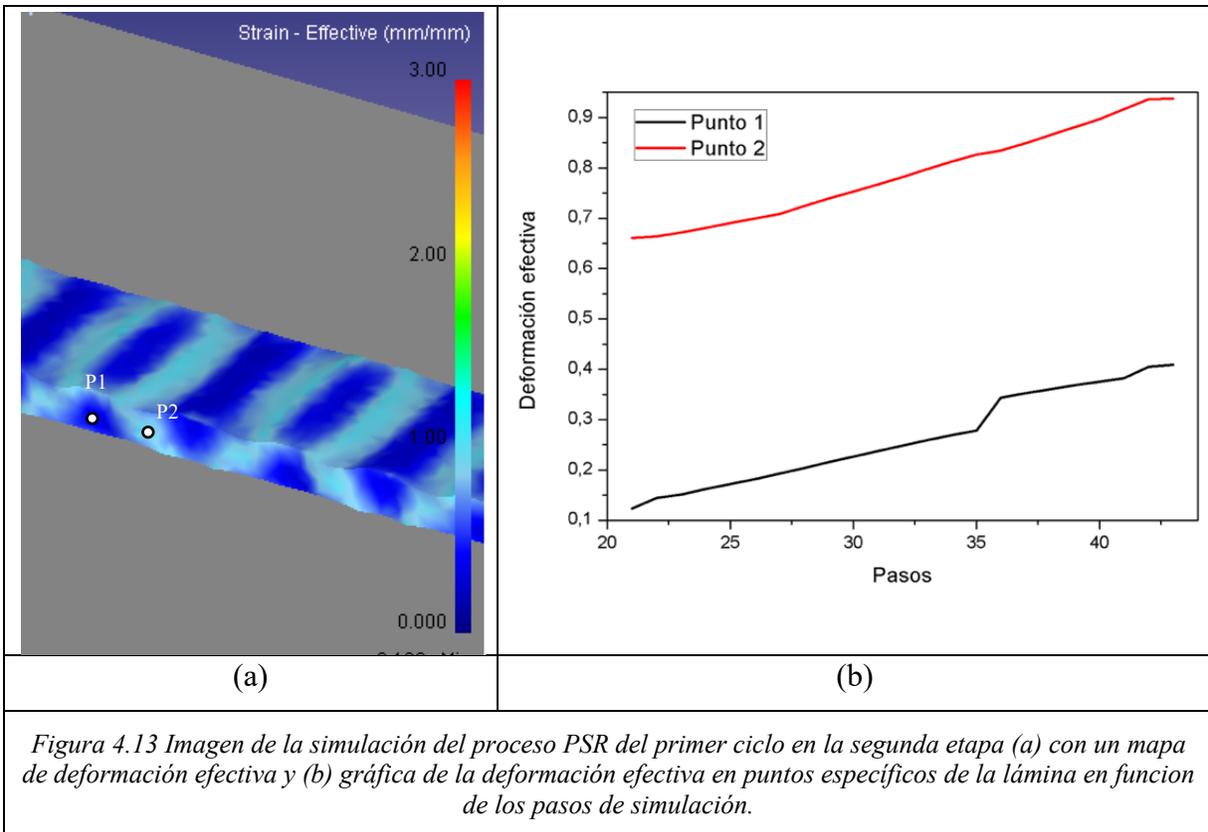


Figura 4.13 Imagen de la simulación del proceso PSR del primer ciclo en la segunda etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.

La Fig. 4.14 (a) presenta la simulación del segundo corrugado donde la pieza ha sido girada 180 grados respecto a su eje vertical para que las zonas sin deformar sean deformadas y las zonas deformadas previamente permanezcan sin cambios. A partir de dicha de figura se observan zonas de alta deformación y baja deformación. En la Fig. 4.14 (b) se presenta la variación de la deformación efectiva en función del número de pasos, en el punto 1 inicia en 0.4 e incrementa exponencialmente hasta un valor de 1.2; por su parte el punto 2 se mantiene con un valor aproximado a 0.9 (la deformación efectiva fue generada en las dos etapas anteriores). En las zonas deformadas por los flancos del dado corrugado se observa una deformación heterogénea debido a la interacción entre estas áreas y las crestas del dado corrugado, ya que no solo se presenta un esfuerzo cortante puro, lo cual ya ha sido reportado previamente por Siddesha *et al* [35].

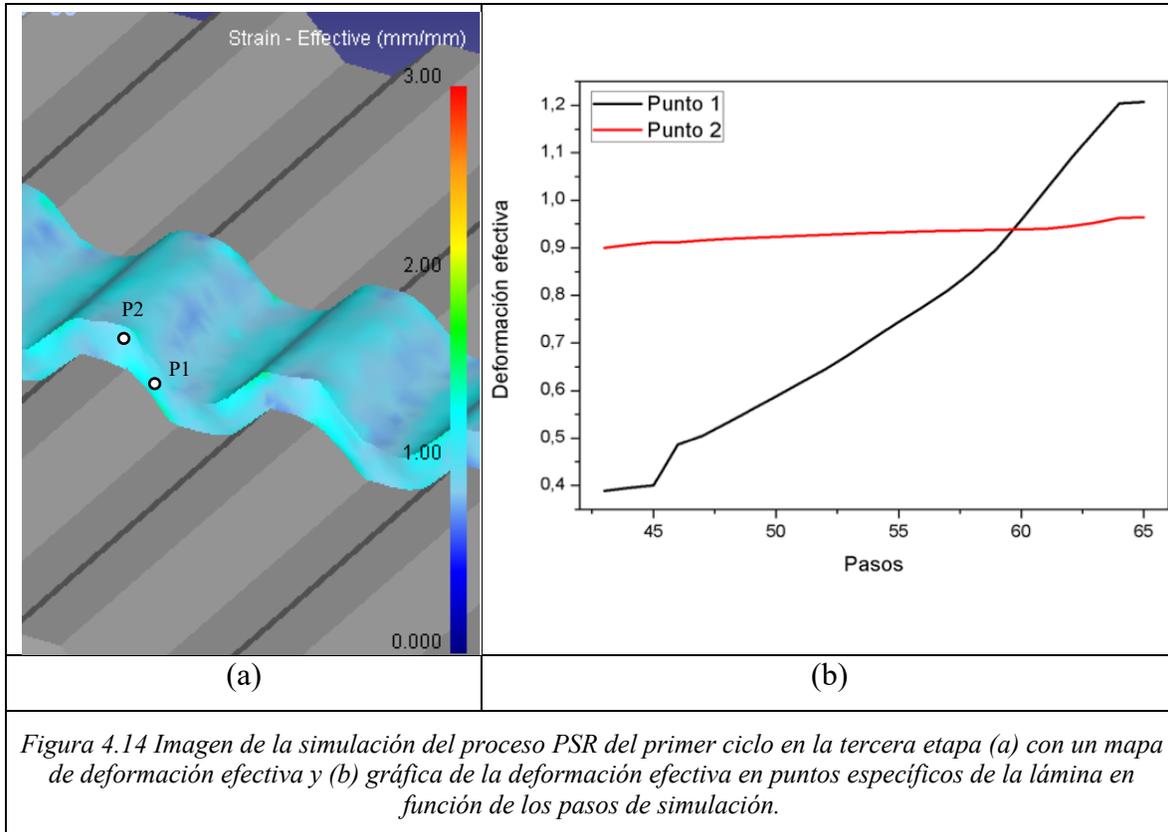


Figura 4.14 Imagen de la simulación del proceso PSR del primer ciclo en la tercera etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.

La Fig. 4.15 (a) presenta la simulación del mismo parámetro estudiado hasta ahora correspondiente a la cuarta etapa, la cual consiste en el segundo prensado. En la Fig. 4.15 (b) se presenta la variación de la deformación efectiva en función del número de pasos de simulación, dicha deformación inició en 1.15 y aumentó a 1.5 (debido al corrugado) y en el punto 2 se incrementa ligeramente de 0.9 a 1.1 (la deformación de 0.9 fue generada en la etapa anterior y el incremento se debe a efectos del prensado). En el trabajo de Gupta *et al.* [3] sobre el prensado de ranura restringido, discuten que en esta última etapa del primer ciclo del PSR la deformación efectiva de la lámina tendría que ser de 1.16, mientras en la simulación la deformación efectiva máxima llegó a 1.5, esto está asociado con el desplazamiento lateral que la lámina experimenta en el sentido en el que ésta no está restringida. Además, con la simulación se ha evidenciado que la deformación efectiva no es homogénea en la lámina, esto ya ha sido reportado por Khodabakshi en la referencia [36], donde presenta una lámina deformada por PRR-RC y al final de cada ciclo se presenta una deformación con un valor similar a la reportada en este trabajo.

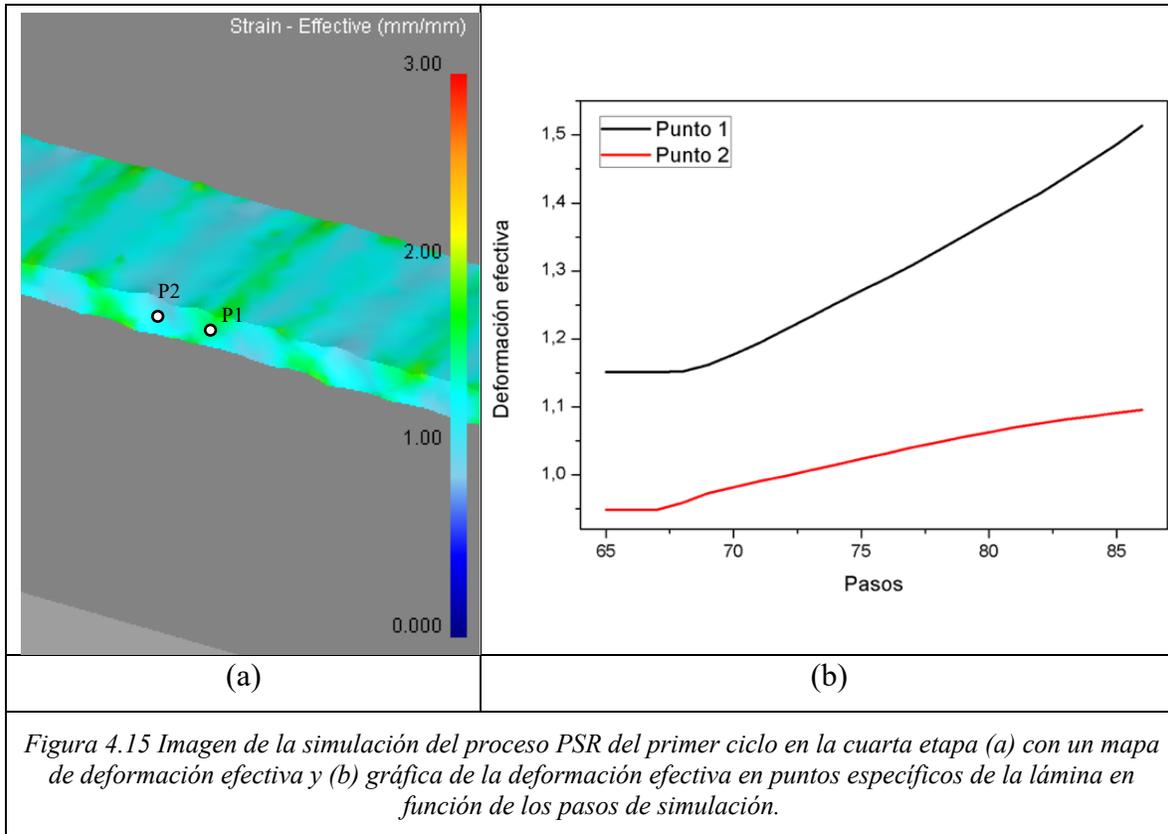


Figura 4.15 Imagen de la simulación del proceso PSR del primer ciclo en la cuarta etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.

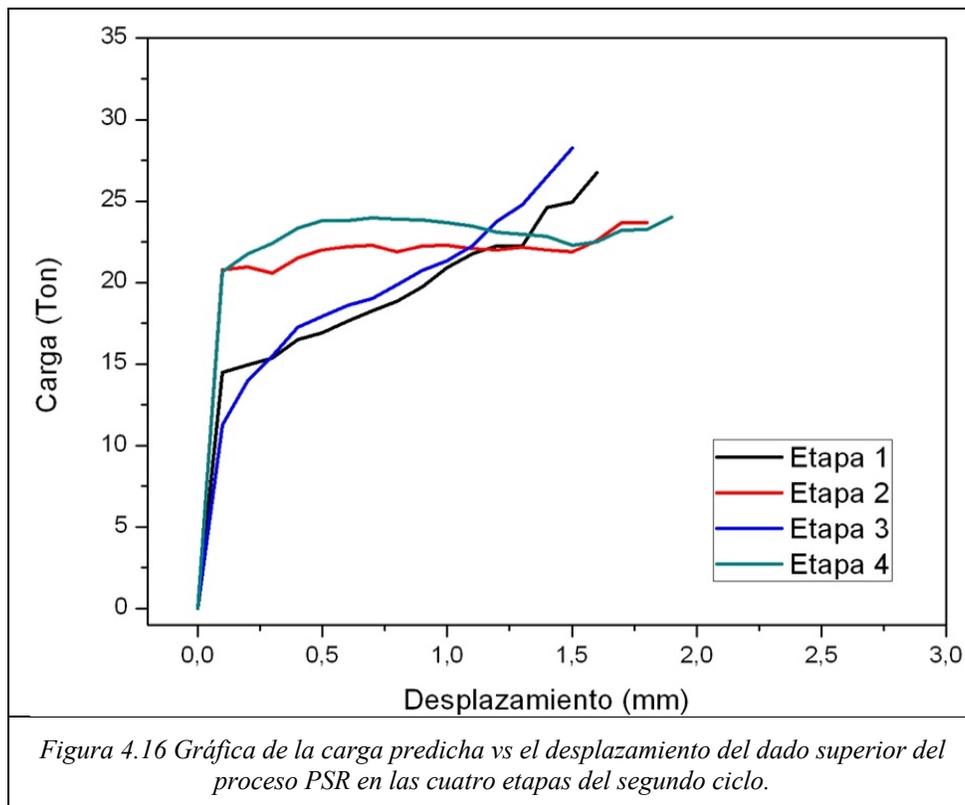
La simulación computacional del primer ciclo del PSR permitió conocer la deformación efectiva que sufre la lámina en cada etapa durante el PSR, sin embargo el valor que predice la simulación es diferente al proporcionado en el trabajo de Gupta *et al.* [3]. Lo anterior puede ser explicado ya que la deformación efectiva que sufre la lámina es debido, no solo al esfuerzo cortante que provoca el dado, sino también al aplastamiento y desplazamiento lateral que sufre la lámina. La ecuación de la deformación efectiva está representada de la siguiente manera [37]:

$$\bar{\epsilon} = \left\{ \frac{2}{3} [\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2 + 2(\epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2)] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

La deformación efectiva está compuesta por valores que incorporan el efecto total de todos los componentes normales a los 3 ejes cartesianos además de esfuerzos cortantes, es decir el valor de deformación efectiva obtenido a través de la simulación computacional incluye la suma de los esfuerzos cortantes y de esfuerzos de compresión que sufre la lámina [37].

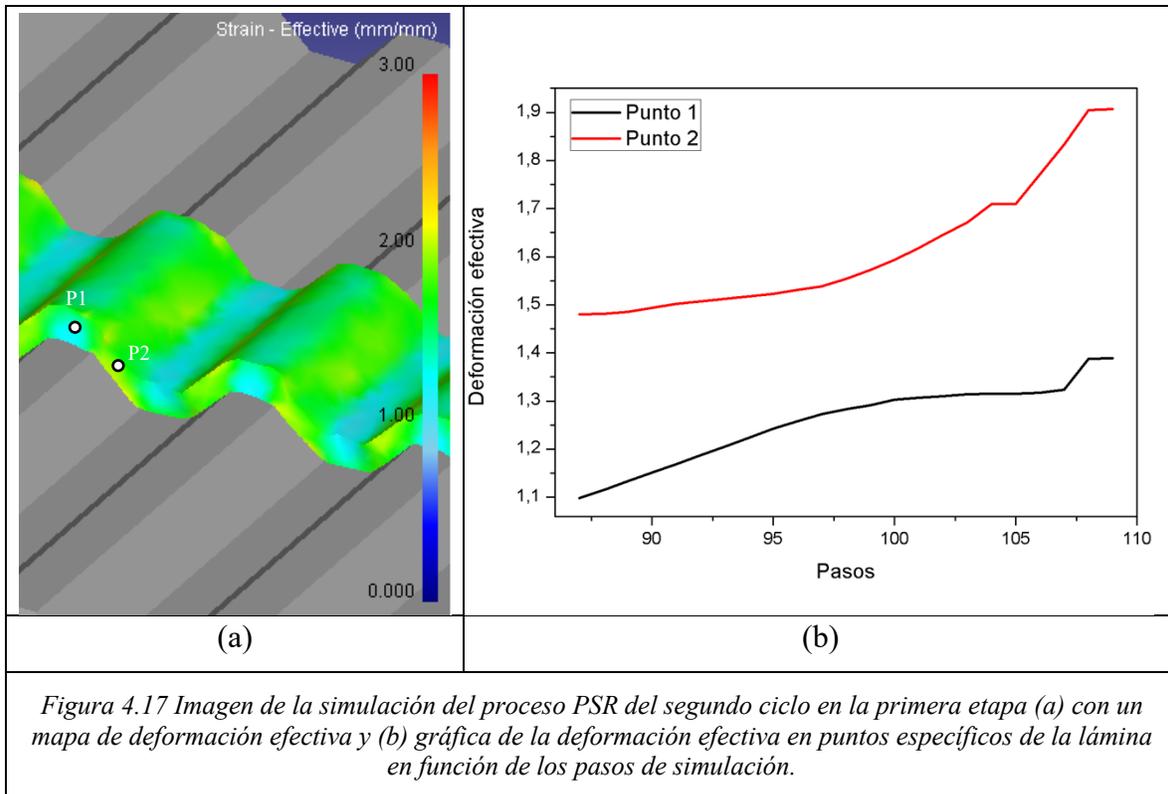
#### 4.5. Simulación del segundo ciclo de PSR con una geometría de 6 x 128 mm.

La carga simulada del segundo ciclo de PSR en función del desplazamiento del dado superior se presenta en la Fig. 4.16. A partir de esta figura se puede observar que la carga máxima para las cuatro etapas es menor a 30 Ton. En las etapas 1 y 3 (corrugado), se observa un incremento lineal de la carga hasta 14 y 11 Ton respectivamente. Esta carga se asocia al punto donde inicia la cedencia del material, posteriormente la carga presenta un incremento exponencial hasta alcanzar valores de 27 y 29 Ton respectivamente; esta última región corresponde a la deformación plástica severa del material durante la etapa del corrugado. Por otro lado, en las etapas 2 y 4 (prensados) se observa un ligero incremento en la carga de la zona elástica hasta valores de 21 Ton y un posterior comportamiento asintótico hasta alcanzar un valor de 22 Ton.

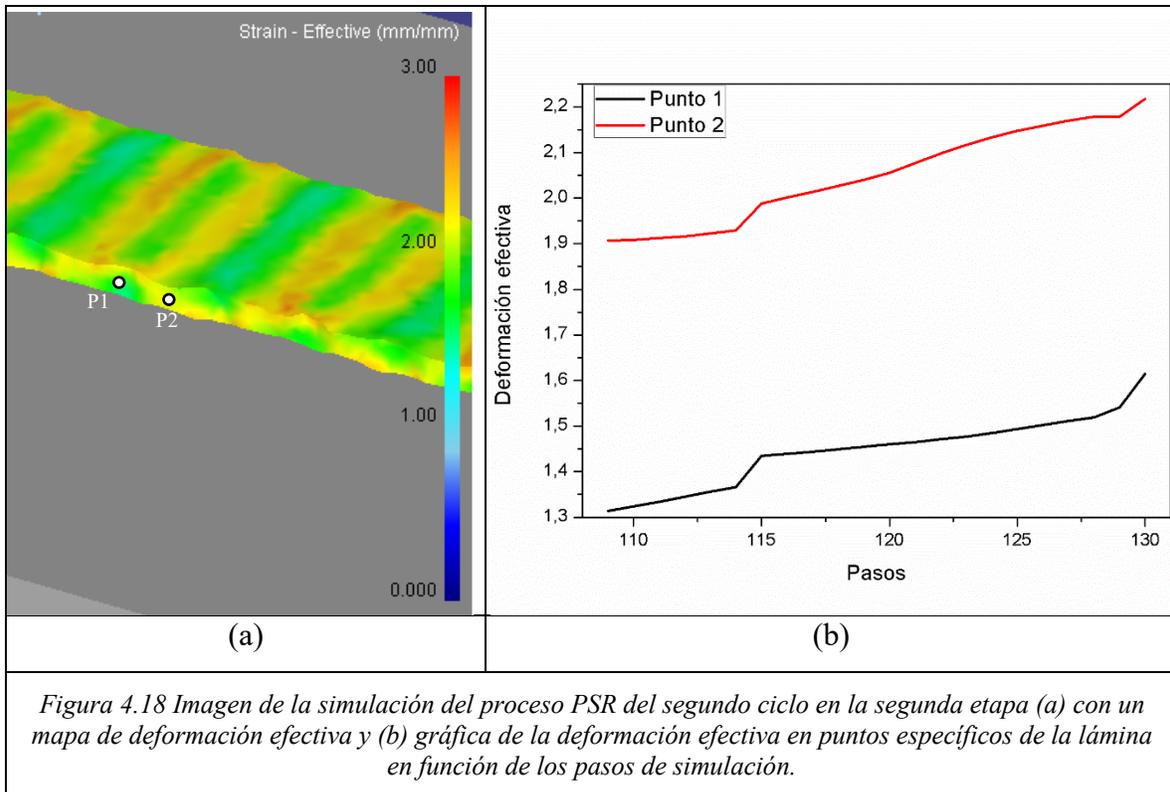


La realización de la simulación de las cuatro etapas del segundo ciclo del proceso PSR para la geometría de la lámina de 6 x 128 mm se presenta en las Figuras 4.17 – 4.20. El análisis de los resultados de dichas simulaciones se efectuará a continuación para cada una de las etapas.

En la Fig. 4.17 (a) se puede observar la simulación de la lámina en el primer corrugado y se presenta la deformación efectiva en una escala de colores. A partir de dichos resultados se pueden distinguir dos zonas: la primera de color azul claro corresponde a las zonas de mayor deformación localizada en los flancos y de azul oscuro que corresponde a las zonas de menor deformación, es decir en los valles y las crestas. En la Fig. 4.17 (b) se muestra la gráfica de deformación efectiva en las zonas de baja (Punto 1) y alta deformación (Punto 2) en función de los pasos de la simulación (cada paso corresponde a un avance del dado superior de 0.1 mm). La deformación efectiva en el punto 1 inicia en 1.1 y se incrementa parabólicamente hasta alcanzar un valor de 1.4, por su parte en el punto 2 la deformación efectiva inicia en 1.5 y se incrementa hasta un valor de 1.9 debido a la deformación por el corrugado.



En la Fig. 4.18 (a) se presenta la simulación del primer prensado donde la deformación efectiva se muestra de forma similar a como se ha descrito anteriormente. En la Fig. 4.18 (b) se muestran la deformación efectiva de los puntos P1 y P2 en función de los pasos de la simulación, en el punto 1 la deformación efectiva inicia en 1.3 y se incrementa ligeramente a 1.6 y en el punto 2 la deformación efectiva inicia en 1.9 y se incrementa hasta 2.2 como una consecuencia de la deformación por prensado de las zonas que habían sido estiradas durante el paso anterior de corrugado. En el trabajo de Hajizade *et al.* [38] reporta imágenes obtenidas mediante simulación vía MEF de una lámina de aluminio 1050 deformada hasta 4 ciclos de Prensado Restringido de Ranura (PRR) y las muestras presentan una deformación heterogénea similar obtenida en este trabajo de investigación y se examinó que existe deformación en las zonas que no deberían de presentar (valles y crestas), sobre todo en las etapas de aplanado de la pieza, en la Fig. 4.18 (b) se observa como en el punto 1 presenta dicha deformación, siendo que no debería presentarse según lo descrito teóricamente en la literatura [3].



En la Fig. 4.19 (a) se presenta la simulación de la etapa del segundo corrugado para el segundo ciclo, para la cual previamente la lámina se giró  $180^\circ$  respecto a su eje vertical. En la Fig. 4.19 (b) se presenta la variación de la deformación efectiva en función del número de pasos, en el punto 1 la deformación efectiva inicio en 1.8 y se elevó exponencialmente hasta 2.3 y en el punto 2 la deformación inicia en 2.0 y se eleva ligeramente hasta 2.15 debido a la deformación impuesta por el corrugado de la lámina. En esta etapa, según lo reportado en el artículo de Gupta *et al.* [3] la deformación efectiva en los flancos debería de ser de 1.74 y en los valles y crestas de 2.3.

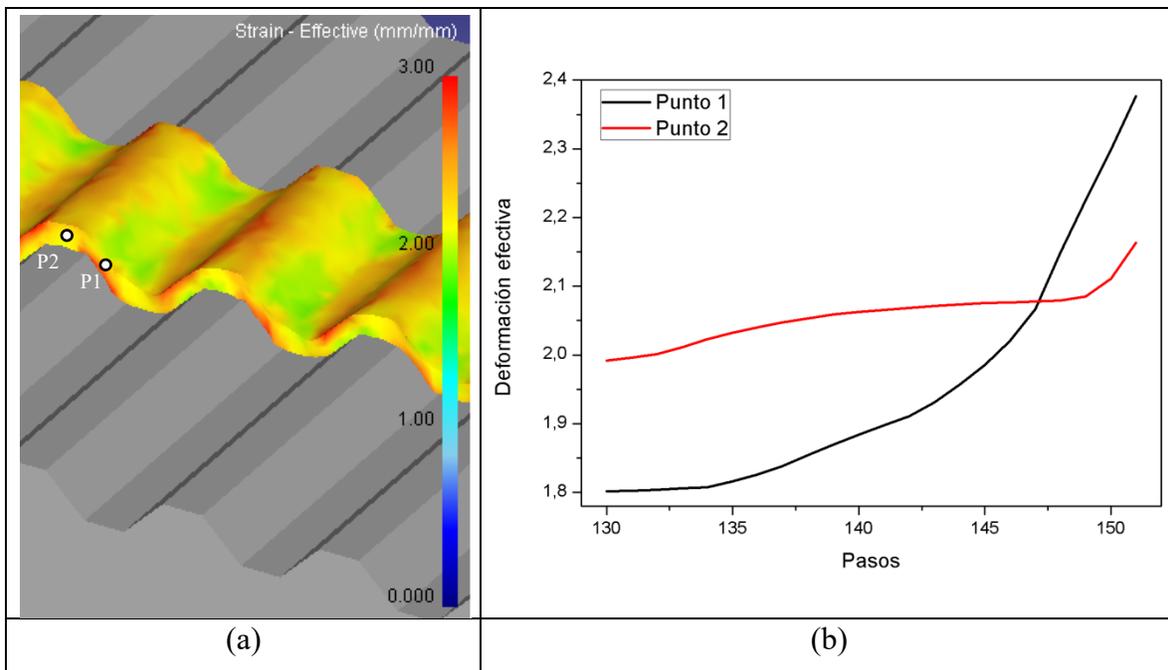
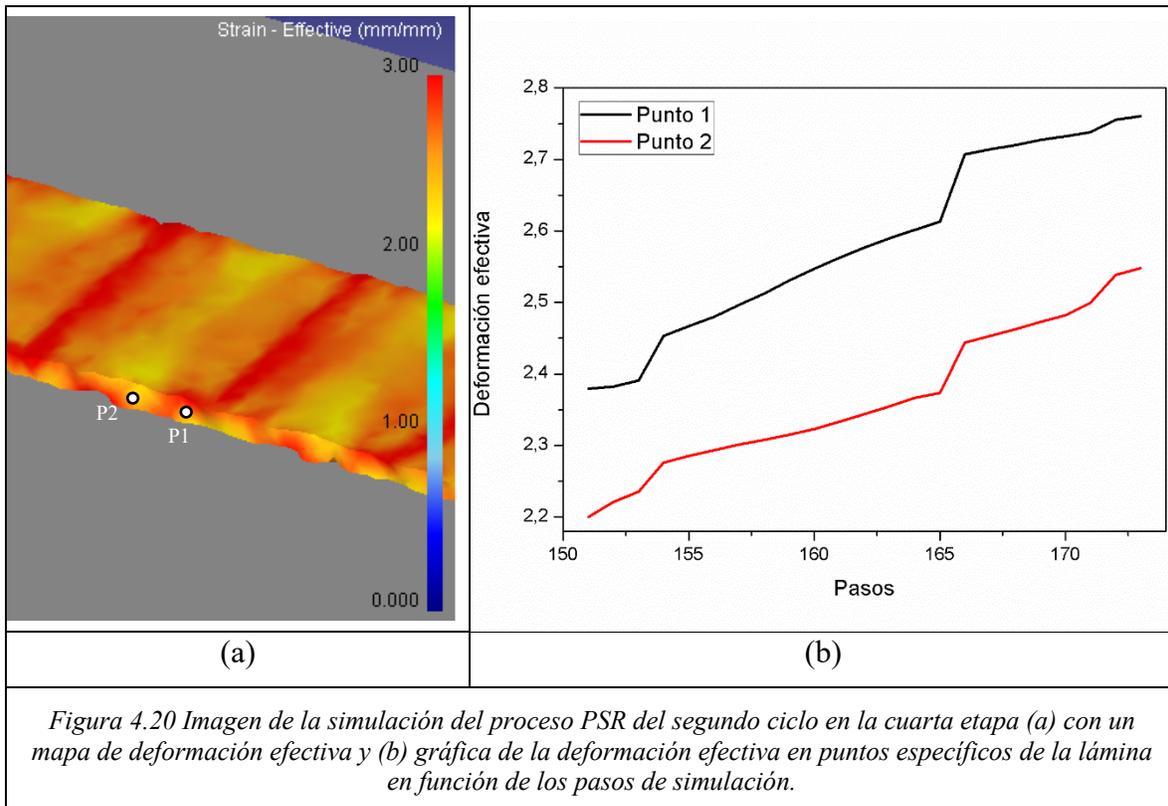


Figura 4.19 Imagen de la simulación del proceso PSR del segundo ciclo en la tercera etapa (a) con un mapa de deformación efectiva y (b) gráfica de la deformación efectiva en puntos específicos de la lámina en función de los pasos de simulación.

La Fig. 4.20 (a) presenta la simulación del segundo prensado del segundo ciclo. En la Fig. 4.20 (b) se presenta la variación de la deformación efectiva en función del número de pasos, en el punto 1 dicho parámetro inicia en 2.3 y se eleva hasta 2.7 y en el punto 2 la deformación inicia en 2.2 y se eleva hasta 2.5. Esta deformación es ligeramente mayor a la que esta reportada por Gupta *et al.* [2] de 2.3 para dos ciclos de PSR, además es importante mencionar

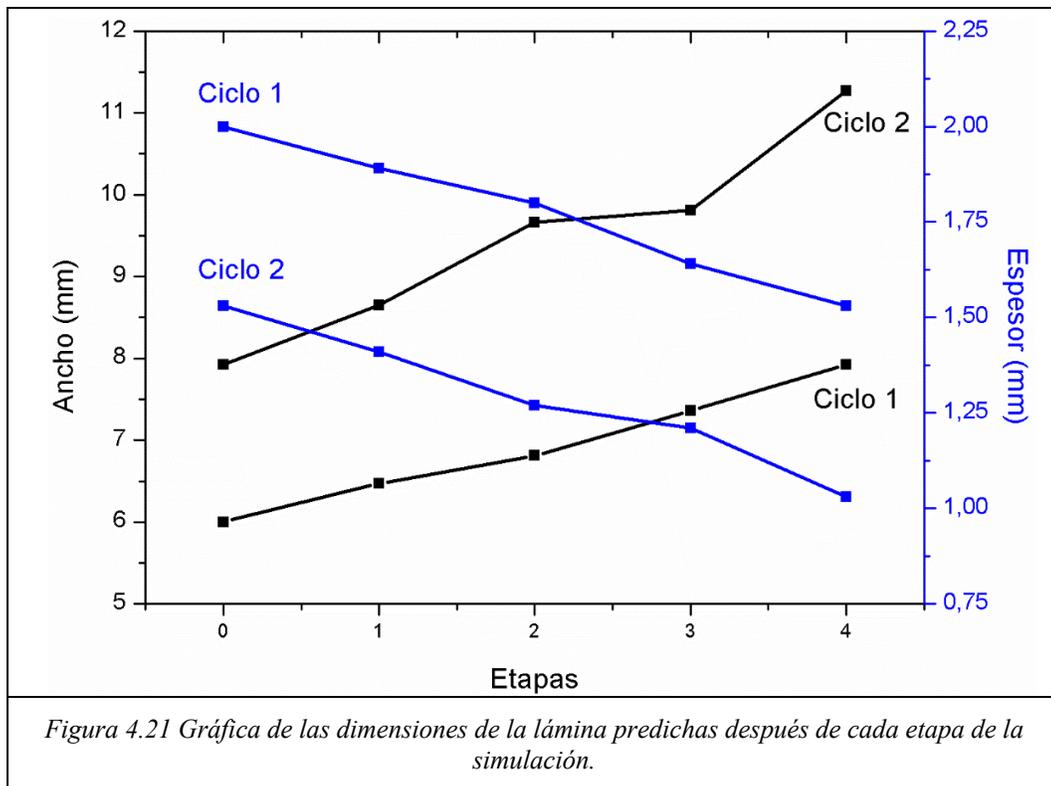
que la deformación no es homogénea, debido a que existió un aplastamiento por los dados que provoca un desplazamiento lateral de la lámina. A partir de estos resultados se establece que la implementación del PSR en la maquina universal disponible será posible aplicando dos ciclos en una lámina de 6 x 128 mm y aproximando las condiciones experimentales para obtener un coeficiente de fricción de 0.08.



En la Tabla 4.1 se muestran las dimensiones de la lámina después de cada etapa del primer y segundo ciclo de PSR. Se observa un aumento en el ancho a costa de la reducción del espesor de la lámina, esto es debido al aplastamiento que sufre la lámina en los últimos pasos de cada simulación cuando la carga aumenta abruptamente y se maximiza el área de contacto. En la Fig. 4.21 se observa la gráfica del aumento del ancho de la lámina en comparación al aumento del espesor de la lámina y se muestra cómo en las etapas de corrugado es donde se presenta un menor ensanchamiento de la lámina.

Tabla 4.1 Simulación de las medidas de la lámina después de cada etapa de la simulación del PSR en los dos ciclos.

Primer Ciclo	Medidas originales	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Ancho	6 mm	6.4 mm	6.8 mm	7.3 mm	7.9 mm
Espesor	2 mm	1.9 mm	1.8 mm	1.6 mm	1.5 mm
Segundo Ciclo		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Ancho	-	8.6 mm	9.6 mm	9.8 mm	11.2 mm
Espesor	-	1.4 mm	1.2 mm	1.2 mm	1.0 mm



#### 4.6. Resultados de la implementación del PSR.

Con los parámetros obtenidos de la simulación del PSR y mediante la fabricación de los dos pares de dados con un acero D2 (especificado en el Anexo 1), se procedió a realizar la implementación del PSR en una maquina universal SHIMADZU AG-II con capacidad de 60 Ton. Los parámetros más relevantes para el proceso son las dimensiones de la lámina y la rugosidad entre el material y el herramental (ver Fig. 4.22). Los dos pares de dados y las láminas fueron rectificadas en las superficies de trabajo, además durante el proceso experimental del PSR se lubricaron las superficies de contacto material/herramental para reducir la fricción y aproximar las condiciones bajo las cuales se realizaron las simulaciones del proceso.



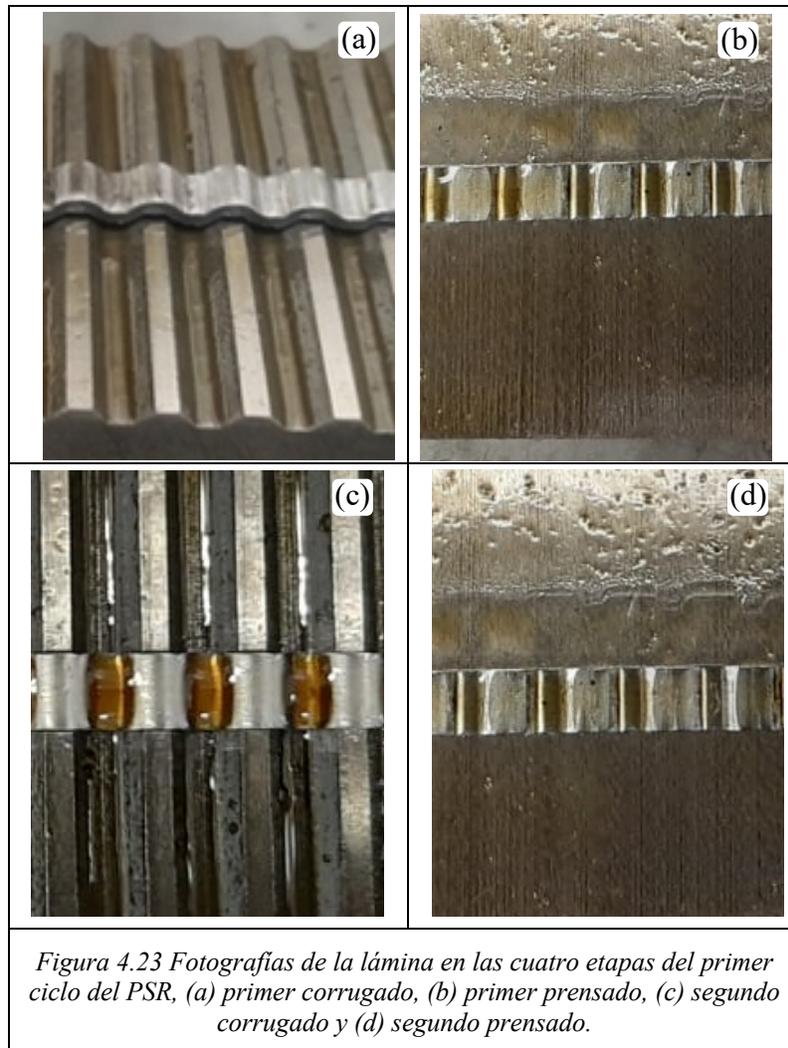
#### **4.7. Implementación del primer ciclo del PSR.**

En la Fig. 4.23 se presentan las fotografías de las cuatro etapas en las que se deformó la lámina de acero microaleado del primer ciclo, en cada etapa se tuvo que asegurar la alineación del dado superior con la platina de la maquina universal y con el dado inferior. Los parámetros óptimos de la simulación fueron: las dimensiones de la lámina (6 x 2 x 128 mm) y un coeficiente de fricción de 0.08. Para obtener la reducción del coeficiente de fricción de 0.12 a 0.08, experimentalmente se realizaron diferentes operaciones en la lámina y en los dados:

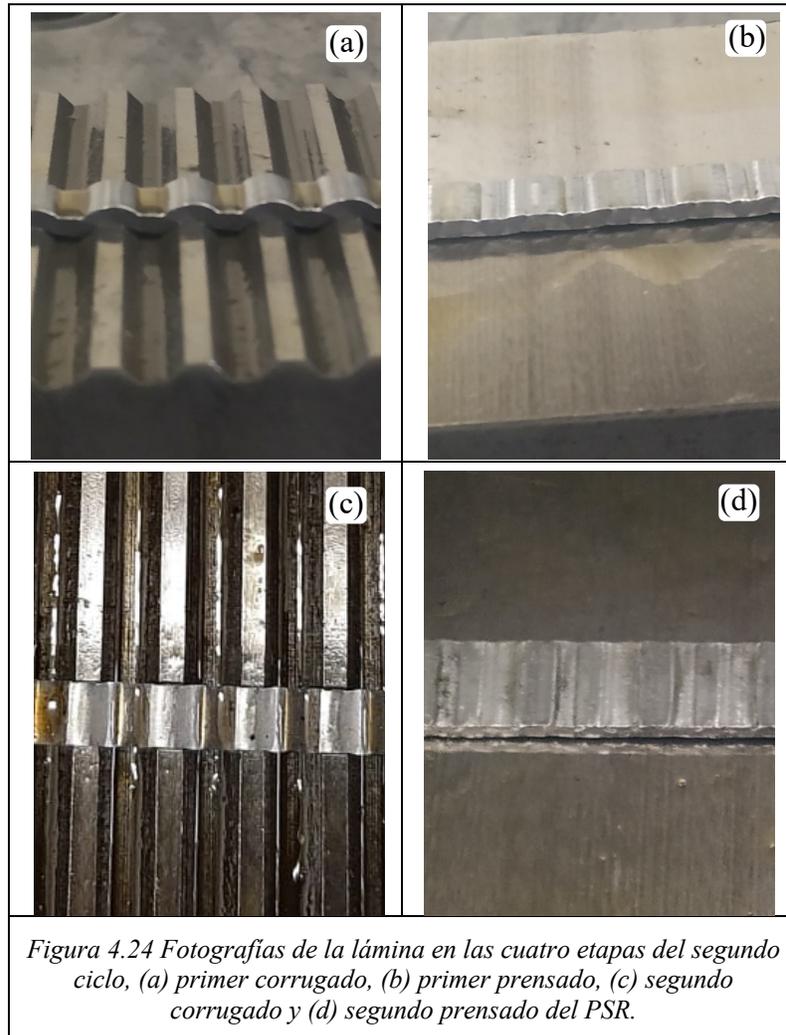
- Rectificación de las caras del herramental del PSR que entran en contacto con la lámina.
- Rectificación de la superficie de la lámina que están en contacto con el herramental.
- Uso de aceite de la marca Mitee durante las etapas del PSR.

Los parámetros establecidos del proceso para las 4 etapas del PSR son: velocidad del dado superior de (0.5 mm/s), dimensiones de la lámina (6 x 2 x 128 mm). Además, al posicionar el dado superior encima del dado inferior y la lámina, el control de la maquina universal no es lo suficientemente preciso para realizar el contacto inicial con la lámina, por lo cual en la mayoría de los corrugados y prensados, el dado superior se desplaza sin presentar carga hasta el momento exacto que realiza el contacto con la lámina.

A partir de los resultados experimentales obtenidos en el primero ciclo del PSR y en combinación los resultados obtenidos en la simulación, se tomó la decisión de efectuar un segundo ciclo del proceso PSR de forma experimental ya que el endurecimiento que experimento la lámina fue considerable.



En la Fig. 4.24 se presentan las fotografías del segundo ciclo del PSR, como ya se mencionó, la muestra fue sometida a un segundo ciclo gracias a la simulación realizada anteriormente es importante mencionar que al igual que en la simulación, se presentó un incremento en la carga para deformar la lámina. En el trabajo de Gupta *et al.* [3] se determinó que después de un ciclo de PSR, la lámina debe tener 1.16 de deformación efectiva debido al endurecimiento, lo cual quedó evidenciado en este trabajo ya que al terminar el segundo ciclo, las cargas para cada corrugado y prensado aumentaron aproximadamente un 50%. Al terminar el segundo ciclo del PSR la deformación efectiva deberá de ser de 2.32 teóricamente en la lámina, sin embargo, se determinó en la simulación que la lámina experimenta valores mayores debido al desplazamiento lateral en la dirección en la que los dados no están restringidos.



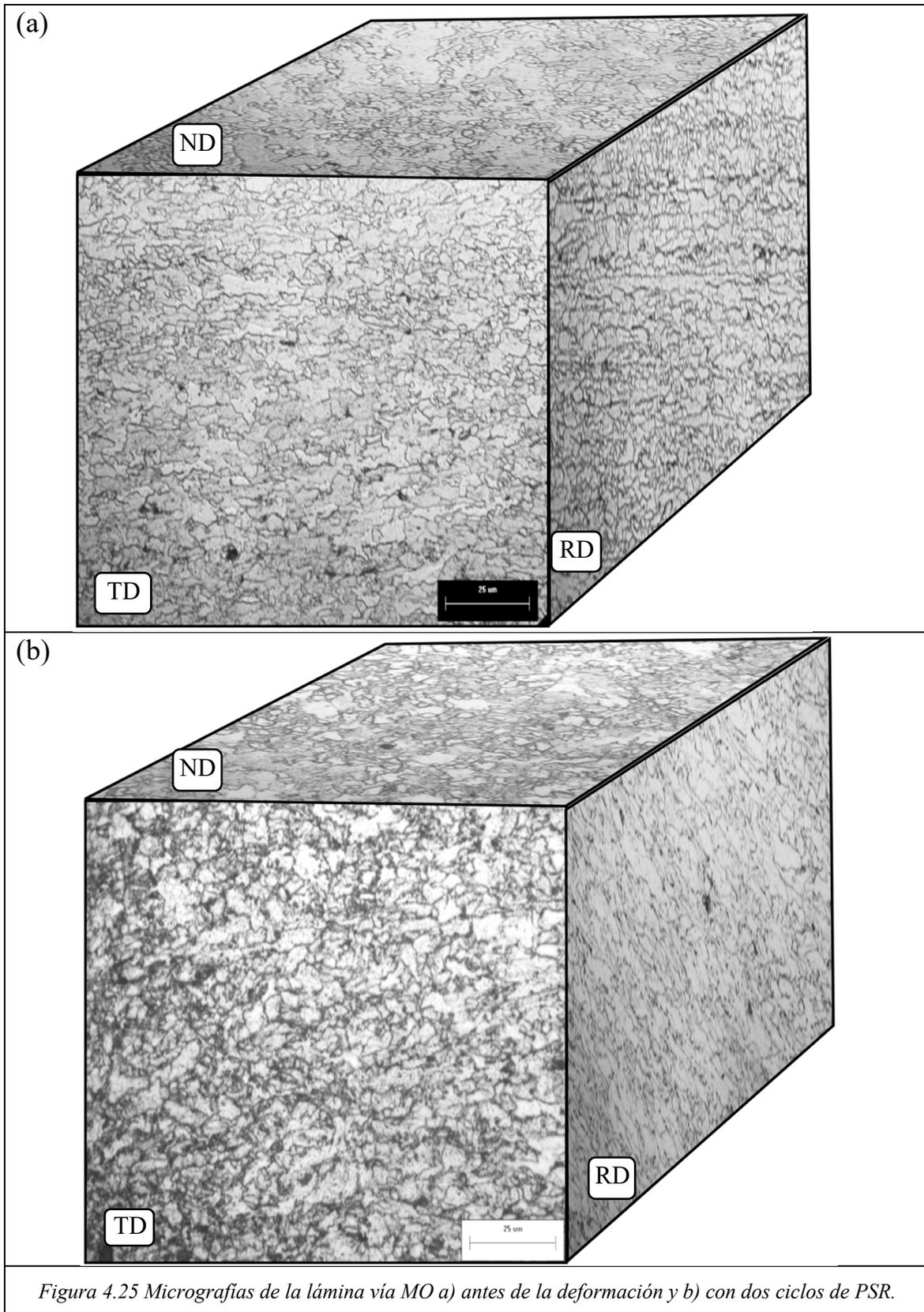
#### 4.8. Imágenes de la microestructura vía MO de la lámina.

En la Fig. 4.25 (a) se puede observar la microestructura de la lámina de acero microaleado antes de la deformación en la dirección de laminación (RD), en la dirección normal (ND) y en la dirección transversal (TD). La microestructura de la cara RD está compuesta de granos finos ( $\sim 1$  a  $10\mu\text{m}$ ) y alargados, lo cual es atribuido al tratamiento termomecánico controlado que se utiliza para procesar estos aceros [7], mientras que en la dirección ND, se observa una distribución heterogénea de granos gruesos y granos finos en su mayoría equiaxiados. Por

último, en la cara frontal del cubo se observa la micrografía tomada desde la dirección TD en su mayoría con granos equiaxiados y granos gruesos.

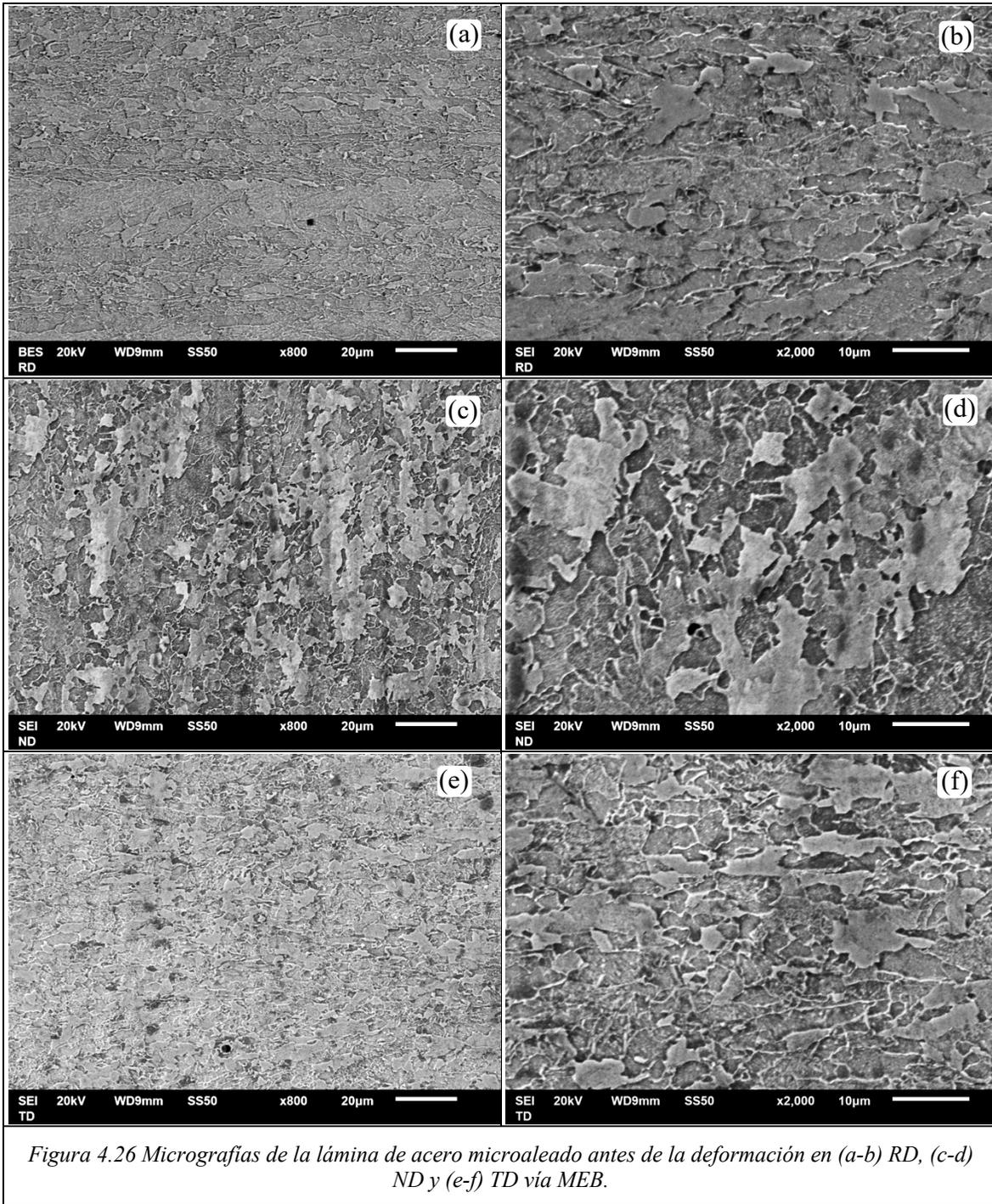
En la dirección ND es donde se ubican los granos con mayor tamaño y probablemente es donde se puede observar mejor el cambio de su microestructura después del PSR. Los aceros microaleados por lo común suelen tener una microestructura de tamaño fino [24], esto es debido a su procesamiento termomecánico en el que se controla el tamaño de grano de la austenita para refinar lo más posible el tamaño de grano de la ferrita [39].

En la Fig. 4.25(b) se muestra la microestructura de la lámina de acero microaleado después de dos ciclos de PSR en las direcciones RD, ND y TD. La cara lateral del cubo muestra una micrografía tomada en RD donde se observa una microestructura con granos alargados por la deformación del PSR después de dos ciclos, exhibiendo un alineamiento en la dirección de la deformación provocada por los dados corrugados. En la cara superior del cubo se observa una imagen tomada en la dirección ND de la lámina en la que se observa una microestructura heterogénea entre granos finos y ultrafinos y con morfología equiaxiada. En la cara frontal se encuentran la micrografía obtenida en la dirección TD, en la que se exhiben en su mayoría, granos equiaxiados de tamaño fino.



#### **4.9. Imágenes de la microestructura vía MEB de la lámina.**

La Fig. 4.26 muestra micrografías de la lámina del acero como materia prima obtenidas vía MEB en las cuales se observa una microestructura de granos finos de la fase ferrítica en la dirección ND. Las Fig. 4.26 (a) y (b) muestran una microestructura heterogénea ya que se observan granos finos (1~10  $\mu\text{m}$ ) y granos ultrafinos (0.1~1  $\mu\text{m}$ ). En la Fig. 4.26 (c) y (d) se observa la microestructura de la lámina en la dirección ND, en su mayoría de granos de ferrita equiaxiales. En la Fig. 4.26 (e) y (f) se presenta la microestructura en la dirección TD de la lámina de granos finos de ferrita equiaxiales.



En la Fig. 4.27 se muestran micrografías vía MEB de la lámina sometida a dos ciclos de deformación severa del PSR, en las cuales se observa una microestructura ferrítica de granos finos. La Fig. 4.27 (a) y (b) corresponden a la microestructura en la dirección RD, se puede observar la microestructura de granos finos alargados, en su mayoría con una pequeña

cantidad de granos ultrafinos, presentado un patrón de flujo tipo “s” asociado a la deformación por corrugado-prensado, ver la Fig. 4.27 (a). En la Fig. 4.27 (c) y (d) se observa la microestructura de la lámina en la dirección normal, en su mayoría exhibiendo granos finos equiaxiados, pero sin exhibir el patrón de flujo mostrado en RD.

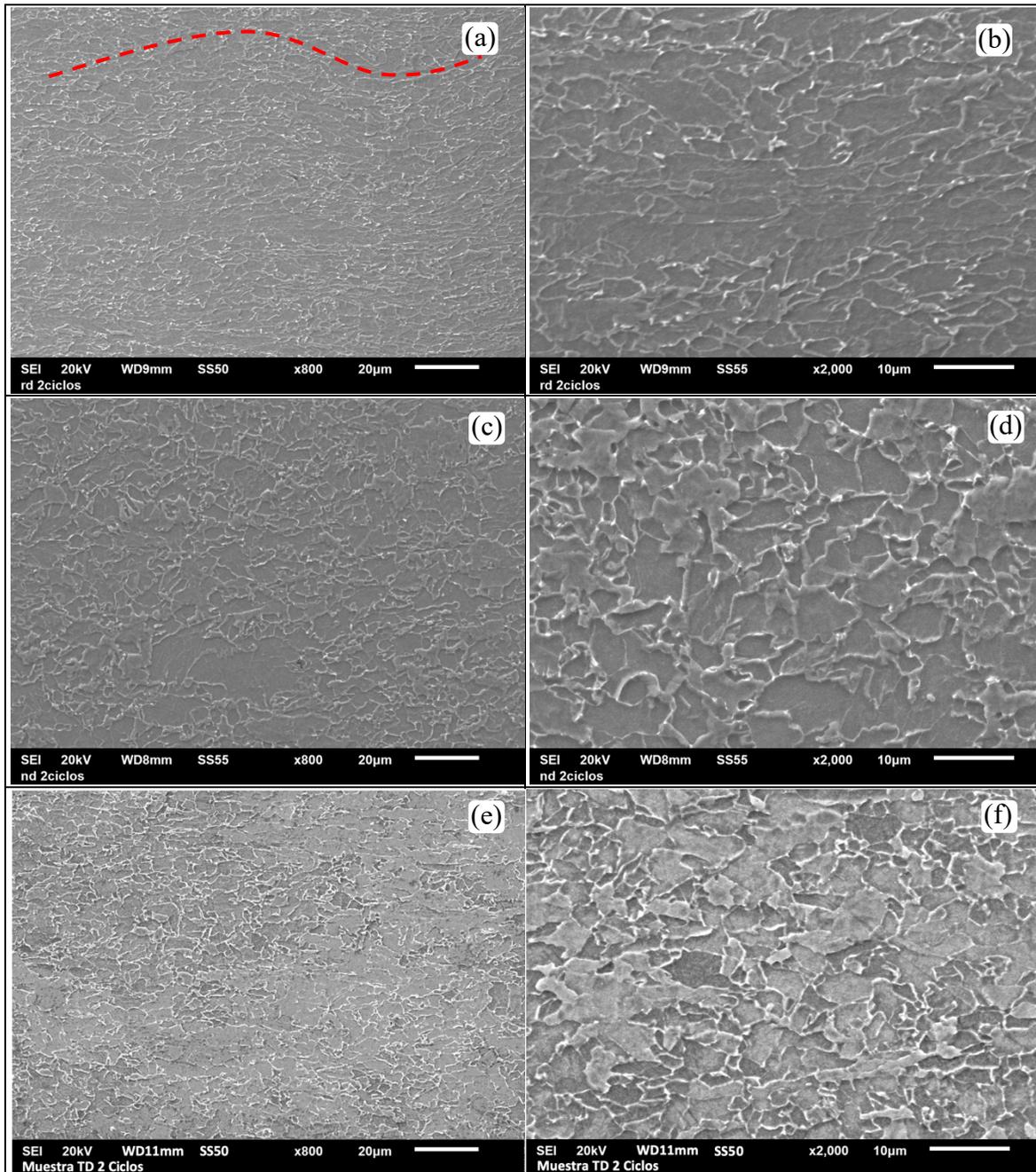


Figura 4.27 Micrografías de la lámina de acero microaleado después de dos ciclos de PSR en (a-b) RD, (c-d) ND y (e-f) TD vía MEB.

En la Fig. 4.28 (a) se muestran imágenes vía MEB de la lámina en dirección ND sometidas a dos ciclos de deformación severa mediante el PSR. Se puede observar una microestructura ferrítica con una mezcla de granos finos y ultrafinos. El cuadro azul presentado en la Fig. 28 (a) muestra a una mayor magnificación la zona indicada en la Fig. 4.28 (b) en donde se observan contrastes de posibles límites de sub-granos, esto evidenciaría la presencia de la acumulación de dislocaciones que están formando nuevos sub-granos dentro de los granos iniciales de ferrita.

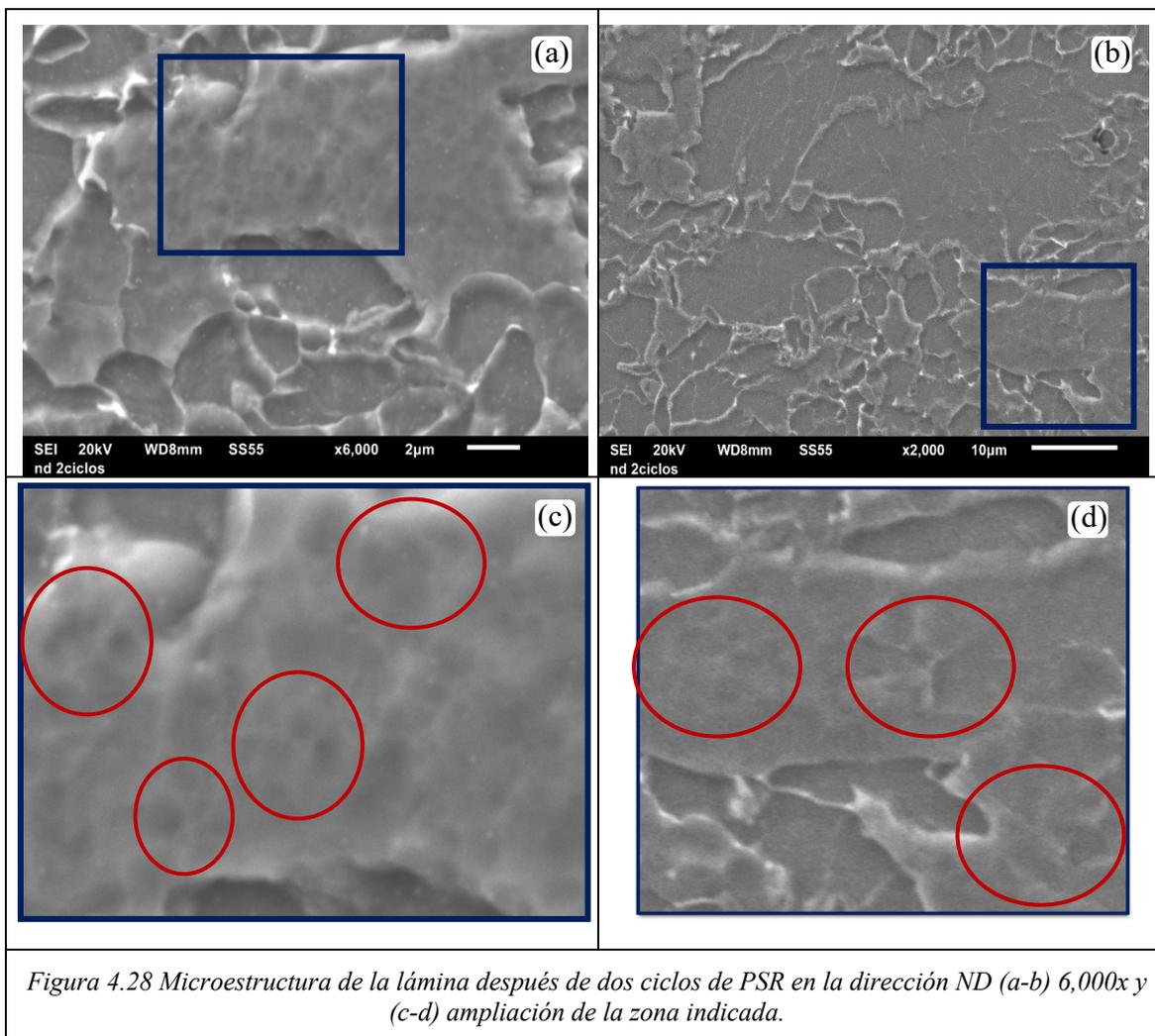


Figura 4.28 Microestructura de la lámina después de dos ciclos de PSR en la dirección ND (a-b) 6,000x y (c-d) ampliación de la zona indicada.

Raab *et al.* [40] explicaron que al tener 0.28 de deformación convencional en un acero perlítico ferrítico con 20% en peso de Cr se presenta una desorientación dentro de los granos y eso fue observado vía microscopía electrónica de transmisión mediante la técnica de campo

oscuro. Cuando la deformación convencional llega a 0.82 se desarrolla más la estructura desorientada dentro del grano de la ferrita y llega a valores de deformación severa  $e = 1.51$ , generando que dentro de los granos de ferrita se forme una nanoestructura inducida por la deformación con una desorientación de ángulo alto [40].

En resumen, cuando al acero se le induce una baja cantidad de deformación ( $e = 0.1$  y  $0.2$ ) el material empieza a formar dislocaciones, las cuales al llegar a una deformación aproximada de  $e = 0.28$  y  $0.43$  forman estructuras desorientadas débiles y al llegar a una deformación plástica severa de  $e = 0.82$ ,  $1.21$  y  $1.51$ , forman estructuras altamente desorientadas dentro del grano de ferrita [40].

Esto se debe a la deformación plástica severa inducida por el proceso PSR, el cuál empieza a refinar la microestructura según el mecanismo propuesto por Sedlacek *et al.* [16] en donde la formación de sub-granos es el resultado de favorecer la deformación reduciendo localmente el número de sistemas de deslizamiento activos.

Los sub-granos que se forman cambian su orientación debido al esfuerzo aplicado [16]. Esto está relacionado con el factor de Schmid, el cual es un parámetro pertinente para predecir la orientación cristalográfica de cada grano dependiendo del esfuerzo aplicado [41]. Cuando el factor de Schmid es modificado se puede presentar un endurecimiento o ablandamiento geométrico provocado por el movimiento de dislocaciones, que siguen los planos de deslizamiento, adicionalmente la orientación del cristal cambia con respecto al esfuerzo inducido en él.

Cuando los límites de sub-granos son formados, estos conducen al endurecimiento del material ya que pueden lograr inducir tensiones internas de largo alcance en el interior del sub-grano al tratar de que las dislocaciones adopten una forma curvada [16].

Song *et al.* [42] afirman que al producir una estructura sub-micrométrica por un proceso de deformación plástica severa, la microestructura estará compuesto de granos alargados, debido a la gran cantidad de deformación inducida y con alrededor del 40% de los límites de

granos de ángulo bajo (desorientaciones  $<15^\circ$ ), lo que sería no tan favorable en cuanto a las propiedades mecánicas del acero microaleado [42].

La deformación efectiva obtenida en la lámina después de dos ciclos de deformación plástica severa mediante el PSR, fue de 2.32 según el trabajo publicado por Gupta *et al.* [3], este nivel de deformación ocasiona un endurecimiento por deformación y probablemente endurecimiento por tamaño de grano. Con las imágenes tomadas vía MEB no se ha logrado comprobar del todo un evidente refinamiento en la microestructura, solo se observan granos alargados y con un tamaño muy aproximado al de la lámina antes de la deformación, además de los contrastes de ciertos arreglos de dislocaciones en el interior de los granos iniciales. En la literatura consultada [6], [29], [43] se reporta que los ciclos de PRR necesarios para refinar la microestructura de una lámina de acero de bajo carbono fueron entre tres y cuatro, es decir, se requirió una deformación efectiva entre 3.5 a 4.6 para producir una reducción en el tamaño de grano de  $30\ \mu\text{m}$  a un tamaño promedio de  $230\ \text{nm}$  de una lámina de un acero de composición: Fe-0.05C-0.05Si-0.2Mn-0.005P-0.005S-0.003Cr-0.01Ni-0.002Mo.

#### **4.10. Tamaño de grano**

En la Tabla 4.2 se muestran los datos que se tomaron para realizar la medición del tamaño de grano en la lámina en condición de materia prima, obteniendo un tamaño de grano promedio según la norma ASTM E112 [33] de 14.9, esto indica un tamaño menor al mínimo que se establece en la norma, es decir, menor a  $2.8\ \mu\text{m}$  de tamaño promedio. En las imágenes obtenidas vía MEB de la lámina en materia prima y después de dos ciclos de PSR, no se aprecia un cambio en su tamaño, al menos con la resolución proporcionada con las micrografías de MEB. En trabajos realizados por Khodabakhshi F. *et al.* [6], [12], [43], se aplicó un proceso PRR en un acero de bajo contenido de carbono y el refinamiento de la microestructura se presentó después de inducir una deformación efectiva mayor a 3, sin embargo, hay que puntualizar que el tamaño de grano de partida era mucho mayor al que se tiene en este trabajo de investigación. En materiales como cobre y aluminio puros [44]–[46], el refinamiento en estos metales se presentaba induciendo una deformación efectiva mayor a 3, partiendo con un tamaño de grano mayor a  $38\ \mu\text{m}$  en su mayoría. Con estos datos se puede

concluir que el refinamiento en la microestructura de la lámina solo fue parcialmente promovido como fue observado en la micrografías de MEB, sin embargo los posibles límites de ángulo bajo de los sub-granos no fueron evidenciados con el suficiente contraste para ser cuantificado su tamaño.

*Tabla 4.2 Datos de la medición de tamaño de grano, para la muestra en materia prima.*

Campo	Ni	NL	$\ell$	G
1	41	492	0.0020	14.6
2	54	648	0.0015	15.4
3	33	396	0.0025	14.0
4	46	552	0.0018	14.9
5	51	612	0.0016	15.2
6	31	372	0.0027	13.8
7	51	612	0.0016	15.2
8	49	588	0.0017	15.1
9	56	672	0.0015	15.5
10	47	564	0.0018	15.0
11	51	612	0.0016	15.2

**Cálculos estadísticos**

Tamaño de grano ASTM

promedio

$$\bar{G} = 14.9$$

Desviación estándar

$$s = 0.0004$$

Intervalo de confianza

$$95\%CI = 0.00027$$

Porcentaje de precisión relativo

$$\%RA = 14.38$$

El tamaño de grano medido en la lámina de acero microaleado es el mismo antes y después de la deformación plástica severa mediante PSR, por dicha razón en el capítulo siguiente se muestran las propiedades mecánicas y el cambio que éstas sufrieron, esto permite evidenciar un cambio microestructural a escalas nanométricas, por dicha razón con las técnicas utilizadas de caracterización como es MO y MEB, no fueron suficientes para evidenciar este cambio, sin embargo los resultados en la siguiente sección confirman el cambio microestructural que sufrió la lámina de acero microaleado deformada severamente.

## Capítulo 5 Discusión de los resultados de los ensayos de tensión, microdureza y resistencia al impacto.

Después de realizar la implementación del proceso PSR, mediante el uso de una lámina de acero microaleado, se evaluaron las propiedades mecánicas de la materia prima y de la lámina con uno y dos ciclos de deformación severa vía el PSR. Esto para verificar el posible cambio en las propiedades dependiendo de la deformación inducida a la lámina. Los ensayos que se realizaron fueron: resistencia a la tensión, resistencia al impacto y evaluación de microdureza.

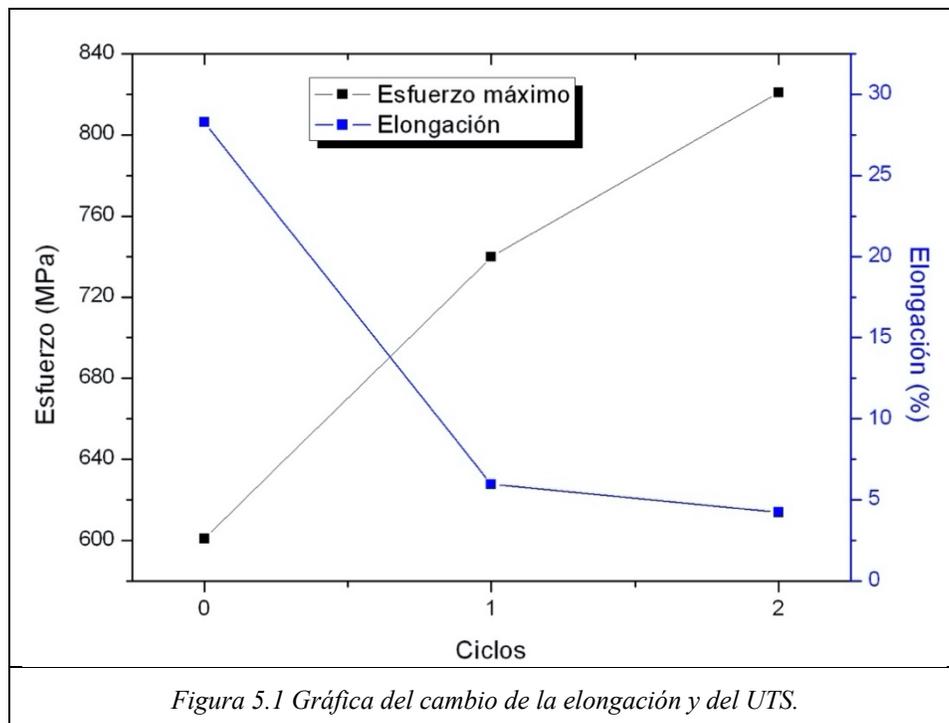
### 5.1. Resistencia a la tensión.

Los ensayos de tensión se realizaron en tres condiciones: materia prima, con uno y dos ciclos de deformación severa vía el PSR, esto para verificar si hubo algún cambio en sus propiedades mecánicas. En la Tabla 5.1 se presentan los resultados de los ensayos de tensión en las condiciones enunciadas. Se observa que con un solo ciclo el esfuerzo máximo a la tensión (*ultimate tensile strength*, UTS) aumenta de 601.5 MPa a 739.8 MPa i. e. un aumento en el UTS de 23%, y una reducción en su elongación del 28.3% a 5.9%, esto significa una reducción de la elongación de un 79%. En cambio si se hace la comparativa de la lámina en estado de la materia prima con la lámina después de dos ciclos de PSR, se presenta un aumento en el UTS de 601.5 MPa a 820.66 MPa i.e. un incremento en UTS del 36.4% y una reducción de la elongación de 28.3% a 4.2% es decir, un 85% de disminución de su elongación total. El aumento que presentó la resistencia a la tensión de la lámina de acero microaleado después de dos ciclos de deformación plástica severa, nos permite constatar que hubo un cambio microestructural en escalas nanométricas, para trabajo futuro se podrá evidenciar este cambio, por técnicas de caracterización especializadas, por ejemplo con un microscopio electrónico de transmisión (MET).

En la Fig. 5.1 se muestra la variación de la UTS y del porcentaje de elongación en función del número de pasos de deformación severa vía PSR del condensado de la Tabla 5.1. A partir de dicha gráfica se observa que la UTS se incrementó conforme aumentó el número de pasos de PSR con una tendencia no lineal. Por su parte el porcentaje de elongación se redujo de forma abrupta de 0 a 1 paso y posteriormente al pasar de 1 a 2 pasos de PSR la reducción en dicho valor fue menor.

Tabla 5.1 Valores de esfuerzo último a la tensión y elongación para la lámina de acero microaleado con diferentes pasos de PSR.

Ciclos	Esfuerzo último a la tensión (MPa)	Elongación (%)
0	601.0	28.3
1	739.8	5.9
2	820.6	4.2

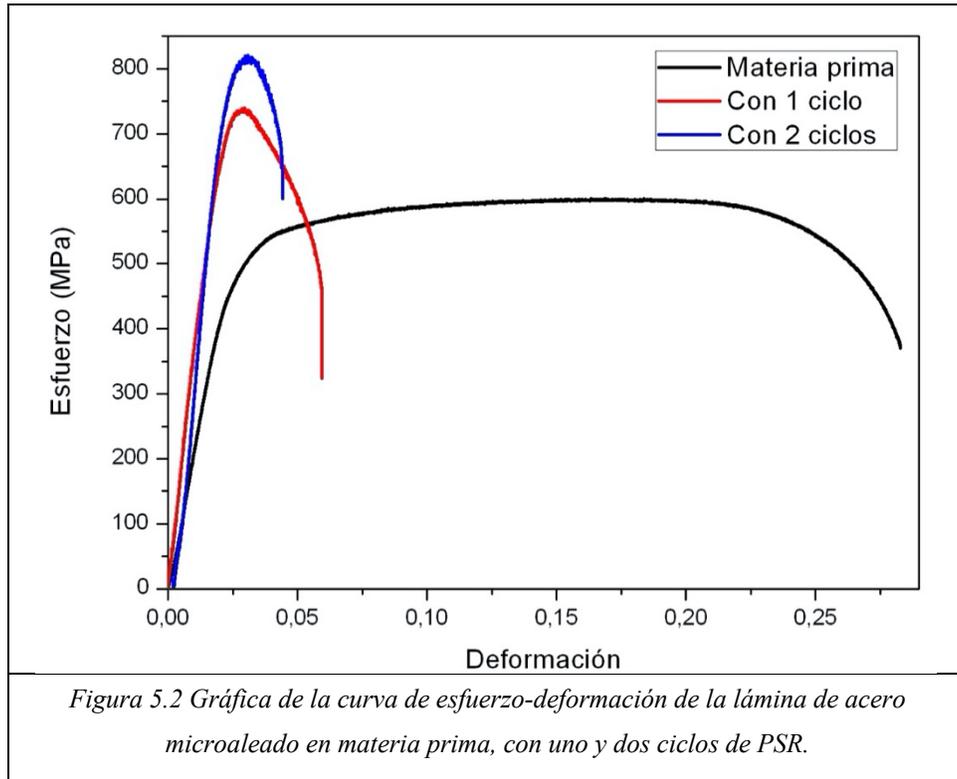


En los trabajos de Khodabakhshi *et al.* [6], [12], se realizó un ensayo de tensión para láminas con 2 y 4 ciclos de PRR y PRRC, respectivamente, y se obtuvo un incremento en su esfuerzo último a la tensión de aproximadamente 53%, esto es debido a la reducción del tamaño de grano (aproximadamente de 30  $\mu\text{m}$  a 230 nm) de un acero de bajo contenido de carbono con la siguiente composición química: Fe-0.052C - 0.01Si - 0.21Mn - <0.01P - 0.003S - <0.01Cr - <0.01Mo - <0.024Ni - 0.045Al - <0.01Co - <0.027Cu - <0.005Nb - <0.002Ti - <0.005V - <0.025W. El cambio en la resistencia a la tensión que experimento la lámina de acero microaleado en este trabajo de investigación fue menor, al igual que la deformación, por dicha razón es que el cambio en su microestructura no es evidente, al contrario con lo que paso con los trabajos de Khobadakshi *et al* [6], [12].

El incremento en el límite de cedencia se puede observar en la Fig. 5.2, la cual muestra las curvas esfuerzo deformación para el acero estudiado en las tres condiciones, esto puede ser explicado con la ecuación de Hall-Petch para el endurecimiento por tamaño de grano:

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2} \quad (5)$$

Donde  $\sigma_y$  es el límite de cedencia,  $\sigma_i$  el esfuerzo de fricción,  $k_y$  es la resistencia del límite de grano y  $d^{1/2}$  es el tamaño del grano en  $\mu\text{m}$ . Song *et al.* [42] afirma que el valor de  $k_y$  disminuye si el tamaño de grano es muy pequeño. Por lo tanto, si el tamaño de grano llega a un tamaño crítico el valor de  $k_y$  disminuye y lo que ocasiona que la relación de Hall-Petch (ecuación 5) ya no se cumpla para dicho tamaño. En un acero procesado mediante el prensado semi-restringido, su microestructura está mayoritariamente formada por límites de sub-granos que puede ser que sea una de las causas que originen que no se cumpla estrictamente la relación de Hall-Petch y esto es más notorio en materiales nanoestructurados [42].



Song *et al.* [42] reporta que un decremento en el tamaño de grano conduce a una disminución en la ductilidad del material. Esto puede ser explicado porque el refinamiento de grano induce una menor capacidad de endurecimiento por deformación. La inestabilidad plástica (el encuellamiento) en un ensayo de tensión ocurre al principio del ensayo lo que resulta en una elongación uniforme limitada [42]. Sin embargo, se ha reportado que se puede tener una elongación de 20% en aceros procesados mediante procesos de deformación plástica severa debido a una segunda fase (cementita) finamente dispersa. En nuestro caso tenemos un porcentaje de carbono de 0.05%, por lo que la fase de cementita no está presente en la lámina de acero, y por tanto, su reducción en la elongación es considerable debido al endurecimiento por deformación que experimentó el material.

## 5.2. Microdureza Vickers

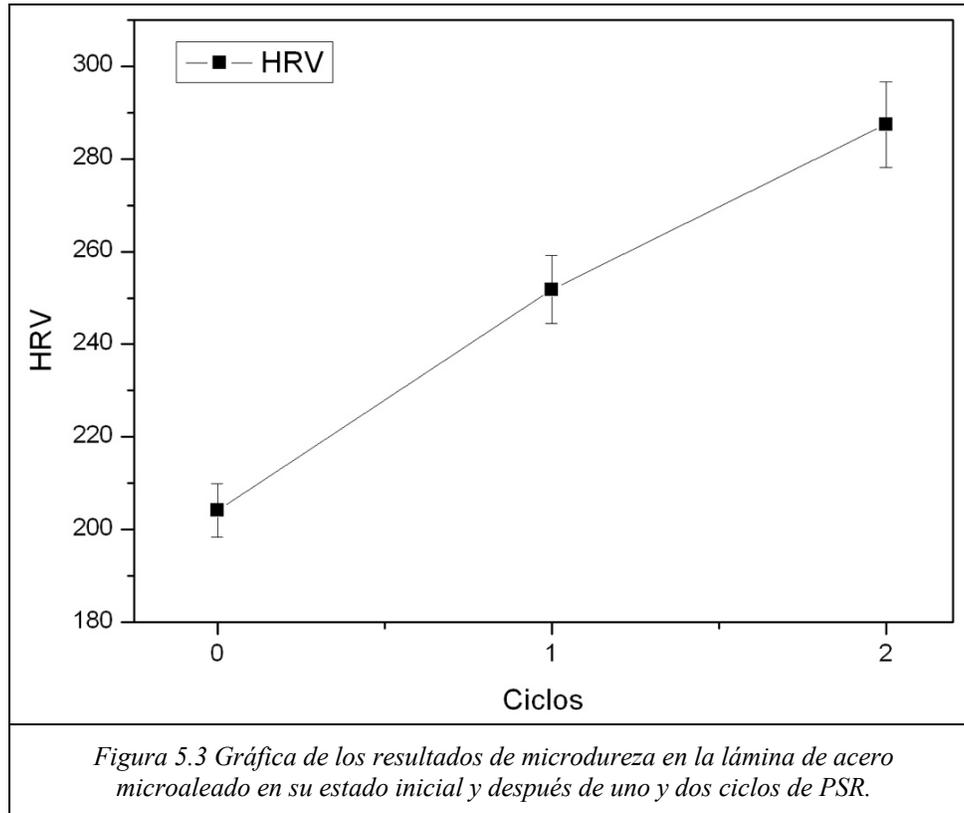
El ensayo de microdureza Vickers se realizó a la lámina de acero microaleado, en la Tabla 5.2 se presentan los resultados de dureza Vickers promedio para cada condición así como su desviación estándar. En dicha tabla se muestra el incremento de este parámetro que la lámina experimentó. Haciendo el comparativo en su estado inicial y después de un ciclo de PSR, se tiene un incremento de 204.1 HV a 251.8 HV, es decir, un aumento del 23.4% y si se compara la dureza en su estado inicial con la dureza después de dos ciclos, se observa un incremento de 204.1 HRV a 287.4 HRV, exhibiendo un aumento del 40.8%.

En la Fig. 5.3 se observa la gráfica de la dureza en función del número de ciclos de PSR de los resultados correspondientes a la Tabla 5.2. Los anteriores resultados son equiparables con los trabajos de Alihosseini y Khodabakhshi *et al.* [6], [12], [47], donde se reporta un aumento del 80% de la dureza para un acero de bajo contenido de carbono después de cuatro ciclos de PRR y PRRC respectivamente. En materiales como aluminio, Shin *et al.* [9], [11] reportan un aumento de la dureza de aproximadamente 80%. Por su parte, Gupta *et al.* [3] reportan que la dureza Vickers de las láminas de titanio puro presentó un aumento de 90% en el mismo parámetro. Estos resultados demuestran la misma tendencia en el aumento de la dureza después de uno o varios ciclos en las diferentes variantes del PRR.

En los trabajos de Khodabakhshi *et al.* [6], [12] se muestra una gráfica en la que se observa un perfil de la dureza de la muestra y se reporta un aumento después del primer ciclo; en los ciclos subsecuentes el incremento es menor pero con una mayor homogeneidad en los resultados.

Tabla 5.2 Valores de microdureza HV promedio en la lámina de acero microaleado en estado inicial y después de uno y dos ciclos de PSR.

Ciclos	HV	Desviación estándar
0	204	5
1	251	7
2	287	9



En resumen, se observa un aumento en las propiedades mecánicas como son la microdureza y la resistencia a la tensión, sin embargo la elongación y la tenacidad del material fueron reducidas. Se demuestra en este trabajo de investigación que el proceso PSR que está basado en el método de deformación plástica severa, puede aumentar ciertas propiedades mecánicas endureciendo al material pero modificando ligeramente las dimensiones iniciales del material. En los trabajo de Khodabakhshi *et al.* [6], [12] en donde se trabajó con una lámina de acero de bajo contenido de carbono (material muy parecido al de este trabajo de investigación), los resultados fueron muy similares en las propiedades mecánicas de la resistencia a la tensión, dureza y elongación.

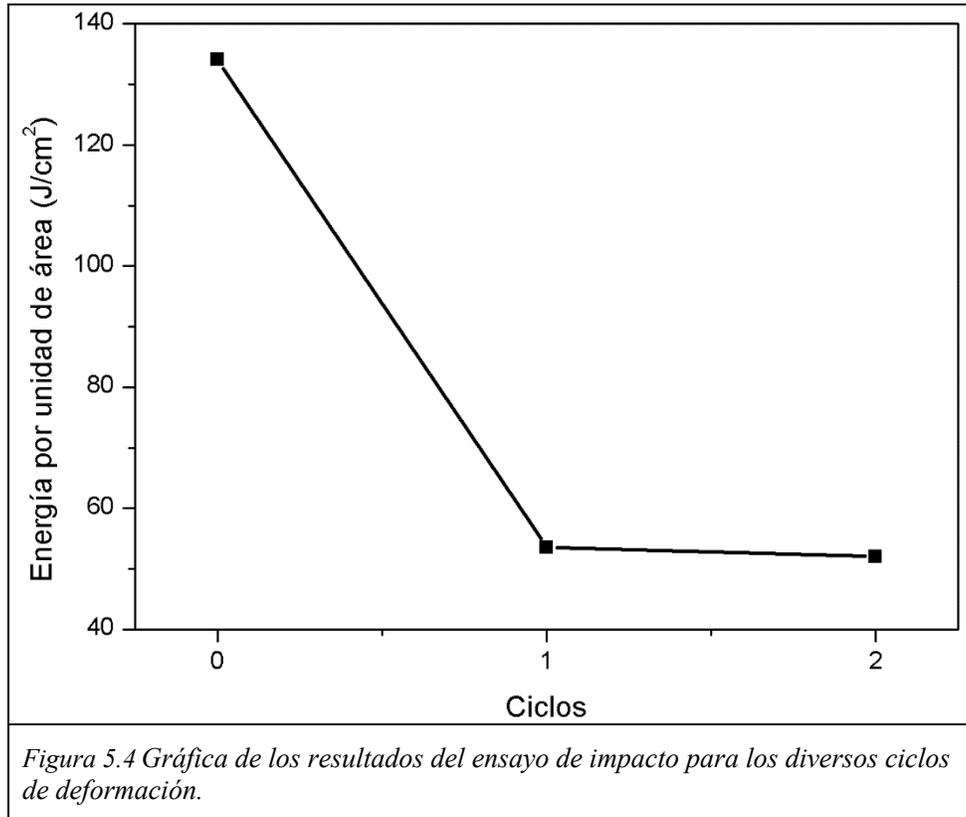
### 5.3. Resistencia al impacto.

El ensayo de resistencia al impacto se realizó a la lámina de acero microaleado en las condiciones como materia prima y con uno y dos ciclos de PSR. En la Tabla 5.3 se muestran los datos del ensayo. En dicha tabla se tomó en cuenta la energía absorbida por unidad de área, lo anterior es por la variación de las dimensiones de las dos probetas que se describieron en el capítulo 3. Se tienen dos medidas en las probetas de impacto, la primera probeta fue de la lámina sin deformar cuatro láminas de 55 x 10 x 2.5 mm apiladas (ver Fig. 3.3), mientras que las probetas con uno y dos ciclos de deformación plástica severa fueron 5 láminas de 55 x 6 x 2 mm apiladas (ver Fig. 3.3). Esto es debido a que las láminas que fueron procesadas por el PSR de 128 x 6 x 2 (largo, ancho y espesor) y el ancho máximo de estas probetas fueron de 6 mm.

El ensayo de resistencia al impacto se llevó a cabo con las tres probetas y debido a las dos diferentes dimensiones, se comparará la energía absorbida por unidad de área de cada probeta, es decir, el resultado obtenido a partir del ensayo de impacto se dividió entre el área de la probeta con la que golpeo el péndulo a la muestra. A partir de estos resultados se observa que al aplicar un ciclo de PSR se presentó un decremento en la energía absorbida de 134. J/cm<sup>2</sup> hasta 53.5 J/cm<sup>2</sup>, es decir existió una reducción del 60% en la tenacidad; al aplicar el segundo ciclo de PSR, la variación en la tenacidad fue menor permaneciendo los valores muy similares al ciclo previo (52.0 J/cm<sup>2</sup>) cómo se aprecia en la Fig. 5.3

*Tabla 5.3 Datos de los resultados del ensayo de impacto por cm<sup>2</sup> para los diversos ciclos de deformación.*

CICLOS	Energía por unidad de área (J/cm <sup>2</sup> )
0	134.0
1	53.5
2	52.0



Los resultados obtenidos se consideran favorables porque como se observó en la sección de resistencia a la tensión, se incrementó el esfuerzo último a la tensión sin perder por completo la tenacidad. Existen escasos trabajos que hayan realizado la prueba de impacto Charpy en materiales nanoestructurados mediante deformación severa, esto es debido al tamaño de la probeta que se tiene que producir, sin embargo puede ser medida mediante las curvas obtenidas por los ensayos de tensión. En los trabajos de Alihosseini y Khodabakhshi *et al.* [6], [12], [47] se trabajó con aceros de bajo contenido de carbono y se obtuvieron las curvas de flujo de esfuerzo-deformación con diversos ciclos de PRR y PRRC encontrando un decremento aproximado de un 20% en la tenacidad del material a favor de incrementar su resistencia a la tensión. La misma tendencia se da en el trabajo de Morattab *et al.* [48] con una lámina de aluminio puro reduciéndose entre un 30% a un 40% la tenacidad de la lámina con cuatro ciclos de PSR.

Song *et al.* [42] reporta que en materiales deformados mediante procesos de deformación plástica severa aumenta la tenacidad de la aleación, sin embargo en este trabajo de investigación se reporta lo contrario, hay que tener en cuenta que la microestructura no presento un refinamiento apreciable. El tamaño de grano es uno de los principales factores que determinan la unidad de fractura por clivaje, lo que limita la propagación de grietas y aumenta la tenacidad a la fractura [42].

## Conclusiones

1. Se logró añadir el acero microaleado SAJ2340 a la base de datos del software DEFORM 3D, mediante la curva esfuerzo deformación real, determinada vía un ensayo de tensión y con los datos de los coeficientes térmicos tomados de la literatura, lo que permitió llevar a cabo la simulación del proceso PSR mediante el método de elementos finitos.
2. Se llevó a cabo la simulación de 1 y 2 ciclos del proceso PSR mediante el MEF a través del software DEFORM 3D. Dicha simulación permitió optimizar los parámetros del PSR tales como: las cargas necesarias para efectuar las etapas del corrugado y del aplanado con diferentes geometrías ancho-espesor de la lámina, las áreas de contacto durante las etapas de corrugado y aplanado, así como los cambios en el ancho y el espesor de la lámina durante las etapas de corrugado y aplanado.
3. Mediante la simulación se determinó una geometría ancho-espesor de 6 x 128 mm, para que se pudiera realizar dos ciclos de deformación severa mediante PSR, sin exceder la carga máxima de una prensa de 60 toneladas. Además, mediante esta geometría se pudo realizar probetas para las pruebas de tensión, impacto y microdureza con dos ciclos de deformación severa.
4. La simulación permitió determinar la deformación efectiva del proceso PSR, para uno y dos ciclos de deformación severa. Además, la deformación simulada fue mayor a la deformación teórica reportada en la literatura. Tal discrepancia se presupone está asociada a la deformación principalmente a los esfuerzos de corte y adicionalmente a otros esfuerzos que se presentan durante el PSR. De igual manera la simulación permitió determinar que dicha deformación es heterogénea aún después de dos ciclos de PSR.

5. Los resultados de la caracterización microestructural permitieron evidenciar la dirección de flujo plástico de la microestructura de la lámina de acero microaleado con dos ciclos de PSR. Desafortunadamente la resolución de la técnica de microscopía electrónica de barrido no permitió evidenciar un cambio microestructural, además del flujo de los granos. Se presupone que el cambio en la microestructura estaba en una etapa intermedia a la obtención del refinamiento de grano dinámico, lo cual se puede observar el cambio en las propiedades mecánicas evaluadas en la lámina de acero microaleado sometida a dos ciclos de PSR.
  
6. Se comprobó un aumento en la resistencia última a la tensión en un 36% y la microdureza en un 41% de la lámina de acero microaleado deformada severamente mediante dos ciclos de PSR. Por otro lado, bajo la misma condición de deformación severa se observó un decremento en su elongación de un 85% y una reducción en la resistencia al impacto de 61%. Dichos resultados permiten establecer de forma indirecta que la lámina de acero microaleado con una deformación efectiva mayor a 2, aún se encuentra en la etapa de endurecimiento por deformación y no presenta refinamiento microestructural.

---

## Referencias

- [1] R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. G. Langdon, M. J. Zehetbauer, and Y. Zhu, “Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later,” *Jom*, vol. 68, no. 4, pp. 1216–1226, 2016.
- [2] R. Z. Valiev and T. G. Langdon, “Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 51, no. 7, pp. 881–981, 2006.
- [3] A. Gupta, S. M. Tejveer, and S. Singh, “Constrained Groove Pressing for Sheet Metal Processing: A Review,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 84, Sep. 2016.
- [4] R. Z. Valiev and I. V Alexandrov, “Nanostructured from severe plastic materials deformation,” *NanoStructured Mater.*, vol. 12, no. 99, pp. 35–40, 1999.
- [5] R. Valiev, A. I. Pshenichnyuk, and A. A. Nazarov, “Structural model of ultrafine grained materials produced by severe plastic deformation,” *Key Eng. Mater.*, vol. 97–98, pp. 59–64, 1995.
- [6] F. Khodabakhshi, M. Kazeminezhad, and A. H. Kokabi, “Constrained groove pressing of low carbon steel: Nano-structure and mechanical properties,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 16–17, pp. 4043–4049, 2010.
- [7] G. Faraji, H. S. Kim, and H. T. Kashi, *Severe Plastic Deformation: Methods, Processing and Properties*, 1st ed. Matthew Deans, 2018.
- [8] V. M. Segal, “Severe plastic deformation: Simple shear versus pure shear,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 338, no. 1–2, pp. 331–344, 2002.
- [9] D. H. Shin, J. J. Park, Y. S. Kim, and K. T. Park, “Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 328, no. 1, pp. 98–103, 2002.
- [10] J. Zrník, T. Kovarik, Z. Novy, and M. Cieslar, “Ultrafine-grained structure development and deformation behavior of aluminium processed by constrained groove pressing,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 503, no. 1–2, pp. 126–129, 2009.
- [11] M. Borhani and F. Djavanroodi, “Rubber pad-constrained groove pressing process: Experimental and finite element investigation,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 546, pp. 1–7, 2012.

- 
- [12] F. Khodabakhshi, M. Abbaszadeh, H. Eskandari, and S. R. Mohebpour, "Application of CGP-cross route process for microstructure refinement and mechanical properties improvement in steel sheets," *J. Manuf. Process.*, vol. 15, no. 4, pp. 533–541, 2013.
- [13] P. Verleysen and H. Lanjewar, "Dynamic high pressure torsion: A novel technique for dynamic severe plastic deformation," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 276, no. January 2019, p. 116393, 2020.
- [14] R. Valiev, R. Islamgaliev, and I. V Alexandrov, *Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation*, vol. 45, no. 2. 2000.
- [15] Y. Cao, S. Ni, X. Liao, M. Song, and Y. Zhu, "Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 133, no. May, pp. 1–59, 2018.
- [16] R. Sedláček, W. Blum, J. Kratochvíl, and S. Forest, "Subgrain formation during deformation: Physical origin and consequences," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 33, no. 2, pp. 319–327, 2002.
- [17] A. Shirdel, A. Khajeh, and M. M. Moshksar, "Experimental and finite element investigation of semi-constrained groove pressing process," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 2, pp. 946–950, 2010.
- [18] P. M. A. Jiménez, "Capítulo 2. Principios del Método de Análisis por Elementos Finitos y Descripción de ALGOR FEA," *Dep. Ing. Mecánica, Univ. las Américas Puebla, Cholula, Puebla, México*, pp. 19–52, 2004.
- [19] S. S. Rao, "Chapter 1 - Overview of Finite Element Method," in *The Finite Element Method in Engineering*, S. S. B. T.-T. F. E. M. in E. (Sixth E. Rao, Ed. Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 3–52.
- [20] S. S. Rao, "Chapter 2 - Discretization of the Domain," in *The Finite Element Method in Engineering*, S. S. B. T.-T. F. E. M. in E. (Sixth E. Rao, Ed. Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 3–52.
- [21] S. S. Rao, "Chapter 3 - Interpolation Models," in *The Finite Element Method in Engineering*, S. S. B. T.-T. F. E. M. in E. (Sixth E. Rao, Ed. Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 81–127.
- [22] J. M. Vargas Félix, "Cálculo de Estructuras Utilizando Elemento Finito con Cómputo en Paralelo," Centro de Investigación en Matemáticas A.C, 2010.

- [23] T. Gladman, *The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels*, 1st ed. London: Maney for the Institute of Materials, 1997.
- [24] C. I. Garcia, “High strength low alloyed (HSLA) steels,” *Automot. Steels Des. Metall. Process. Appl.*, pp. 145–167, 2016.
- [25] W. B. Morrison, “Microalloy steels – the beginning,” *Mater. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 9, pp. 1066–1073, 2009.
- [26] “SAE J2340 - Categorization and Properties of Dent Resistant, High Strength, and Ultra High Strength Automotive Sheet Steel.” pp. 1–17, 1999.
- [27] ASTM International, “ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials,” *West Conshohocken, Pennsylvania*. pp. 1–27, 2010.
- [28] M. Spittel and T. Spittel, *Metal Forming Data of Ferrous Alloys - deformation behaviour*, 1st ed., vol. 2C1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [29] F. Khodabakhshi, M. Haghshenas, H. Eskandari, and B. Koohbor, “Hardness-strength relationships in fine and ultra-fine grained metals processed through constrained groove pressing,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 636, pp. 331–339, 2015.
- [30] ASTM International, “ASTM E384: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials,” *West Conshohocken, Pennsylvania*. pp. 1–42, 2016.
- [31] JSA Group, “JIS Z 2242 : Method for Charpy pendulum impact test of metallic materials,” vol. 22, no. Reapproved, pp. 5–8, 2018.
- [32] ASTM International, “ASTM E23-07a - Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials,” *West Conshohocken, Pennsylvania*. pp. 1–28, 2003.
- [33] ASTM International, “ASTM E 112-96(2004) Standard Test Methods for Determining Average Grain Size,” *West Conshohocken, Pennsylvania*. pp. 1–26, 2004.
- [34] F. Nazari and M. Honarpisheh, “Analytical model to estimate force of constrained groove pressing process,” *J. Manuf. Process.*, vol. 32, pp. 11–19, 2018.
- [35] H. S. Siddesha, M. Shantharaja, K. Dilipkumar, and C. K. Umesh, “Experimental and Computational Simulation of Producing Ultra-Fine Grain Structure Processed By Cgp,” vol. 8354, no. 4, pp. 21–22, 2015.
- [36] F. Khodabakhshi, M. Abbaszadeh, S. R. Mohebpour, and H. Eskandari, “3D finite

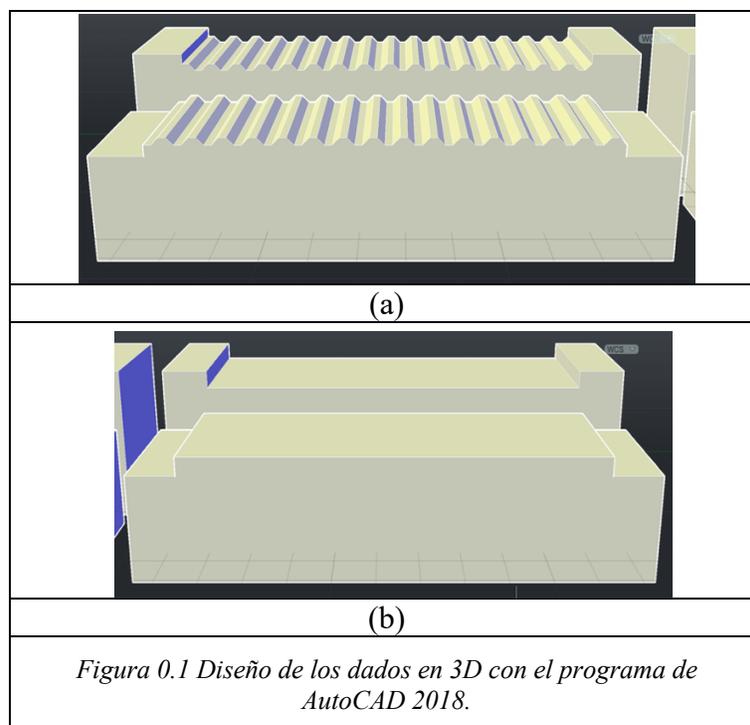
- element analysis and experimental validation of constrained groove pressing-cross route as an SPD process for sheet form metals,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, no. 9–12, pp. 1291–1305, 2014.
- [37] H. Valberg, *Applied metal forming : including FEM analysis*. Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2010.
- [38] K. Hajizadeh, S. Ejtemaei, and B. Eghbali, “Microstructure, hardness homogeneity, and tensile properties of 1050 aluminum processed by constrained groove pressing,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 123, no. 8, pp. 1–9, 2017.
- [39] N. Johnson and P. Sanders, “High strength low alloy (HSLA) aluminum,” *Int. J. Met.*, vol. 6, no. 1, pp. 61–62, 2012.
- [40] G. I. Raab, Y. M. Podrezov, M. I. Danylenko, K. M. Borysovska, G. N. Aleshin, and L. N. Shafigullin, “Dislocation structure evolution during plastic deformation of low-carbon steel,” *Math. Educ.*, vol. 11, no. 6, pp. 1563–1576, 2016.
- [41] E. Bertrand, P. Castany, I. Péron, and T. Gloriant, “Twinning system selection in a metastable  $\beta$ -titanium alloy by Schmid factor analysis,” *Scr. Mater.*, vol. 64, no. 12, pp. 1110–1113, 2011.
- [42] R. Song, D. Ponge, D. Raabe, J. G. Speer, and D. K. Matlock, “Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 441, no. 1–2, pp. 1–17, 2006.
- [43] F. Khodabakhshi and M. Kazeminezhad, “The effect of constrained groove pressing on grain size, dislocation density and electrical resistivity of low carbon steel,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 6, pp. 3280–3286, 2011.
- [44] M. Kazeminezhad and E. Hosseini, “Optimum groove pressing die design to achieve desirable severely plastic deformed sheets,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 94–103, 2010.
- [45] M. Ebrahimi, S. Attarilar, F. Djavanroodi, C. Gode, and H. S. Kim, “Wear properties of brass samples subjected to constrained groove pressing process,” *Mater. Des.*, vol. 63, pp. 531–537, 2014.
- [46] G. G. Niranjana and U. Chakkingal, “Deep drawability of commercial purity aluminum sheets processed by groove pressing,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 11, pp. 1511–1516, 2010.

- [47] H. Alihosseini and K. Dehghani, "Bake hardening of ultra-fine grained low carbon steel produced by constrained groove pressing," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 549, pp. 157–162, 2012.
- [48] S. Morattab, K. Ranjbar, and M. Reihanian, "On the mechanical properties and microstructure of commercially pure Al fabricated by semi-constrained groove pressing," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 22–23, pp. 6912–6918, 2011.

## Apéndice.

- Diseño de los dados

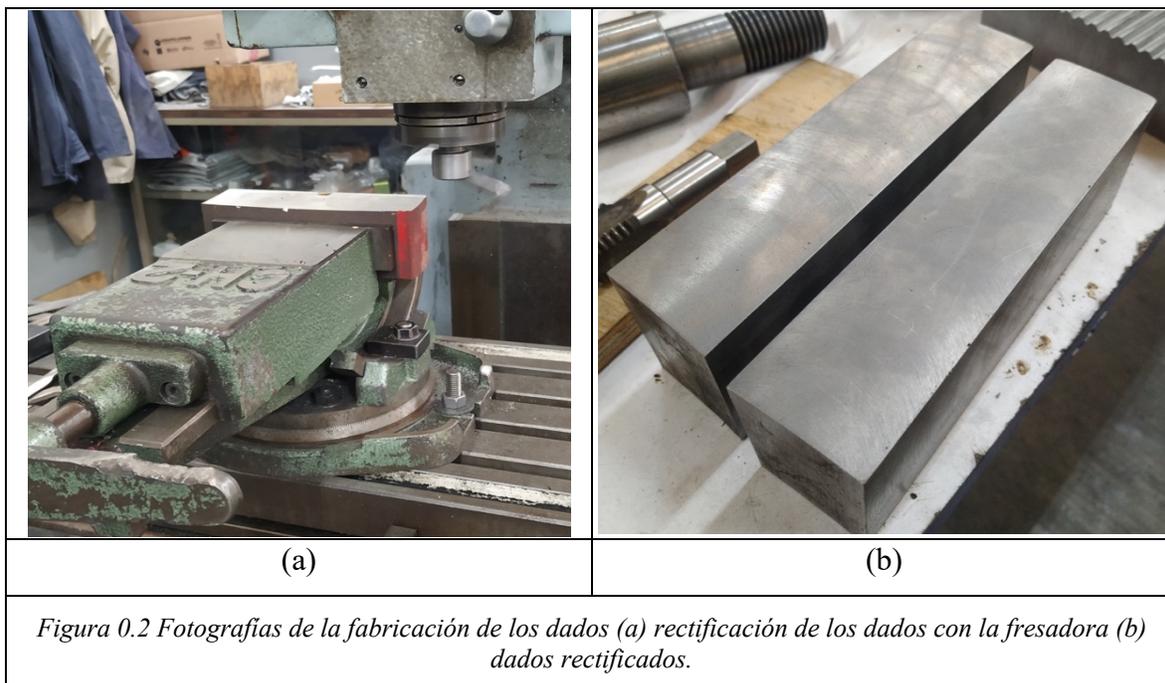
El diseño de los dados se realizó en el programa AutoCAD 2018 en un formato de sólido en 3D, los dados se dibujaron tomando en cuenta el espesor de la lámina y los criterios según la bibliografía consultada [3] para el proceso de prensado semi-restringido. Se diseñaron dos pares de dados, un par de dados corrugados y un par de dados planos como se muestra en la Fig. I.1 (a) y (b), la geometría de los dados esta explicado en el capítulo 2.



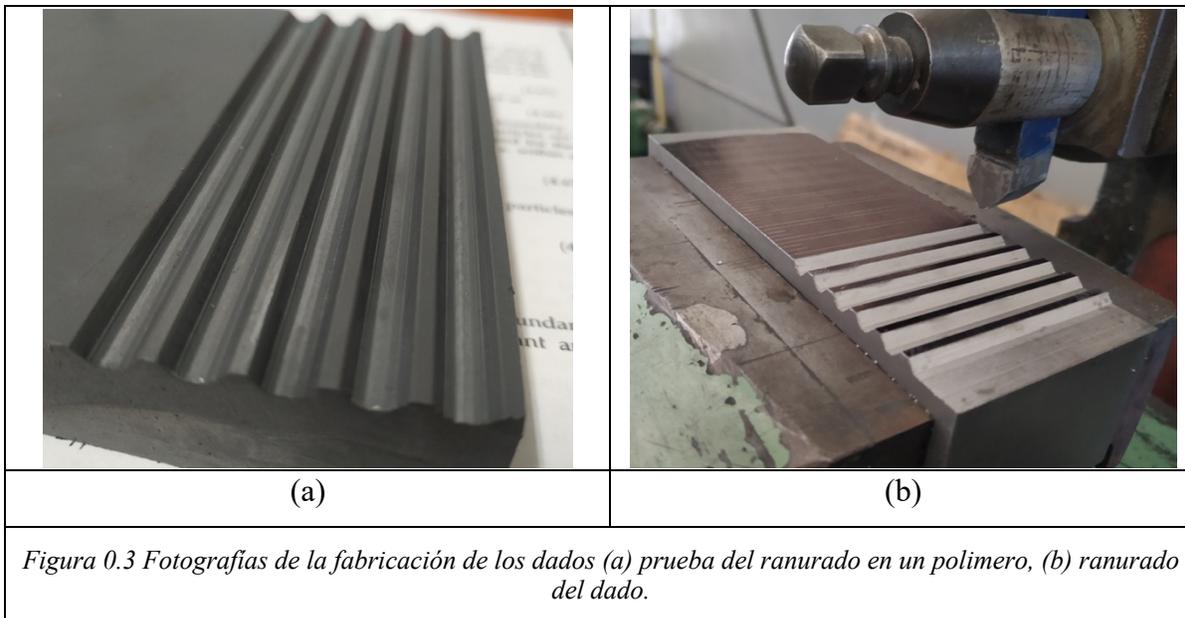
El diseño de los dados y la pieza de trabajo se realizaron en un formato .dwg para posteriormente exportarlo con extensión .stl al programa DEFORM 3D versión 11.1 y así realizar la simulación del proceso de PSR. Posteriormente, se continuará con la sección de fabricación de los dados.

- **Fabricación de los dados.**

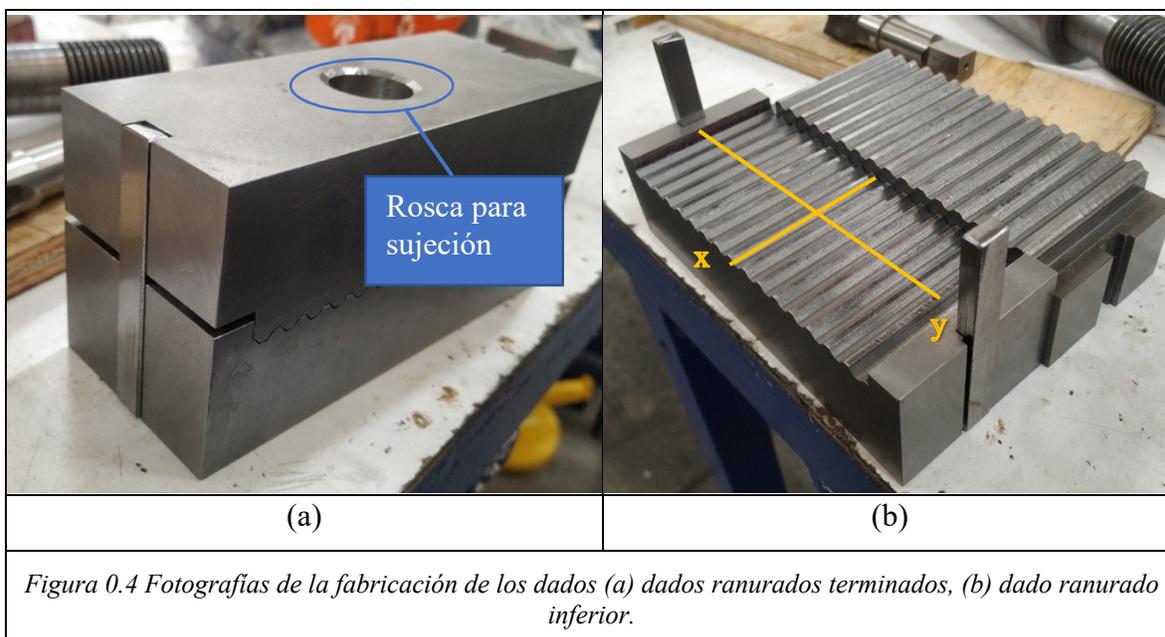
Los dados se fabricaron según el diseño que se usó en las simulaciones realizadas con el programa DEFORM 3D versión 11.1, para la fabricación de los dados se decidió usar un acero D2 grado herramental. El primer paso fue el carear y escuadrar las cuatro piezas de acero D2, para hacer los dos pares de dados (dos dados para el corrugado y dos para el prensado), como se muestra en la Fig. I.2 se muestra el momento en que la fresadora se utilizó para el escuadre de las piezas y el resultado final.



Como segundo paso, se diseñó un herramental especial para fabricar los canales para los dados corrugados, ya que tenía que hacerse con las medidas específicas y a 45° según los diseños que se tomaron en el capítulo 2. En la Fig. I.3 se muestra la prueba que se hizo con un material polimérico para comprobar que la herramienta realizara las corrugas con un ángulo de 45°. En la siguiente etapa se continuo con la fabricación de los dados corrugados en las piezas de acero D2 ya escuadradas, los cuales se maquinaron en la fresadora para generar la sección plana, para posteriormente mediante el uso del cepillo y un cortador con el perfil modificado se pudieran fabricar las corrugas como se muestra en la Fig. I.3.



Después de la fabricación de los dados, se implementó un sistema para la guía y alineación de los dados entre sí, mediante dos postes laterales, los cuales restringen el movimiento lateral del dado para que queden totalmente alineados en el plano xy como se observa en la Fig. I.4 (b). Por otro lado, la forma de sujeción con la máquina de tensión será mediante rosca que se les hizo a los dados superiores con un diámetro de una pulgada mostrado en la Fig. I.4 (a).



El par dados planos (dados que serán usados para el aplanado del material corrugado), fueron fabricados únicamente en la fresadora tomando en cuenta el diseño que se describió en el capítulo 2 (ver Fig. I.5).

