



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería de Materiales

**ESTUDIO DEL LÍMITE DE CONFORMADO EN LAMINACIÓN
CÓNICA CON REDUCCIONES PROGRESIVAS DEL ÁNGULO
DEL MANDRIL EN ALEACIONES DE ALUMINIO**



Memoria

Autor/a: Joel Lafuente Ruiz
Director/a: José María Cabrera
Co-Director/a: Sergio Alberto Elizalde Huitrón
Convocatoria: septiembre 2022

Resumen

En el presente trabajo de final de grado se presenta el estudio realizado sobre el límite de conformado del proceso de laminación cónica cuando se realiza en dos etapas. Los materiales seleccionados para dicho estudio corresponden a dos aleaciones de aluminio (7075 y 6082), que presentan endurecimiento por precipitación (envejecimiento).

El objetivo principal es determinar el ángulo mínimo al cual se puede conformar las aleaciones de aluminio seleccionadas mediante el proceso de laminación cónica, cuando este se realiza en dos etapas. La primera donde se determina el ángulo mínimo con el cual se puede laminar una pieza en una sola pasada, y la segunda donde se parte de una preforma previamente laminada y se le da una segunda pasada con un ángulo menor al ángulo mínimo encontrado en la primera etapa. Así mismo, entre ambas etapas se plantea realizar diferentes tratamientos térmicos para recuperar algo de ductilidad en el material y así facilitar la segunda pasada. De manera complementaria se realizan ensayos de microdureza en diversas etapas del proceso para monitorear la evolución de las propiedades mecánicas.

Con la realización del presente trabajo se encontró que el límite en el proceso de laminación cónica en una sola etapa fue de 11° y 7° para la aleación 7075 y 6082, respectivamente. Mientras que el límite en ambas aleaciones para la laminación cónica en dos etapas fue de 5° . La condición que presentó la mayor dureza en ambas aleaciones fue la laminada en la primera etapa con un ángulo de 15° seguido de un tratamiento térmico de solubilizado, tras el cual se realizó una segunda etapa con 5° y se dejó envejecer naturalmente.

Resum

En aquest treball de final de grau es presenta l'estudi realitzat sobre el límit de conformació del procés de laminació cònica quan aquesta es realitza en dues etapes. Els materials seleccionats per a aquest estudi corresponen a dos aliatges d'alumini (7075 i 6082), que convencionalment endureixen per precipitació ("aging").

L'objectiu principal és determinar l'angle mínim en què es poden conformar els aliatges d'alumini seleccionats mitjançant el procés de laminació cònica, que es planteja dividir en dues etapes. La primera on es determina l'angle mínim amb el que es pot laminar una peça en una sola passada, i la segona on es parteix d'una preforma prèviament laminada i se li dona una segona passada amb un angle menor a l'angle mínim trobat a la primera etapa. Així mateix, entre les dues etapes es planteja realitzar diferents tractaments tèrmics per recuperar una mica de ductilitat en el material i així facilitar la segona passada. De manera complementaria es fan assaigs de microdureza en diverses etapes del procés per monitoritzar l'evolució de les propietats mecàniques.

Amb la realització del present treball es va trobar que el límit en el procés de laminació cònica en una sola etapa va ser de 11° i 7° per a l'aliatge 7075 i 6082, respectivament. Mentre que el límit en tots dos aliatges per a la laminació cònica en dues etapes va ser de 5° . La condició que va presentar la major duresa en els dos aliatges, va ser la laminada a la primera etapa amb un angle de 15° seguit d'un tractament tèrmic de solubilitzat, i a continuació una segona etapa amb 5° just després del solubilitzat i envelliment natural.

Abstract

This final degree thesis presents the study carried out on the forming limit of the two-stage conical rolling process. The materials selected for this study correspond to two aluminium alloys (7075 and 6082), whose main hardening mechanism is aging (Precipitation hardening).

The main objective is to determine the minimum angle at which the selected aluminium alloys can be formed by means of the conical rolling process, which will be divided into two stages. The first stage determines the minimum angle at which a part can be rolled in a single pass, and the second stage starts from a previously rolled preform and gives it a second pass with a smaller angle than the minimum angle found in the first stage. Likewise, between the two stages, different heat treatments are proposed to recover some of the material's ductility and thus facilitate the second pass. In a complementary way, microhardness tests are carried out at different stages of the process to monitor the evolution of the mechanical properties.

With the present work, it was found that the limit in the single-stage conical rolling process was 11° and 7° for the alloy 7075 and 6082, respectively. While the limit in both alloys for two-stage rolling was 5°. The condition with the highest hardness in both alloys was rolled in the first stage at a 15° angle followed by a solubilising heat treatment, then a second stage at 5° just after solubilising and left to age naturally.



Agradecimientos

Primero de todo, agradecer enormemente la ayuda y el apoyo que me han ofrecido mis familiares y mi pareja, ya que la resolución del trabajo no habría sido posible sin su ayuda.

También agradecer a mi Co-Director, Sergio Elizalde, por toda la ayuda y todo el tiempo pasado durante las pruebas de laboratorio. Siempre guiándome hacia el buen camino para la obtención de resultados óptimos.

Además, quería agradecer al Director del trabajo, José María Cabrera, por la oportunidad de poder participar en el proyecto.

Finalmente, agradecer también a la persona que lee mi trabajo y está interesado en las investigaciones y conocimientos logrados durante la resolución de la memoria.

Lista de Figura

Figura 3.1: Esquema de la operación de laminado [3]	6
Figura 3.2: Esquema de la operación de Forjado [4]	6
Figura 3.3: Esquema de la operación de extrusión [5]	7
Figura 3.4: Esquema de la operación de trefilado de alambres y barras [6]	7
Figura 3.5: Esquema de la operación de doblado [7]	8
Figura 3.6: Esquema de la operación de embutido [8]	8
Figura 3.7: Esquema de la operación de Cizallado [9]	9
Figura 3.8 Esquema del proceso de laminación cónica [12]	12
Figura 3.9: Pintura del procedimiento de spinning [16]	13
Figura 3.10: Esquema del funcionamiento del proceso [18]	15
Figura 3.11: Geometrías obtenidas mediante la laminación cónica [13]	16
Figura 3.12: Imagen del funcionamiento básico del sistema de laminación cónica [19]	16
Figura 3.13: Esquema de laminación cónica [21]	19
Figura 3.14: Defectos asociados a la laminación cónica [13]	20
Figura 4.15: Diseño del disco utilizado para la laminación cónica	24
Figura 4.16: Caja de muestras para análisis mediante ensayos de microdureza	25
Figura 4.17: Máquina Struers LaboPress-3	25
Figura 4.18: Imagen de la pulidora Akashi Hardness Testing Machine utilizada	27

Figura 4.19: Máquina de laminación cónica NTR-25 DENN [12]	28
Figura 4.20: Laminación utilizando el mandril con ángulo α y el disco recocido	29
Figura 4.21: Laminación utilizando el mandril con ángulo 5° y el cono laminado con $\alpha = 15^\circ$ como disco	31
Figura 4.22: Horno PXR4/5/9 utilizado para la aplicación de los tratamientos térmicos	34
Figura 4.23: Gráfico representativo del proceso de recocido del Al 7075	35
Figura 4.24: Gráfico representativo del proceso de recocido del Al 6082	35
Figura 4.25: Procedimiento del endurecimiento por precipitación con envejecimiento artificial del Al 7075	37
Figura 4.26: Procedimiento del endurecimiento por precipitación con envejecimiento natural del Al 7075	37
Figura 4.27: Procedimiento del tratamiento de endurecimiento por precipitación del Al 6082 con envejecimiento natural	38
Figura 4.28: Procedimiento del tratamiento de endurecimiento por precipitación del Al 6082 con envejecimiento artificial	38
Figura 4.29: Penetrador y huella de la dureza Vickers [32]	39
Figura 4.30: Huella dejada por el penetrador	40
Figura 4.31: Pieza de Al 6082 laminada con un ángulo de 15°	42
Figura 4.32: Pieza de Al 6082 laminada con un ángulo de 13°	43
Figura 4.33: Pieza de Al 6082 laminada con un ángulo de 11°	44
Figura 4.34: Pieza de Al 6082 laminada con un ángulo de 9°	44

Figura 4.35: Pieza de Al 6082 laminada con un ángulo de 7° _____	44
Figura 4.36: Pieza de Al 6082 re-laminada con un ángulo de 5° _____	45
Figura 4.37: Pieza de AA6082 re-laminada con un ángulo de 5° y aplicado un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación _____	45
Figura 4.38: Pieza de AA7075 laminada con un ángulo de 15° _____	46
Figura 4.39: Pieza de AA7075 laminada con un ángulo de 13° _____	47
Figura 4.40: Pieza de AA7075 laminada con un ángulo de 11° _____	47
Figura 4.41: Pieza de Al 7075 re-laminada con un ángulo de 5° _____	48
Figura 4.42: Pieza de Al 7075 re-laminada con un ángulo de 5° y aplicado un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación _____	48
Figura 4.43: Esquema de la adición de los átomos en la red cristalina del material a deformar [34]	51
Figura 4.44: Gráfico de microdureza de la aleación de Al 7075 _____	52
Figura 4.45: Gráfico de microdureza de la aleación de Al 7075 _____	53
Figura 4.46: Comparativa microdurezas Al 7075 vs Al 6082 _____	54
Figura 4.47: Diagrama de fase de las aleaciones de aluminio [25] _____	55
Figura 5.48: Cubo de reciclaje de piezas fallidas durante los ensayos de laminación cónica _____	56
Figura 5.48: Cubo de reciclaje de piezas fallidas durante los ensayos de laminación cónica _____	56



Lista de Tablas

Tabla 3.1: Ventajas y desventajas del trabajo en frío y en caliente	11
Tabla 3.2: Ventajas y desventajas de la laminación cónica	21
Tabla 4.3: Composición química del Al 7075 [26]	23
Tabla 4.4: Propiedades del Al 7075 [26]	23
Tabla 4.5: Composición química del Al 6082 [27]	24
Tabla 4.6: Propiedades del Al 6082 [27]	24
Tabla 4.7: Programación de la máquina de Struers LaboPress-3	26
Tabla 4.8: Pasos de pulido para la obtención de las muestras	26
Tabla 4.9: Resumen de los parámetros para la primera etapa de laminación del Al 6082-O	30
Tabla 4.10: Resumen de los parámetros para la deformación de Al 6082 deformado con $\alpha = 5^\circ$	31
Tabla 4.11: Resumen de los parámetros para la deformación de Al 7075 deformada con $\alpha = 15^\circ$	32
Tabla 4.12: Resumen de los parámetros para la deformación de Al 7075 deformada con $\alpha = 5^\circ$	33
Tabla 4.13: Índice de abreviaturas para los ensayos de microdureza de las aleaciones de Al	41
Tabla 4.14: Resultado de los espesores del Al 6082 laminado con diferentes ángulos de mandril	43
Tabla 4.15: Cálculo del parámetro de Spinning reduction de la aleación AA6082.	46
Tabla 4.16: Cálculo del parámetro de Spinning reduction de la aleación de Al 7075	49
Tabla 4.17: Resumen de los espesores finales obtenidos de la laminación cónica	49
Tabla 4.18: Resultado del ensayo de microdureza de la Al 7075	52

Tabla 4.19: Resultado del ensayo de microdureza de la Al 6082 53

Tabla 7.20: Presupuesto económico para el Trabajo de Final de Grado 59





Índice

RESUMEN	I
RESUM	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	V
LISTA DE FIGURA	VII
LISTA DE TABLAS	XI
1. PREFACIO	1
1.1. Origen del trabajo.....	1
1.2. Motivación	1
1.3. Requerimientos previos.....	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Objetivos del trabajo	3
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1. Procesos de conformado.....	5
3.1.1. Operaciones Compresivas.....	5
3.1.2. Efecto de la temperatura	9
3.2. Laminación cónica	11
3.2.1. Introducción al proceso	11
3.2.2. ¿Cómo se origina el proceso?	13
3.2.3. Características	15
3.2.4. La mecánica de la laminación cónica	16
3.2.5. Defectos.....	20
3.2.6. Ventajas y desventajas.....	21
4. MARCO PRÁCTICO	22
4.1. Introducción al ensayo	22
4.2. Materiales	22
4.2.1. Material Base.....	22
4.2.2. Diseño del disco	24
4.2.3. Ensayos de microdureza Vickers	25
4.3. Procedimiento experimental.....	28

4.3.1. Proceso de laminación cónica.....	28
4.3.2. Tratamientos térmicos.....	34
4.3.3. Ensayo de microdureza.....	39
4.4. Resultados.....	42
4.4.1. Laminación cónica.....	42
4.4.2. Microdureza Vickers.....	52
ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL	56
CONCLUSIONES	57
PRESUPUESTO Y/O ANÁLISIS ECONÓMICO	59
BIBLIOGRAFÍA	60

1. Prefacio

1.1. Origen del trabajo

El presente trabajo sobre la tecnología de deformación incremental nace de mi inquietud por la investigación dentro del sector de los materiales metálicos. Gracias a la ayuda del Dr. José María Cabrera, se me propone la oportunidad de poder colaborar en un proyecto sobre la laminación cónica del aluminio 6082 y 7075.

1.2. Motivación

Mi principal motivación es la de poder aprender y ganar más experiencia en el sector de los materiales metálicos y así como, poder adquirir habilidades con las máquinas que se me presentan a disposición para realizar el proyecto.

Otra motivación que provoca que realice este trabajo, es la de poder ayudar y descubrir nuevas aplicaciones ligadas a la tecnología de la laminación en frío incremental, ofreciendo una solución para poder deformar un metal dado en condiciones más severas que en aplicaciones convencionales.

1.3. Requerimientos previos

Como requerimientos previos para la correcta elaboración del marco práctico y teórico del trabajo, he repasado los conocimientos enseñados durante las asignaturas de materiales metálicos y metalurgia física. Y el Co-Director del trabajo, Sergio Elizalde, me ha enseñado la programación de la máquina y el uso de la tecnología de laminación cónica.

2. Introducción

Como es bien sabido, los metales han marcado un antes y después en la evolución de la humanidad, ayudando a comprender y transformar el mundo para que las personas tengan la capacidad de poder vivir más cómodamente. Esta transformación es recíproca, ya que, desde tiempos muy anteriores hasta la actualidad, los metales han sido modificados y tratados a voluntad del ser humano.

El conformado por deformación plástica de los metales es uno de los procesos que han ayudado a poder tratar los metales y organizarlos para poder ser útiles en el día a día, llegando a ser uno de los procesos más utilizados.

Los procesos de deformación incremental son un caso particular de los mecanismos de deformación plástica que presenta una gran capacidad de desarrollo dentro del mercado de la metalurgia. Esta familia de procesos se basa en conformar una pieza mediante la aplicación de diversas deformaciones continuas y localizadas.

En esta memoria se presenta el estudio de una de las vertientes de los procesos de deformación incremental, la laminación cónica.

2.1. Objetivos del trabajo

El objetivo principal del presente trabajo es:

Estudiar el límite de conformado en el proceso de laminación cónica en dos etapas para las aleaciones de aluminio 7075 y 6082.

Los objetivos secundarios son los siguientes:

- Determinar el límite de conformabilidad de ambas aleaciones en una sola etapa.
- Encontrar los parámetros de proceso que producen piezas laminadas con el espesor teórico en una sola etapa para diferentes ángulos de mandril.
- Definir las condiciones de los tratamientos térmicos que permiten realizar una segunda pasada a las piezas laminadas previamente y obtener piezas sanas.
- Establecer la configuración de conformado y tratamientos térmicos que mejore el límite de conformabilidad en una segunda etapa.
- Monitorear la dureza de las diferentes configuraciones estudiadas para evaluar la evolución de la propiedad a lo largo del proceso de laminación cónica.



3. Marco teórico

3.1. Procesos de conformado

En muchos procesos de conformado por deformación plástica, para llevar a cabo la obtención de nuevas geometrías, se usa un molde o dado con el cual se aplican tensiones que superan la tensión de cedencia del metal a deformar¹. Así pues, la geometría final de la pieza depende directamente de la del dado utilizado.

La conformabilidad del material depende, entre otros factores, de dos propiedades principales:

- Tensión de cedencia.
- Ductilidad²

Dichos parámetros se ven afectados por la temperatura, haciendo que a medida que la temperatura de trabajo aumenta, la tensión de cedencia disminuye y la ductilidad aumenta [1].

3.1.1. Operaciones Compresivas

Las operaciones de deformación plástica se clasifican en dos grupos: deformación a compresión, y deformación a tracción.

¹ Tensión de cedencia: tensión que al superarse provoca que el material presente una deformación plástica permanente.

² Ductilidad: propiedad que presentan algunos materiales los cuales pueden deformarse plásticamente bajo la acción de una cierta fuerza.

3.1.1.1. Operaciones de deformación a compresión

Son operaciones que se caracterizan por realizar grandes deformaciones y cambios en la geometría de la pieza. Las piezas de trabajo tienen una relación de área de superficie a volumen bajas. Los procesos son [2]:

- Laminado: operación de compresión por la que el espesor es reducido mediante dos rodillos opuestos. En la *Figura 3.1* se presenta un esquema del proceso.

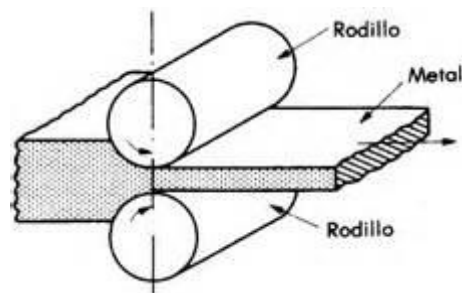


Figura 3.1: Esquema de la operación de laminado [3]

- Forjado: operación de compresión de la pieza entre dos moldes opuestos. La forma del molde determina la de la pieza. Puede ser tanto en trabajo en caliente, como en frío, siendo en caliente el más común. En la *Figura 3.2* se presenta un esquema del proceso.

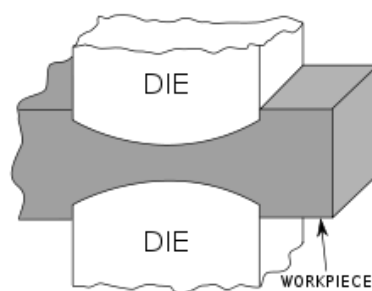


Figura 3.2: Esquema de la operación de Forjado [4]

- Extrusión: Operación de compresión indirecta en el que el metal fluye por una matriz abierta. Obteniendo la geometría de la sección transversal de la matriz. En la *Figura 3.3* se presenta un esquema del proceso.

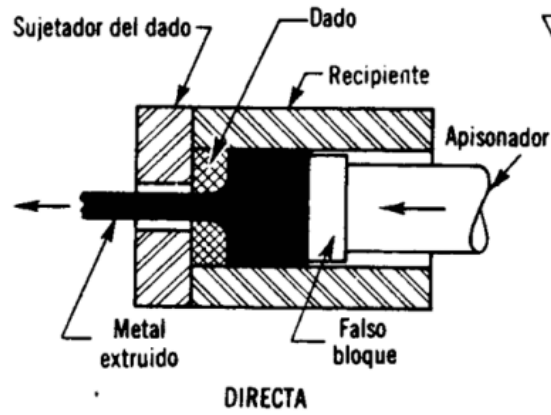


Figura 3.3: Esquema de la operación de extrusión [5]

- Trefilado de alambres y barras: Proceso en el que los alambres y las barras se introducen por una matriz abierta para reducir su sección transversal y aumentar longitud. En la *Figura 3.4* se presenta un esquema del proceso.

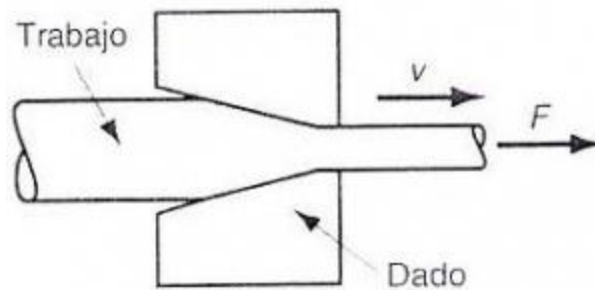


Figura 3.4: Esquema de la operación de trefilado de alambres y barras [6]

3.1.1.2. Operaciones conformado a tracción

Son operaciones realizadas sobre chapas o tubos. A diferencia de las operaciones de deformación compresiva, la relación de área de superficie a volumen es alta.

Normalmente las operaciones se realizan con una prensa. Algunos de los procesos son los siguientes:

- Doblado: deformación del material alrededor de un ángulo específico. No se producen cambios muy severos en el espesor del material. En la *Figura 3.5* se presenta un esquema del proceso.

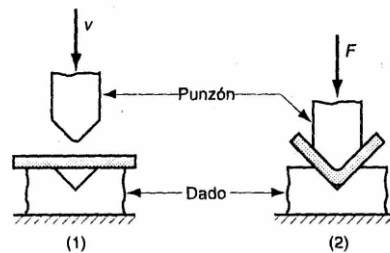


Figura 3.5: Esquema de la operación de doblado [7]

- Embutido: operación en la que se hace presionar el material hacia la cavidad con la ayuda de un punzón, obteniendo la geometría del punzón utilizado. En la *Figura 3.6* se presenta un esquema del proceso.

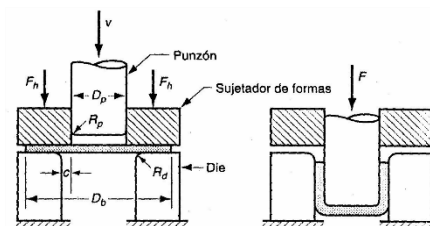


Figura 3.6: Esquema de la operación de embutido [8]

- Cizallado: operación de corte que tiene como objetivo disminuir la lámina mediante dos bordes cortantes. En la *Figura 3.7* se presenta un esquema del proceso.

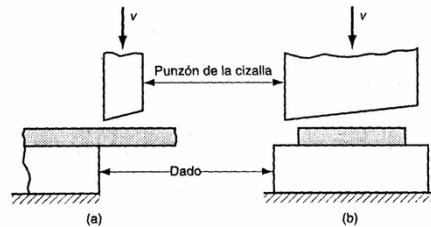


Figura 3.7: Esquema de la operación de Cizallado [9]

3.1.2. Efecto de la temperatura

La temperatura juega un papel crucial durante el procesado de los materiales metálicos, alterando la tensión de fluencia. Este parámetro se define como el valor instantáneo requerido para continuar deformando permanentemente el material.

En la Ecuación 3.1 se expresa la tensión de cedencia como una función de la deformación [10]:

$$Y_f = K \varepsilon^n \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Dónde K es el coeficiente de dureza, ε es la deformación durante el proceso y n es el exponente de endurecimiento por deformación.

A medida que la temperatura de trabajo aumenta, disminuyen los parámetros K y n y se aumenta la ductilidad.

Debido al gran papel que juega, los procesos de conformado de los materiales metálicos se pueden dividir en:

- Trabajo en frío: cuando se trabaja con temperaturas por debajo de la temperatura de recristalización³. El metal deformado plásticamente mediante trabajo en frío genera un aumento de la densidad de dislocaciones⁴ y, por consiguiente, provoca una reducción de la movilidad de las dislocaciones generando un endurecimiento al material.
- Trabajo en caliente: cuando se trabaja con temperaturas superiores a la de recristalización evitando el endurecimiento por deformación, presente en el trabajo en frío, y manteniendo un bajo límite elástico⁵, una baja dureza y una alta ductilidad. El trabajo en caliente permite grandes deformaciones

Las ventajas y desventajas que presentan el tipo de trabajo utilizado se presentan en la *Tabla 3.1* [11].

Trabajo en frío		Trabajo en caliente	
<u>Ventajas</u>	<u>Desventajas</u>	<u>Ventajas</u>	<u>Desventajas</u>
- Posee mejor precisión	- Se precisa de una elevada fuerza para deformar	- Necesita poca fuerza para deformar	- Se precisa de una energía elevada
- Se aumenta la resistencia y la dureza	- Precisa de materiales suficientemente dúctiles	- Puede trabajar con materiales poco dúctiles	- Tiene una precisión más baja que en el trabajo en frío

³ Temperatura de recristalización: temperatura en la que se forman un conjunto de nuevos granos equiaxiales libres de deformación con baja densidad de dislocaciones, que poseen la misma composición y estructura reticular que los granos originales del material.

⁴ Dislocaciones: defectos lineales que provocan una distorsión en la red cristalina.

⁵ Límite elástico: tensión máxima que un material elástico puede aguantar sin recibir deformaciones permanentes.

- No precisa de elevadas temperaturas	- A veces necesita recocidos para permitir una mayor deformación	- La geometría del material se puede modificar	- Vida útil más corta
- Se obtiene un mejor acabado		- No provoca un endurecimiento por deformación elevado durante el proceso	- Provoca oxidación en la superficie de trabajo (mal acabado superficial)

Tabla 3.1: Ventajas y desventajas del trabajo en frío y en caliente

3.2. Laminación cónica

3.2.1. Introducción al proceso

Una vez explicado los procesos de conformado, su principal configuración y las condiciones de trabajo durante los ensayos, se explica en qué consiste el proceso que rige la parte experimental de esta memoria, la laminación cónica.

La laminación cónica es un proceso de deformación incremental que consiste en deformar una pieza plana (normalmente un disco metálico) mediante una rulina que empuja el material contra un mandril giratorio. El proceso es similar al repulsado⁶, pero la diferencia principal es que se busca que el diámetro final de la pieza sea igual al diámetro inicial, esto implica que en la laminación cónica hay una reducción en el espesor que depende del ángulo del mandril [12].

⁶ Repulsado: técnica que consiste en la deformación sobre una matriz simétrica de una lámina metálica que gira a grandes velocidades en un torno.

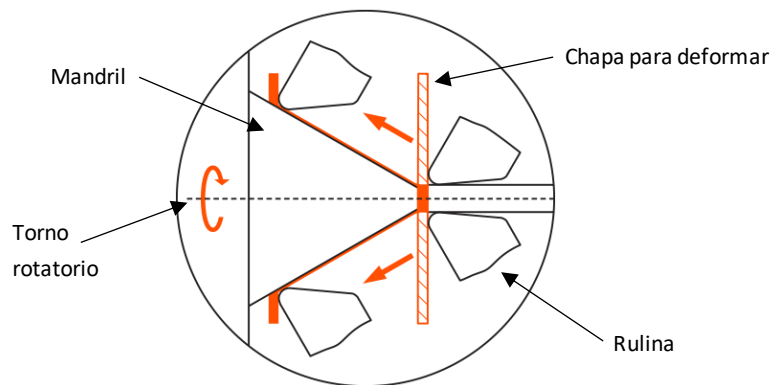


Figura 3.8 Esquema del proceso de laminación cónica [12]

La laminación cónica forma parte de los procesos que tienen como objetivo deformar plásticamente la chapa mediante una herramienta de geometría cónica donde la geometría final se obtiene normalmente mediante una sola pasada siguiendo la trayectoria programada de la rulina.

Actualmente existen diferentes procesos de deformación incremental como pueden ser: repulsado, laminación cilíndrica, forja rotativa, laminación cónica, etc.

Los procesos de deformación incremental se basan en la aplicación de pequeñas deformaciones sobre piezas de metal mediante un mandril rotacional. El disco se lamina sobre el mandril mediante la aplicación de una rulina, obteniendo la pieza deseada en una pasada o en varias [13].

Uno de los hechos que mayormente diferencia los procesos entre sí, es el espesor de la pieza una vez acabado el proceso de laminación. En el caso del repulsado, el espesor final es igual al de la pieza al inicio del ensayo, a diferencia de la tecnología de laminación cónica o cilíndrica.

En el caso de la laminación cónica, la diferenciación viene dada por la reducción del espesor durante el ensayo: Siendo en la laminación cónica por el ángulo del mandril y en la laminación cilíndrica por la longitud final de la pieza de trabajo [13].

La tecnología de deformación incremental incluye una gran variedad de procesos que se difieren entre sí por características geométricas, pero en general el principio de funcionamiento es similar.

Debido a estas pocas diferencias entre los procesos, son muchos los nombres que reciben las tecnologías de la familia de la deformación incremental: "Flow Forming", "Shear Spinning", "Conventional Spinning", "Spinning", etc.

Kalpakjian et al. clasifica la tecnología de laminación cónica dentro de la familia de las operaciones de formado o preformado, es decir, dentro de las operaciones de doblado, cizallando y embutido [14].

Mientras que operaciones como el repulsado, Lange et al. define el ensayo como un proceso de compresión, de la familia del laminado de las operaciones de deformación volumétrica [15].

Para poder entender con claridad los conceptos relacionados con esta tecnología, en esta memoria el proceso de laminación cónica se tomará como parte de la familia de procesos conocidos como: *Flow Forming*, ya que el autor considera que el término del *Flow Forming* engloba todos los conceptos generales de la laminación cónica y cilíndrica.

3.2.2. ¿Cómo se origina el proceso?

Flow Forming deriva de un proceso convencional llamado *spinning* que se originó hace muchos siglos atrás cuando la rueda de alfarero llegó a Egipto. El funcionamiento del proceso era muy sencillo: dos palos de madera colocados horizontalmente de forma de soporte de un husillo y una cuerda enrollada al eje para proporcionar un movimiento en sentido horario o antihorario. La pieza de trabajo se unía al husillo y mientras un operario lo giraba, otro cincelaba la pieza de trabajo cuando rotaba, tal y como se observa en la *Figura 3.9* [16].



Figura 3.9: Pintura del procedimiento de spinning [16]

El husillo se sustituyó por un arco y seguidamente, en la Edad Media, con la invención de la tecnología de trabajo con torno, por un pedal, facilitando la liberación de las manos del operario, la rotación continua del material, el control de la velocidad de rotación y la obtención de piezas más precisas.

En el siglo X, se usó en China como vía para la obtención de recipientes huecos de chapa. Posteriormente llegó a Europa en el siglo XIV y a Estados Unidos a mediados del siglo XIX.

La tecnología primeramente se utilizó exclusivamente para la manufactura de recipientes huecos y productos de casa como tazas, boles, platos. Principalmente estaba destinado al trabajo de materiales de blandos como algunas aleaciones de cobre. Era una tecnología con mucho potencial pero que precisaba de mano de obra muy cualificada [17].

Gracias a la innovación de la maquinaria durante la revolución industrial, se descubrió y se innovó el uso de tornos giratorios motorizados que automatizaron las rotaciones.

Una vez el proceso convencional se estableció en el mercado, debido a la necesidad de trabajo con materiales de espesores mayores, y la falta de suficiente fuerza del operario para deformar el material plásticamente, se introdujo un sistema de rulinas para ayudar en la deformación del material. Y en este periodo de innovación, nace el repulsado, muy parecido al que se conoce en la actualidad.

Con el transcurso del tiempo, este proceso convencional se ha modificado hasta la actualidad y se ha convertido en una base para técnicas de procesos de conformado en frío.

A mediados del siglo XX, debido a la gran demanda de uso y a la necesidad de encontrar mejoras de precisión, mejores acabados y aumento de las propiedades mecánicas de las piezas elaboradas con este tipo de procesos, aparecen nuevas tecnologías en el proceso de *Flow Forming*. La evolución del proceso ocurre gracias a sectores industriales aeroespacial, armamento y defensa y muchas otras aplicaciones industriales que precisaron de esta mejoría.

El proceso se ha visto modificado durante los años, variando los tornos y las mandrinadoras verticales⁷ con controles hidráulicos y electrónicos para concretar en el proceso que actualmente se lleva a cabo.

La rápida comercialización de la tecnología provocó que se originaran muchos diseños y muchos diversos tipos de nombres para un proceso que usa una maquinaria muy similar. Por este motivo, aunque haya muchas vertientes, el término más famoso se conoce como *Flow Forming*.

⁷Mandrinadoras verticales: es una máquina que se utiliza para perforar metales, generalmente hierro o acero. Similares a las fresadoras, donde la pieza se mantiene estacionaria y la herramienta de trabajo gira y deforma.

3.2.3. Características

La laminación cónica es un método de procesamiento de materiales metálicos capaz de transformar chapas en piezas con partes huecas dejando un espesor reducido y con perfiles simétricos.

Las principales aplicaciones de la laminación cónica consisten en la manufactura de utensilios de cocina, industria automovilística, en el sector aeronáutico y aeroespacial.

El funcionamiento del proceso es conceptualmente simple, y se basa en la deformación progresiva de un disco y de la reducción de su espesor mediante la aplicación de una o más rulinas mientras el mandril y el disco rotan. La reducción del espesor viene determinada según el espesor inicial del disco y el ángulo de inclinación del mandril. El espesor final sigue una relación geométrica conocida como la Ley del Seno [18]. El funcionamiento del proceso se observa en la *Figura 3.10*.

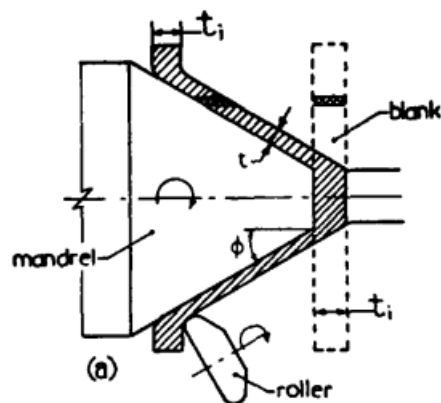


Figura 3.10: Esquema del funcionamiento del proceso [18]

Debido a que en el proceso se mantiene el diámetro de la pieza, la geometría de partida puede ser una chapa con forma circular, cuadrada o mediante una preforma generada por el mismo proceso con un ángulo superior.

Normalmente la pieza se conforma mediante la aplicación de una sola pasada y usando una sola rulina. Aunque para conformar materiales de alta resistencia y con paredes gruesas, es común el uso de dos rulinas desfasadas 180° respecto al eje de giro.

Las piezas que se pueden obtener mediante la laminación cónica generalmente son partes huecas con simetría rotacional. Las geometrías que comúnmente se obtienen incluyen piezas cónicas, cóncavas o convexas (ver figura 3.11).

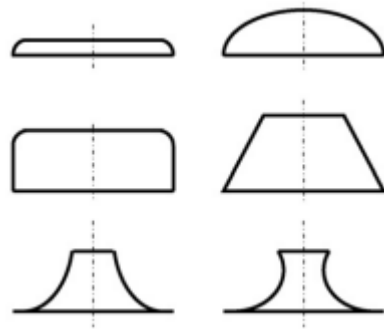


Figura 3.11: Geometrías obtenidas mediante la laminación cónica [13]

3.2.4. La mecánica de la laminación cónica

Para poder entender cómo se obtienen las piezas deseadas en el proceso de la laminación cónica, es importante conocer cómo funciona el sistema y estudiar la parte mecánica del proceso. En la *Figura 3.12* se presenta el esquema básico del funcionamiento del proceso

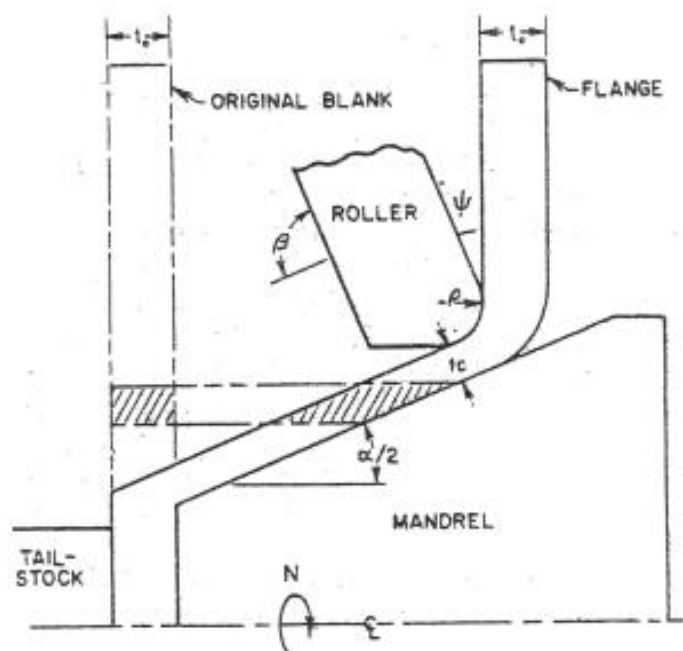


Figura 3.12: Imagen del funcionamiento básico del sistema de laminación cónica [19]

Una chapa de metal con espesor inicial t_0 se coloca a presión entre el mandril y el contrapunto (tailstock en inglés) que tiene un ángulo α . Mediante el movimiento de una rulina⁸, con un radio de acuerdo ρ , el disco es deformado para obtener la geometría cónica del mandril.

La rulina presiona directamente el material sobre la superficie del mandril, y el espesor final deseado se controla dejando un espacio entre la trayectoria de la herramienta y la superficie del mandril. Este espacio se conoce como *Offset*. El offset no se considera como un parámetro de proceso debido a que la máquina tiene deformaciones elásticas, existe cierto grado de desalineación, vibraciones, dilataciones, etc.

La herramienta que realiza la deformación de la chapa se encuentra acoplada a un portarulinas⁹ que posee un ángulo β respecto a la rulina.

Normalmente el radio de la rulina es igual o superior al espesor de la chapa y la velocidad de avance del carro¹⁰ es uno de los parámetros más importantes a la hora de obtener piezas sin defectos.

La velocidad de rotación del disco depende directamente del torno, ya que el material está acoplado por presión a él. Las velocidades de rotación (rpm) pueden llegar a alcanzar pocos centenares de unidad.

Tal y como se observa en la *Figura 3.12* para el espesor final de la pieza laminada t_c se sigue la Ley del Seno (*Ecuación 3.2*), mientras que la parte final de la pieza conocida como brida o pestaña mantiene el espesor original t_0 [17].

$$t_c = t_0 * \sin \alpha \quad \text{(Eq. 3.2)}$$

Con la *Ecuación 3.2* es posible calcular el espesor recomendado en la pieza dependiendo del ángulo del mandril y así poder introducirlo como el offset inicial en la programación del proceso.

⁸Rulina: es la pieza de la laminación cónica que se encarga de la deformación del material. Posee un radio determinado y está anclado al portarulinas.

⁹Portarulinas: maquinaria que hace que avance la herramienta para que se produzca la deformación

Un término muy usado durante el proceso de laminación cónica es “*Spinning reduction*”, que se define como el porcentaje de reducción en el espesor que sufre un material. Este parámetro se observa en la *Ecuación 3.3* [20].

$$\textit{Spinning reduction} = \frac{t_o - t_c}{t_o} * 100 = \left(1 - \frac{t_c}{t_o}\right) * 100 \quad \text{(Eq. 3.3)}$$

Para el cálculo del grado de reducción o *Spinning reduction*, tomando en cuenta que el espesor sigue la Ley del Seno se usa la *Ecuación 3.4* [21].

$$\textit{Spinning reduction} = (1 - \sin(\alpha)) * 100 \quad \text{(Eq. 3.4)}$$

El ángulo de ataque de la rulina (β) se recomienda que sea igual al ángulo del mandril utilizado para realizar un correcto fluido del material. Este hecho es debido a que la chapa al ser deformada plásticamente está sometido a diferentes fuerzas (axial, radial y tangencial) y al igualar el ángulo de ataque de la rulina (β) con el ángulo de inclinación del mandril (α) se busca minimizar las fuerzas de tracción y potencial las fuerzas de compresión.

El hecho de trabajar bajo esfuerzos de compresión facilita la fluidez del material sin llegar a romperlo. El objetivo del proceso es comparable a deslizar cada sección transversal contra el mandril, generando así principalmente esfuerzos cortantes y compresivos. Una analogía para imaginar el proceso sería como deslizar cartas de una baraja sin llegar a tirarlas.

El parámetro de deformación cortante es una magnitud importante a la hora de realizar el proceso de laminado, ya que detalla la relación del cambio en la deformación a su longitud original perpendicular a los ejes de la pieza debido al esfuerzo cortante.

El cálculo de este parámetro se puede observar en la *Ecuación 3.5*, en el caso de que el ángulo de la parte final de la pieza (brida) sea $\theta/2 = 90^\circ$. El ángulo se muestra en la *Figura 3.13* [21].

$$\gamma = \cot(\alpha/2) \quad \text{(Eq. 3.5)}$$

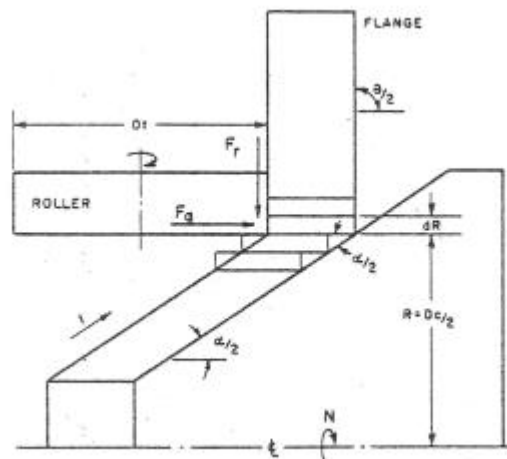


Figura 3.13: Esquema de laminación cónica [21]

Si por consiguiente se parte de una pieza preformada por procesos anteriores y el ángulo θ está entre los $180-0^\circ$, la deformación cortante se puede calcular mediante la Ecuación 3.6.

$$\gamma = \cot(\alpha/2) - \cot(\theta/2) \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Como se ha mencionado anteriormente, en los procesos de conformado la temperatura es un parámetro a tener en cuenta. En el caso de la laminación cónica se trabaja normalmente en frío y ocasionalmente para materiales con baja ductilidad se realiza en caliente.

Una vez explicados los conceptos más importantes del proceso de laminación cónica y presentadas las ecuaciones que rigen la mecánica del mismo, se puede concluir que los parámetros más importantes para obtener una pieza sin defectos que se deben tener en cuenta son: el ángulo del mandril (α), la velocidad de giro del mandril (ω), la velocidad de avance (f), el espesor final, el offset, el ángulo de ataque de la rulina (β) y finalmente, el radio de acuerdo de la rulina (ρ).

3.2.5. Defectos

Los defectos que se pueden presentar en la laminación cónica están asociados al espesor final y su desviación. Los defectos que se asocian al proceso de laminación cónica se caracterizan por arrugas y por flexión de la parte final del material (brida).

Estas desviaciones de la pestaña en la deformación de la pieza se originan debido a que las tensiones internas se limitan a la zona de contacto con la rulina, dejando a la brida totalmente libre de esfuerzos cuando se sigue de cerca la Ley del Seno. Mientras que si existe una desviación provoca que las tensiones internas se extiendan a la brida y generen los defectos observados en la *Figura 3.14* [13].

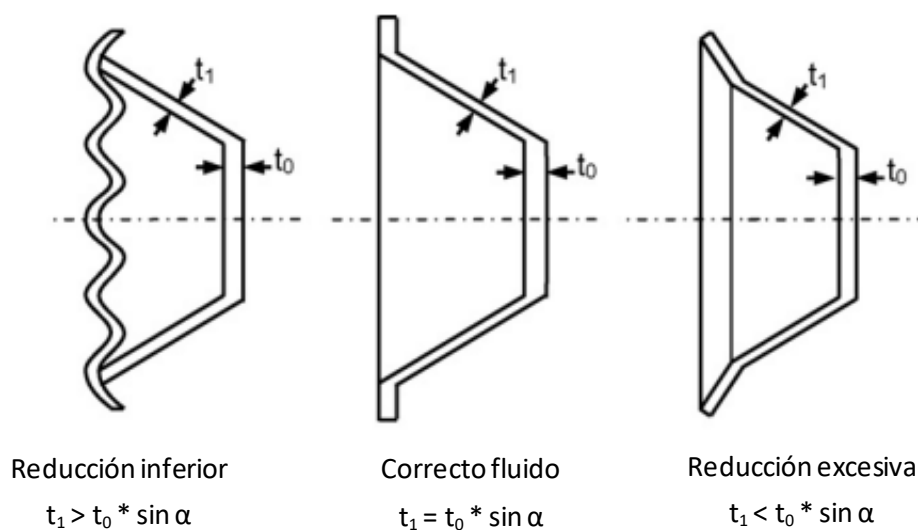


Figura 3.14: Defectos asociados a la laminación cónica [13]

- Reducción inferior ($t_1 > t_0 * \sin \alpha$): el material de la brida tiene la tendencia de meterse hacia dentro, doblando la zona hacia la rulina y causando arrugas.
- Reducción excesiva ($t_1 < t_0 * \sin \alpha$): el material se acumula frente la rulina provocando que la pestaña se doble hacia adelante y se aleje de la rulina.

Kalpakcioglu, S. (1961) define otro defecto ligado a la obtención de la pieza a deformar, en el que determina que el límite teórico de conformado para cualquier material se encuentra en el ángulo de mandril de 15° [22].

3.2.6. Ventajas y desventajas

Las ventajas y desventajas de la laminación cónica se presentan en la *Tabla 3.2* [23] [24].

Ventajas	Desventajas
- Proceso económico: utiliza herramientas básicas, es económico para pequeños lotes. Y no precisa de un uso elevado de energía.	- No es un proceso adecuado para la producción a gran escala.
- Trata formas complicadas: Puede elaborar superficies más complejas que en el proceso de embutición.	- La laminación cónica está limitada a la manufactura de piezas axi-simétricas huecas.
- La pieza final no precisa de un acabado.	- El no correcto fluido del material (no encontrar los parámetros deseados para cumplir la Ley del Seno) puede fomentar la aparición de defectos sobre la superficie de la pieza.
- No se elimina material: con la laminación cónica el material se deforma, no se corta. No hay viruta.	- Es complicado mantener los parámetros deseados para la realización de la pieza, ya que a largo uso el propio movimiento de la maquinaria descalibra la programación y puede llegar a afectar a los valores del espesor y a provocar defectos.
- Aumento de las propiedades mecánicas: con el grado de deformación se aumentan propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, la tensión de cedencia y la dureza.	
- Obtiene piezas muy precisas: si se consiguen los parámetros óptimos para el correcto fluido del material, se pueden conseguir tolerancias $\pm 0,05$ mm.	
- Las fuerzas de proceso son relativamente bajas debido a que la zona de contacto es pequeña en relación con la superficie total de la pieza.	

Tabla 3.2: Ventajas y desventajas de la laminación cónica

4. Marco práctico

4.1. Introducción al ensayo

Como se ha mencionado previamente, las aleaciones de aluminio seleccionadas para el estudio sobre el límite de conformado en el proceso de laminación cónica en dos etapas son la 7075 y la 6082. Dichas aleaciones se recibieron en chapas de 2000 x 1000 x 2 mm y se cortaron con láser 200 discos de 80 mm de diámetro, de cada material.

Para las pruebas de laminación cónica se plantea como punto de partida el determinar el límite de conformado de cada material en una sola pasada, probando mandriles con ángulo de inclinación desde 15° hasta 5°. Una vez determinado el límite de cada material en una sola pasada, se tomará como punto de partida una preforma laminada con 15° y se buscará superar el límite previamente establecido. Entre las dos etapas se propone realizar diferentes tratamientos térmicos para disminuir la acritud del material y así recuperar algo de ductilidad.

Posteriormente se evaluará la evolución las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas y se compararán los resultados obtenidos con los diferentes tratamientos térmicos aplicados entre las dos etapas. Se espera así obtener información valiosa para determinar que ruta de procesamiento es capaz de producir piezas por laminación cónica en dos etapas sin presentar defectos y con las mejores propiedades mecánicas.

4.2. Materiales

4.2.1. Material Base

El material base utilizado para la elaboración del proyecto son las aleaciones de Al 7075 y 6082.

4.2.1.1. Aluminio 7075

El aluminio 7075 es una aleación de forja tratable térmicamente que destaca por sus propiedades mecánicas, siendo sus principales elementos aleantes el Zinc y el Magnesio, elementos característicos de los sistemas de las aleaciones de la serie 7xxx. Esta familia presenta un elevado potencial de endurecimiento por envejecimiento, llegando a alcanzar tensiones máximas mayores a 600 MPa [25].

Gracias a su alta resistencia mecánica y baja densidad, la aleación es comúnmente utilizada en sectores industriales donde la resistencia específica es un parámetro importante. Las aplicaciones de la aleación de aluminio 7075 son muy amplias y extendidas, pero principalmente tiene aplicaciones en las

industrias de la construcción, en moldes de soplado, del sector automovilístico y aeroespacial, entre otros [26].

La composición química del aluminio 7075 se muestra en la *Tabla 4.3*.

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Ga	V	Al
Mínimo	0.10	0.10	1.2	0.05	2.10	5.10	0.15	0.01	0.01	0.01	Resto
Máximo	0.40	0.50	2.0	0.30	2.90	6.10	0.28	0.20	0.05	0.06	Resto

Tabla 4.3: Composición química del Al 7075 [26]

Las propiedades físicas y mecánicas del aluminio 7075-O se presentan en la *Tabla 4.4*

Propiedades Al 7075-O

Densidad (g/cm ³)	2,81
Resistencia máxima (N/mm ²)	225
Límite elástico (N/mm ²)	105
Dureza (HB)	60
Módulo elástico (GPa)	72

Tabla 4.4: Propiedades del Al 7075 [26]

4.2.1.2. Aluminio 6082

El aluminio 6082 es una aleación de forja tratable térmicamente que se caracteriza por su razonable resistencia con un buen comportamiento frente a la corrosión y una excelente capacidad de extrusión. Al ser una aleación endurecible por precipitación, normalmente se emplea en el estado envejecido [27].

La presencia de aleantes de magnesio (Mg) y silicio (Si) provoca un aumento de la resistencia y una disminución de la plasticidad y tenacidad cuando la aleación se encuentra en el estado de máxima resistencia. El principal agente endurecedor son los precipitados de Mg₂Si.

Las principales aplicaciones para la aleación de Al 6082 son: construcciones navales, plataformas marítimas, puentes, estructuras para vehículos, tecnología nuclear, calderería, andamios, tornillería, remache, así como muchas más [27].

La composición química del aluminio 6082 se muestra en la *Tabla 4.5*

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Otros	Al
Mínimo	0.70	0.00	0.00	0.40	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	Resto
Máximo	1.30	0.50	0.10	1.00	1.20	0.20	0.25	0.10	0.15	Resto

Tabla 4.5: Composición química del Al 6082 [27]

Las principales propiedades de la aleación de Al 6082 se muestran en la *Tabla 4.6*.

Propiedades Al 6082

Densidad (g/cm^3)	2,71
Resistencia máxima (N/mm^2)	130
Límite elástico (N/mm^2)	60
Dureza (HB)	35
Módulo elástico (GPa)	70

Tabla 4.6: Propiedades del Al 6082 [27]

4.2.2. Diseño del disco

La pieza inicial a deformar mediante el proceso de laminación cónica posee los mismos parámetros y geometría para las dos aleaciones de aluminio a estudiar. En la *Figura 4.15* se puede observar la preforma cuyas dimensiones son: 80 mm de diámetro y 2 mm de espesor inicial.



Figura 4.15: Diseño del disco utilizado para la laminación cónica

Como condición de partida a ambas aleaciones de aluminio se les aplicó un tratamiento térmico de recocido para partir de la condición de máxima ductilidad. Los detalles del tratamiento térmico de recocido se detallan más adelante.

4.2.3. Ensayos de microdureza Vickers

Para la correcta medición de la microdureza se requiere una preparación previa de las muestras a analizar. La preparación de muestras se divide en las siguientes etapas: laminación cónica, corte, montar en baquelita, desbaste y pulido. El resultado de la preparación de muestras se puede observar en la *Figura 4.16*.



Figura 4.16: Caja de muestras para análisis mediante ensayos de microdureza

El montaje en baquelita se realizó mediante la máquina del fabricante *Struers LaboPress-3* presente en la *Figura 4.17*. La programación de la máquina para su uso se muestra en la *Tabla 4.7*.



Figura 4.17: Máquina Struers LaboPress-3

Fuerza (kN)	Tiempo calentamiento (min)	Tiempo enfriamiento (min)	Temperatura (°C)
30	6	6	180

Tabla 4.7: Programación de la máquina de Struers LaboPress-3

Las condiciones que se siguieron en el proceso de desbaste y pulido durante la preparación de la muestra para el ensayo de dureza se detallan en la *Tabla 4.8*. Las medidas de dureza se llevaron a cabo con un durómetro *Akashi Hardness Testing Machine* que se muestra en la *Figura 4.18*.

Abrasivo	Tiempo de mantenimiento
Papel de lija P600	4 – 5 min
Papel de lija P800	4 – 5 min
Papel de lija P1000	4 – 5 min
Papel de lija P1200	4 – 5 min
Paño de 9 μ m	2 - 3 min
Paño de 6 μ m	2 - 3 min
Paño de 3 μ m	2 - 3 min
Paño de 1 μ m	2 - 3 min

Tabla 4.8: Pasos de pulido para la obtención de las muestras



Figura 4.18: Imagen de la pulidora Akashi Hardness Testing Machine utilizada

La lubricación se realizó mediante agua destilada durante el lijado de las muestras, desde lijas de P400 hasta P1200. Posteriormente se sana la superficie de la muestra con alcohol etílico y se seca mediante aire caliente justo después de cada operación, con la finalidad de obtener una superficie limpia y preparada para el siguiente abrasivo.

En el caso de trabajo con paños, la superficie del paño se moja con agua destilada antes del pulido, para facilitar la distribución de la suspensión de diamante en el paño. A continuación, la pieza se pule mediante la pasta de diamante adecuada; Una vez pulido con el paño, la superficie se sana con alcohol etílico y se seca mediante aire caliente.

4.3. Procedimiento experimental

Durante la ejecución del proyecto se realizan diferentes rutas de proceso para la laminación cónica, que son complementadas por ensayos de microdureza. En los siguientes puntos se detalla el procedimiento experimental que se ha llevado a cabo para la obtención de los resultados.

4.3.1. Proceso de laminación cónica

Las pruebas de laminación cónica se llevaron a cabo en una máquina NTR-25 fabricada por la empresa Industrias Puigjaner S.A (DENN) (Ver *Figura 4.19*). La máquina está equipada con una rulina de 100 mm de diámetro y un radio de acuerdo de 2 mm. Los mandriles empleados para la laminación van desde 15° hasta 5° en decrementos de 2°. Los portarulinas empleados forman un ángulo de 90° respecto a la inclinación de pared de cada mandril utilizado.

La lubricación durante el proceso de laminado se realiza por goteo de aceite. El aceite equipado fue el Bestril-405¹¹ que es el recomendado por el fabricante.

A continuación, se muestran los detalles del proceso que se llevó a cabo para cada aleación.



Figura 4.19: Máquina de laminación cónica NTR-25 DENN [12]

¹¹ Bestril-405: aceite entero para conformado, embutición y estampaciones severas de acero y aceros aleados. 175-195 cSt. 40 °C.

4.3.1.1. Laminación del Al 6082

Para el proceso de laminación cónica de la aleación de aluminio AA6082 se utilizaron discos cuyas dimensiones se muestran en la *Figura 4.15*. La primera etapa del estudio sobre el límite de conformado se realizó mediante diferentes pruebas de laminación. En ellas se fue variando el ángulo de inclinación del mandril desde 15° hasta 5° en decrementos de 2° , hasta encontrar el ángulo más bajo para el cual se puede obtener una pieza sin defectos.

Para cada inclinación de mandril se realizaron distintas pruebas de laminación cónica hasta encontrar los parámetros de proceso que generan una pieza sin defectos. Los parámetros que se varían son: la velocidad de avance (f), velocidad de giro (ω) y *offset*. Mientras que los parámetros que se fijan son: el radio de ataque de la rulina, el ángulo de ataque de la rulina y el espesor inicial (t_0).

La condición de partida del material para todas las pruebas de laminación cónica en la primera etapa fue la de recocido total (6082-O). En la *Figura 4.20* se muestran los diferentes mandriles con los respectivos ángulos de inclinación. Finalmente, en la *Tabla 4.9* se muestran los parámetros empleados para la correcta laminación de la primera etapa de cada mandril.

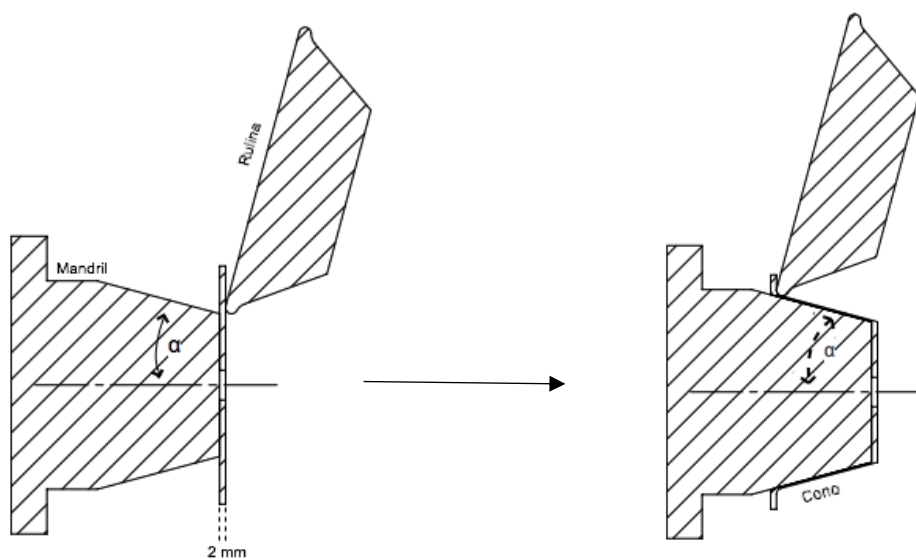


Figura 4.20: Laminación utilizando el mandril con ángulo α y el disco recocido

Parámetros de la primera etapa de laminación cónica del AA 6082-O						
α	t_f (mm)	ω (rpm)	Offset	Radio rulina (mm)	β ángulo de ataque de la rulina	f (mm/rev)
15	0,48	400	0,7	2	15	0,02
13	0,45	400	0,43	2	13	0,01
11	0,38	400	0,3	2	11	0,01
9	0,31	400	0,18	2	9	0,01
7	0,24	400	0,14	2	7	0,01
5	x	400	x	2	5	x

Tabla 4.9: Resumen de los parámetros para la primera etapa de laminación del Al 6082-O

Para la segunda etapa se plantea realizar la laminación cónica con el mandril de 5°, debido a que en la primera etapa se encontró que el límite en una sola pasada es de 7°. Por lo que, para las diferentes configuraciones de la segunda etapa, se toma como punto de partida una preforma laminada con el mandril de 15° y se busca laminar con un ángulo inferior (5°) (ver *Figura 4.21*). Las diferentes configuraciones que se plantean para la segunda etapa son:

1. Recocido – laminación cónica 15° - laminación cónica 5°
2. Recocido – laminación cónica 15° - solubilizado – laminación cónica 5° - envejecido natural
3. Recocido – laminación cónica 15° - solubilizado – laminación cónica 5° - envejecido artificial

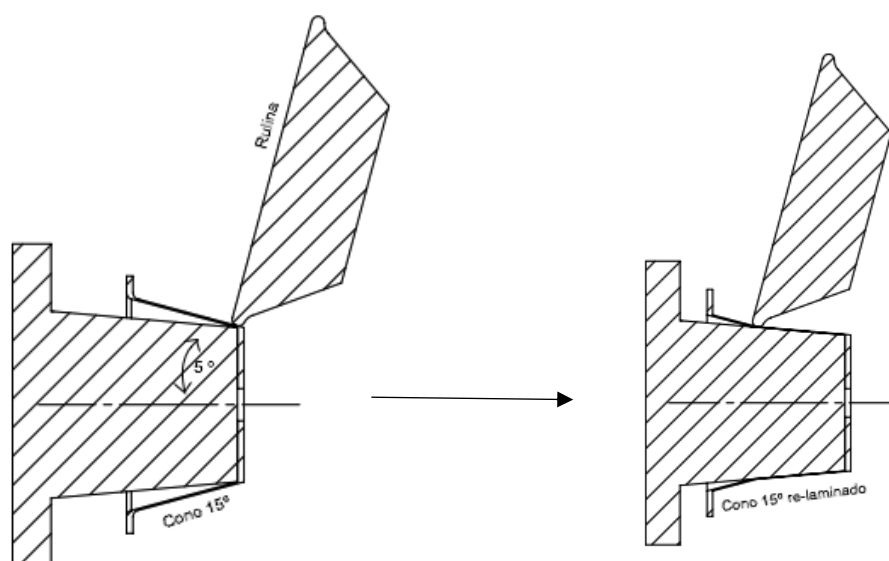


Figura 4.21: Laminación utilizando el mandril con ángulo 5° y el cono laminado con $\alpha = 15^\circ$ como disco

Para la segunda etapa de la laminación cónica a 5° , se realizó el laminado de 30 conos de 15° que posteriormente se emplearon para probar en las diferentes configuraciones mostradas anteriormente. Los parámetros que se encontraron adecuados para cada configuración de la segunda etapa de la laminación se muestran en la *Tabla 4.10*.

Laminado AA 6082 con $\alpha = 5^\circ$							
Configuración	t_f (mm)	ω (rpm)	Offset	Radio rulina (mm)	α mandril	β ángulo de ataque de la rulina	f (mm/rev)
1	0,17	400	0,07	2	5	5	0,01
2	0,17	400	0,1	2	5	5	0,01
3	0,17	400	0,07	2	5	5	0,01

Tabla 4.10: Resumen de los parámetros para la deformación de Al 6082 deformado con $\alpha = 5^\circ$

4.3.1.2. Laminación del Al 7075

Al igual que con la aleación previamente presentada, con la aleación AA7075 se emplearon discos de 80 mm de diámetro por 2 mm de espesor. Así mismo, se siguió la misma metodología empleada para la primera etapa de la laminación cónica que con la aleación AA6082. Así se realizaron diferentes pruebas de laminación cónica para cada mandril (15-5°), hasta encontrar los parámetros que producen piezas sin defectos (ver *Figura 4.20*). En la *Tabla 4.11* se muestran las condiciones empleadas para la correcta laminación en la primera etapa para la aleación AA7075-O. La condición de partida es en estado de recocido total.

Parámetros de la primera etapa de laminación cónica del AA 7075-O							
α	t_f (mm)	ω (rpm)	Offset	Radio rulina (mm)	α mandril	β ángulo de ataque de la rulina	V (mm/rev)
15	0,51	400	0,64	2	15	15	0,03
13	0,21	400	0,1	2	13	13	0,01
11	0,14	400	0,08	2	11	11	0,01
9	x	400	x	2	9	9	x
7	x	400	x	2	7	7	x
5	x	400	x	2	5	5	x

Tabla 4.11: Resumen de los parámetros para la deformación de Al 7075 deformada con $\alpha = 15^\circ$

Para la segunda etapa, se obtienen 40 conos laminados de AA 7075 utilizando el mandril de $\alpha = 15^\circ$. Y se plantea laminar con el mandril de 5° (ver *Figura 4.21*) y en caso de no lograr obtener una pieza laminada con éxito se cambiaría al mandril de 9° . Esto debido a que el límite que se obtuvo en las pruebas de la primera etapa de la laminación fue con el mandril de 11° . Al igual que con la aleación AA 6082 se evaluaron las siguientes configuraciones:

1. Recocido – laminación cónica 15° - laminación cónica 5°
2. Recocido – laminación cónica 15° - solubilizado – laminación cónica 5° - envejecido natural
3. Recocido – laminación cónica 15° - solubilizado – laminación cónica 5° - envejecido artificial

Los parámetros para el correcto laminado de los conos se observan en la *Tabla 4.12*.

Laminado AA 7075 con $\alpha = 5^\circ$							
configuración	t_f (mm)	ω (rpm)	Offset	Radio rulina (mm)	α mandril	β ángulo de ataque de la rulina	V (mm/rev)
1	2	400	0,07	2	5	5	0,01
2	2	400	0,07	2	5	5	0,01
3	2	400	0,07	2	5	5	0,01

Tabla 4.12: Resumen de los parámetros para la deformación de Al 7075 deformada con $\alpha = 5^\circ$

4.3.2. Tratamientos térmicos

Las aleaciones seleccionadas en el presente estudio tienen la característica de que son aleaciones de aluminio endurecibles por precipitación. Este mecanismo de endurecimiento es controlado principalmente mediante tratamientos térmicos, los cuales se realizaron en un horno PXR4/5/9 que se muestra en la *Figura 4.22*.



Figura 4.22: Horno PXR4/5/9 utilizado para la aplicación de los tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos llevados a cabo para las dos aleaciones de aluminio fueron: recocido, solubilizado y envejecido artificial.

4.3.2.1. Recocido

Debido a que el estado de suministro del material de partida es en estado T4 y T6 para las aleaciones 6082 y 7075, respectivamente, se realiza un tratamiento térmico previo de recocido para mejorar la ductilidad del material. El tratamiento térmico de recocido se caracteriza por ser la condición de mayor ductilidad debido a que se liberan las tensiones internas, y el material recristaliza.

4.3.2.1.1 Recocido de la aleación de AA 7075

El tratamiento térmico inicial de recocido de la aleación AA 7075 se realiza de acuerdo con las condiciones especificadas en el manual ASM Handbook vol 4 [28], las cuales se representan mediante la *Figura 4.23*, donde se observan las temperatura y tiempos de mantenimiento de manera grafica.

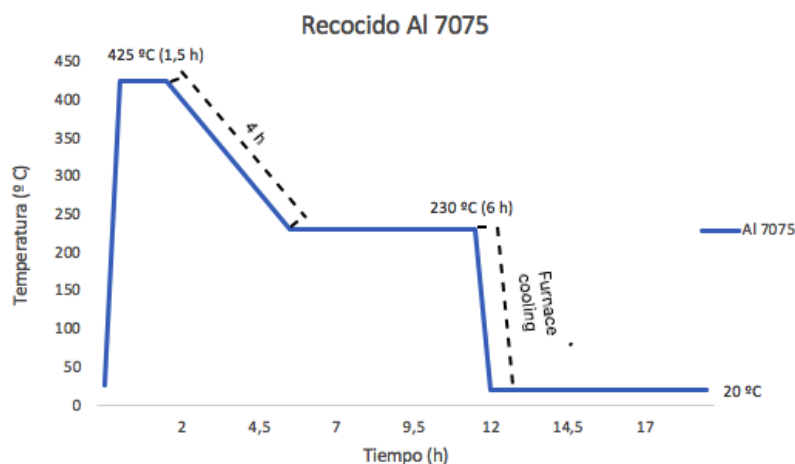


Figura 4.23: Gráfico representativo del proceso de recocido del Al 7075

4.3.2.1.2 Recocido de la aleación de Al 6082:

La realización del tratamiento térmico en la aleación 6082 tiene los mismos objetivos que los de la aleación de Al 7075. El proceso de recocido se muestra en la *Figura 4.24*, dónde se observan las temperaturas de recocido y los tiempos de mantenimiento [28].

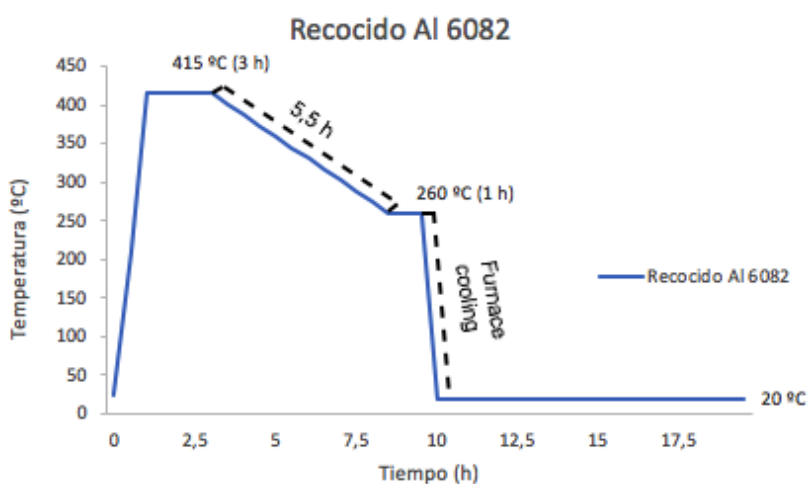


Figura 4.24: Gráfico representativo del proceso de recocido del Al 6082

4.3.2.2. Solubilizado y Envejecido

El proceso de solubilizado y envejecimiento es un tratamiento térmico que se emplea en aleaciones que presentan el mecanismo de endurecimiento por precipitación. Esta combinación de tratamientos térmicos es comúnmente utilizada para el aumento de la dureza, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, tenacidad y resistencia al desgaste de algunos materiales. En el caso del aluminio, las aleaciones que pueden ser tratadas térmicamente son las aleaciones de la serie 2xxx, 6xxx y 7xxx [25].

Para que se pueda realizar el endurecimiento por precipitación, el sistema debe presentar las siguientes características [29]:

- Solubilidad creciente de un soluto o de una segunda fase a medida que la temperatura aumenta.
- Que el material a alta temperatura, donde hay más solutos en solución, puede ser templado. Ya que la solución templada presenta más solutos que en equilibrio.

Las etapas del tratamiento térmico son:

1. Calentamiento de la aleación en la que aumenta la cantidad de soluto en la solución sólida.
2. El endurecimiento se consigue por la precipitación del exceso de soluto o fase en forma de precipitado transitorio, metaestable¹² y coherente¹³. El endurecimiento es debido a la deformación de la red y obstrucción del movimiento de las dislocaciones producido por los precipitados.
3. Para lograr una solución sólida sobresaturada se debe enfriar rápidamente (temple). La velocidad de temple debe ser mayor que la velocidad de enfriamiento crítico¹⁴ para conservar una solución sobresaturada del soluto o fase.

¹² Metaestable: que se encuentra en equilibrio aparente, pero puede cambiar a un estado más estable.

¹³ Coherente: que guarda relación con la matriz.

¹⁴ Enfriamiento crítico: determina la velocidad mínima requerida para conseguir la transformación y que se produzca el templeado correctamente

4.3.2.2.1 Endurecimiento por precipitación del Al 7075

El procedimiento del tratamiento de endurecimiento mediante un envejecimiento artificial se observa en la *Figura 4.25* y el envejecimiento natural en la *Figura 4.26*. El tratamiento térmico se realiza de acuerdo con las condiciones especificadas en el manual ASM Handbook vol 4 [28],

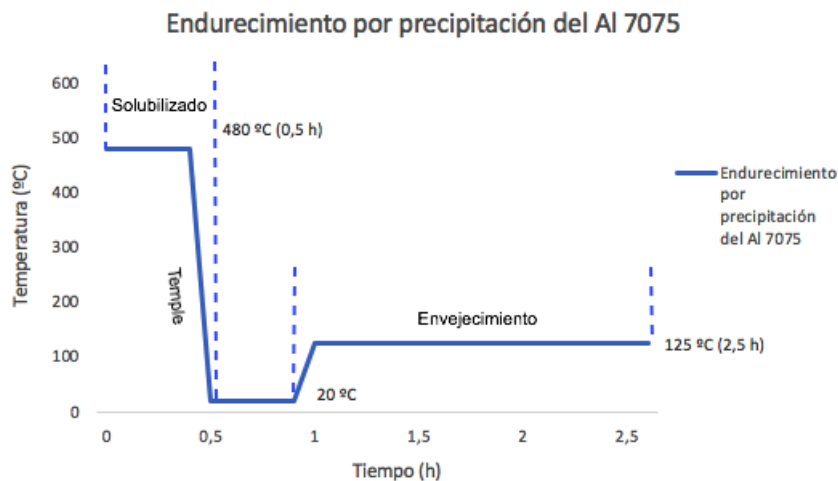


Figura 4.25: Procedimiento del endurecimiento por precipitación con envejecimiento artificial del Al 7075

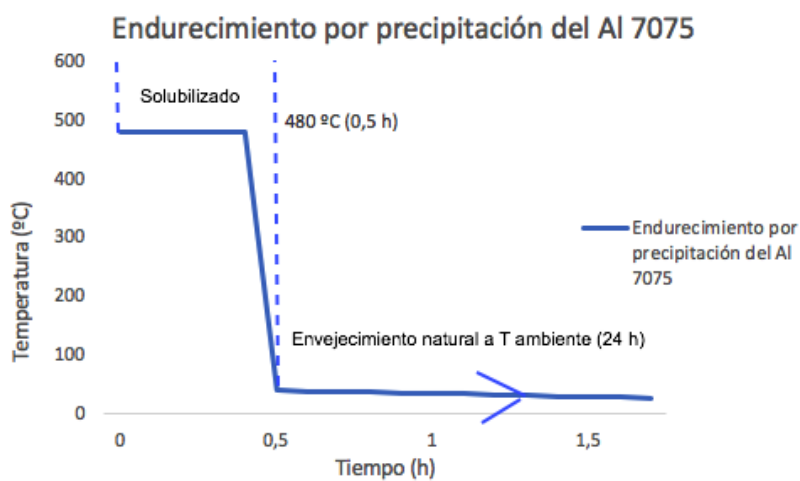


Figura 4.26: Procedimiento del endurecimiento por precipitación con envejecimiento natural del Al 7075

4.3.2.2.2 Endurecimiento por precipitación del Al 6082

El ciclo del tratamiento térmico de endurecimiento natural y artificial se presenta en la *Figura 4.27* y *4.28*, respectivamente [28].

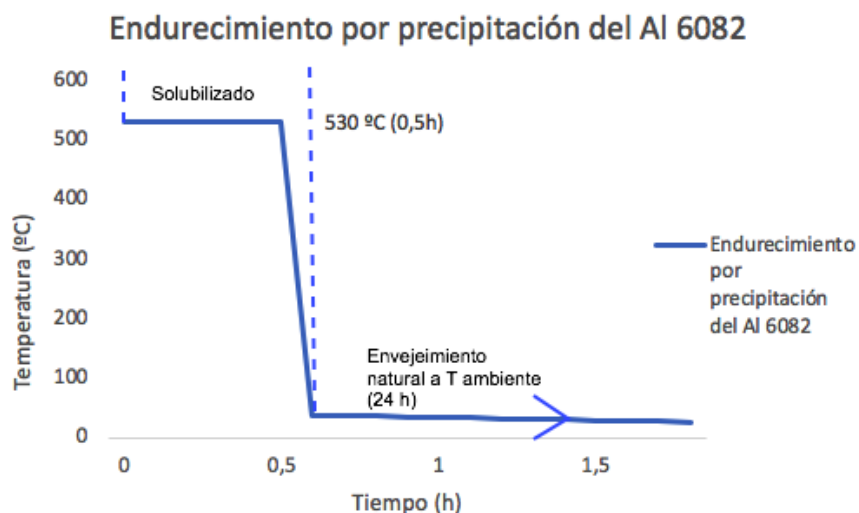


Figura 4.27: Procedimiento del tratamiento de endurecimiento por precipitación del Al 6082 con envejecimiento natural

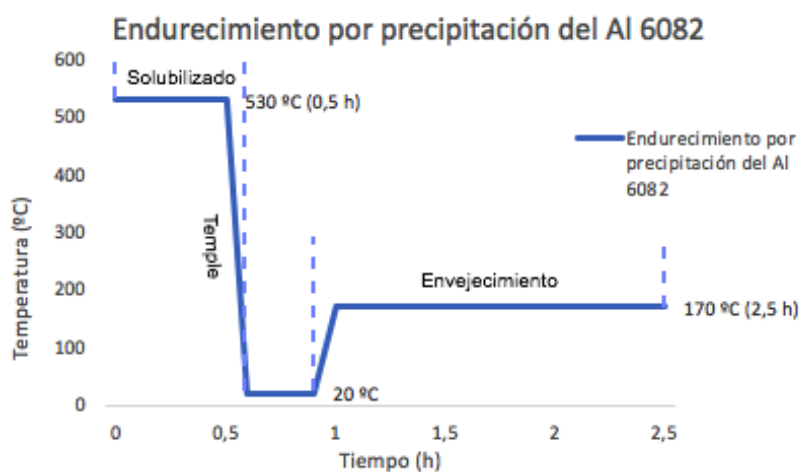


Figura 4.28: Procedimiento del tratamiento de endurecimiento por precipitación del Al 6082 con envejecimiento artificial

4.3.3. Ensayo de microdureza

El ensayo de dureza es uno de los más empleados en la selección y control de calidad de los materiales. Intrínsecamente es una condición de la superficie que no representa ninguna propiedad fundamental del material, pero se evalúa debido a dos factores:

- En los metales, lo más usado es la resistencia a la penetración de una herramienta.
- El ensayo es simple, de alto rendimiento, no se destruye la pieza y es útil para evaluar propiedades de los diferentes componentes microestructurales del material.

El ensayo Vickers es un método común de ensayo utilizado para la caracterización de la dureza de los materiales. Los ensayos son sencillos de realizar, se precisa muy poca cantidad de material y se pueden realizar una gran cantidad de pruebas en la misma muestra [30].

El procedimiento emplea un penetrador de diamante en forma de pirámide de base cuadrada, cuyo ángulo en el vértice es de 136° . El penetrador se aplica perpendicularmente a la superficie que se desea medir bajo la sección de una carga P . La carga se mantiene durante cierto tiempo y se retira para la medición de la huella dejada. El objetivo es determinar la superficie lateral de la huella [31].

En la *Figura 4.29* se representa la huella y el penetrador de la dureza Vickers.

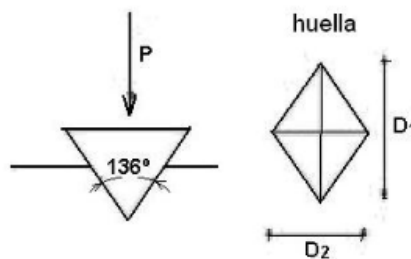


Figura 4.29: Penetrador y huella de la dureza Vickers [32]

Para el cálculo de la dureza de las dos aleaciones de aluminio se aplica la *Ecuación 4.1* [31].

$$H_v = \frac{k \cdot P}{d^2} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Dónde k es una constante que depende de la geometría del penetrador, en este caso $k = 1,854$. P es la masa aplicada (en kg) y d es la media de las longitudes de la huella del penetrador dejada en el material (en mm).

Se analiza la microdureza Vickers para el análisis de la dureza de las dos aleaciones de aluminio, una vez deformado mediante la laminación cónica y aplicado el tratamiento térmico.

Se desarrolla el ensayo de microdureza debido al empleo de materiales con espesores delgados, en la escala de milímetros.

La carga aplicada para la medición de la dureza de las muestras laminadas de las aleaciones de aluminio de 7075 y 6082 fue de 100g con un tiempo de mantenimiento de 15 segundos, con excepción de las muestras laminadas con un mandril de 7 y 5°.

Para la realización del ensayo de dureza de las muestras observadas en la *Figura 4.16*, se utiliza los valores de la *Tabla 4.7* para la preparación de la baquelita y los valores de la *Tabla 4.8* para el pulido de las muestras. Para el desarrollo del experimento se sigue la norma UNE 7-257-72.

En la *Figura 4.30* se observa un ejemplo de la huella de la máquina *Akashi Hardness Testing Machine* dejada por el penetrador durante el ensayo de microdureza Vickers.

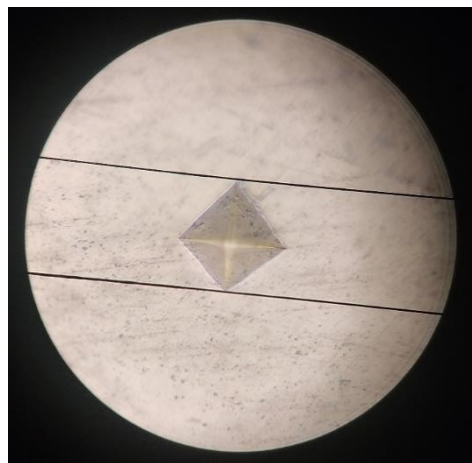


Figura 4.30: Huella dejada por el penetrador

En la *Tabla 4.19* se muestra el índice de abreviaturas para los ensayos de microdureza de las aleaciones de aluminio.

Abreviaturas	Significado
7075-O	Recocido
7075 (15)	Laminado con mandril de 15°
7075 (13)	Laminado con mandril de 13°
7075 (11)	Laminado con mandril de 11°
7075 (5)	Configuración 1
7075 (7)	Configuración 3
7075 (10)	Configuración 2
6082-O	Recocido
6082 (15)	Laminado con mandril de 15°
6082 (13)	Laminado con mandril de 13°
6082 (11)	Laminado con mandril de 11°
6082 (9)	Laminado con mandril de 9°
6082 (7)	Laminado con mandril de 7°
6082 (5 Sin T. T)	Configuración 1
6082 (5 T4)	Configuración 2
6082 (5 T6)	Configuración 3

Tabla 4.13: Índice de abreviaturas para los ensayos de microdureza de las aleaciones de Al

4.4. Resultados

La obtención de resultados de la parte experimental del trabajo se divide en dos apartados: los resultados obtenidos de la laminación cónica y la medida de la evolución de las propiedades mecánicas mediante el ensayo de microdureza Vickers para las diferentes configuraciones.

4.4.1. Laminación cónica

Los datos obtenidos mediante los ensayos experimentales de laminación cónica se dividen en los apartados de resultados de la laminación del Al 6082 y del Al 7075.

4.4.1.1. Resultados del Al 6082

Como se establece en apartado de 4.3.1.1 Laminación del Al 6082 de la memoria, primero, se obtienen los conos de $\alpha = 15^\circ$ mediante los valores detallados en la *Tabla 4.9*, obteniendo un espesor de $t_f = 0,48$ mm.

Mediante la *Ecuación 3.2* se determina que el espesor de acuerdo a la Ley del Seno es de $t_f = 0,51$ mm. La diferencia entre el espesor de la pieza obtenida y el teórico puede ser debido al calibrado de la máquina.

La pieza laminada se presenta en la *Figura 4.31*.



Figura 4.31: Pieza de Al 6082 laminada con un ángulo de 15°

Como se contempla en la *Figura 4.31*, con los parámetros mostrados en la *Tabla 4.9* se obtiene una pieza sin fracturas, sin embargo, se observa acumulación del material antes de llegar a la zona final de la pieza (brida). Esto es debido a que el espesor final es ligeramente menor al establecido por la Ley del Seno. En la práctica el material sobrante se mecaniza y así se obtiene una pieza en buenas condiciones.

Seguidamente, se laminan los discos recocidos mediante los mandriles de $\alpha = 13, 11, 9$ y 7° utilizando los valores de las *Tablas 4.9*, obteniendo los valores de espesor que se muestran en la *Tabla 4.14*.

Ángulo del mandril	Espesor final (mm)	Espesor final teórico (mm)
$\alpha = 13^\circ$	0,33	0,45
$\alpha = 11^\circ$	0,21	0,38
$\alpha = 9^\circ$	0,16	0,31
$\alpha = 7^\circ$	0,09	0,24

Tabla 4.14: Resultado de los espesores del Al 6082 laminado con diferentes ángulos de mandril

El espesor determinado de forma experimental se aleja del teórico calculado mediante la *Ecuación 3.2*, a su vez, provoca la aparición de defectos en los conos laminados con los diferentes ángulos de mandril utilizados. Aun así, no dificulta la obtención de las piezas laminadas, ya que en las *Figuras 4.32, 4.33, 4.34, 4.35* se observa el correcto logro de la totalidad de la pieza.



Figura 4.32: Pieza de Al 6082 laminada con un ángulo de 13°



Figura 4.33: Pieza de Al 6082 laminada con un ángulo de 11°



Figura 4.34: Pieza de Al 6082 laminada con un ángulo de 9°



Figura 4.35: Pieza de Al 6082 laminada con un ángulo de 7°

Se observa en la zona de la brida (ver *Figura 4.32*, *4.33*, *4.34*, *4.35*) un claro ejemplo del defecto mostrado en la *Figura 3.14*, el exceso de reducción. Como se comprueba en la *Tabla 4.14*, el espesor obtenido es menor al teórico, provocando que la pestaña se doble hacia adelante y se aleje de la rulina.

A continuación, se laminan los conos obtenidos por el mandril de $\alpha = 15^\circ$ mediante el ángulo de mandril de $\alpha = 5^\circ$, utilizando los parámetros detallados en la *Tabla 4.10*. Se obtiene un espesor final $t_f = 0,17$ mm, correspondiente al espesor teórico calculado a través de la *Ecuación 3.2*.

La pieza laminada se presenta en la *Figura 4.36*.

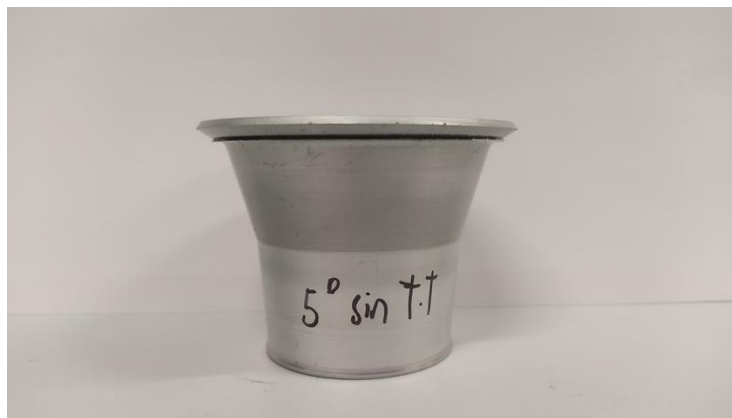


Figura 4.36: Pieza de Al 6082 re-laminada con un ángulo de 5°

Finalmente, el espesor de los conos laminados con mandril de $\alpha = 5^\circ$ y solubilizados coinciden nuevamente con el espesor final teórico $t_f = 0,51$ mm calculado mediante la *Ecuación 3.2*.

En la *Figura 4.37* se observa la pieza laminada con ángulo de mandril $\alpha = 5^\circ$ y con un estado T4 y T6.



a) AA6082 estado T4



b) AA6082 estado T6

Figura 4.37: Pieza de AA6082 re-laminada con un ángulo de 5° y aplicado un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación

El parámetro de *Spinning reduction* calculado mediante la *Ecuación 3.3*, se muestra en la *Tabla 4.15*.

Ángulo del mandril α (°)	Spinning reduction (%)
15	76
13	77,5
11	81
9	84,5
7	88
5	91,5

Tabla 4.15: Cálculo del parámetro de *Spinning reduction* de la aleación AA6082.

4.4.1.2. Resultados del Al 7075

Como se establece en el punto 4.3.1.2 Laminación del Al 7075 del presente documento, primeramente, se obtiene el valor de espesor del cono con ángulo del mandril de 15 ° mediante las magnitudes establecidas en la *Tabla 4.11*.

El cálculo del espesor teórico del cono obtenido mediante el mandril de $\alpha = 15^\circ$ se manifiesta en la *Ecuación 3.2*, obteniendo un valor de $t_f = 0,51$ mm. Mediante la aplicación experimental del ensayo se obtiene un espesor idéntico al teórico.

En la *Figura 4.38* se muestra la pieza en cuestión laminada.



Figura 4.38: Pieza de AA7075 laminada con un ángulo de 15°

Se consigue una buena fluencia del material (ver *Figura 4.38*), aunque aparece el defecto de reducción excesiva en la parte final de la pieza (brida). Este hecho no concuerda con el espesor final obtenido, ya que se obtiene exactamente el teórico.

A continuación, se laminan los discos mediante el ángulo de mandril de 13 y 11°, obteniendo los resultados de espesor final de 0,21 y 0,14 mm respectivamente. Los conos laminados se muestran en las *Figuras 4.39* y *4.40*.



Figura 4.39: Pieza de AA7075 laminada con un ángulo de 13°



Figura 4.40: Pieza de AA7075 laminada con un ángulo de 11°

Como en el caso de la aleación de AA6082, se obtiene el mismo defecto de exceso de reducción asociado al espesor. Provocado por la diferencia de espesor entre el teórico y el obtenido en la práctica.

Una vez los conos de $\alpha = 15^\circ$ son obtenidos, son re-laminados siguiendo los parámetros detallados en la *Tabla 4.12* y mediante el mandril de $\alpha = 5^\circ$, obteniendo un espesor de $t_f = 0,17$ mm.

El espesor obtenido en la laminación coincide con el espesor teórico calculado con la *Ecuación 3.2*. Determinando así que el material presenta una buena respuesta a la fluencia y que es posible la laminación de la aleación utilizando el ángulo del mandril de 5° mediante un cono deformado previamente.

La re-laminación del cono se presenta en la *Figura 4.41*.

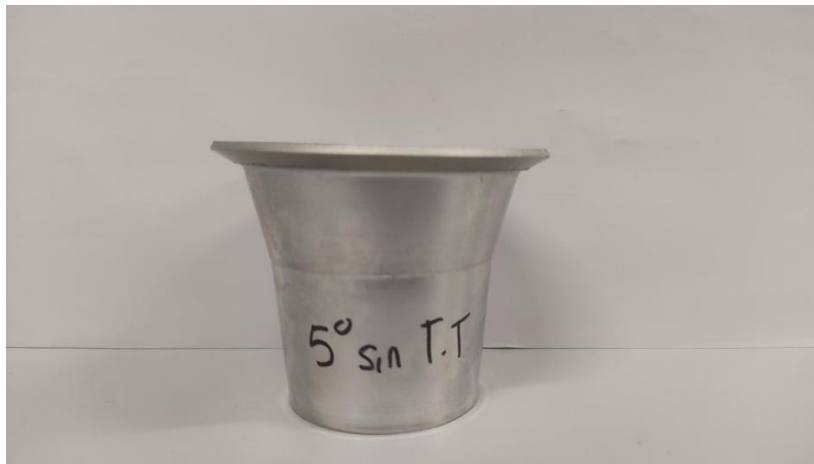
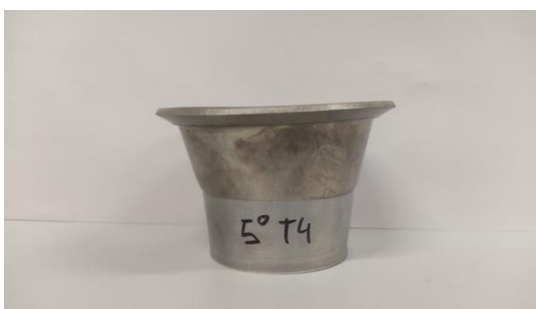


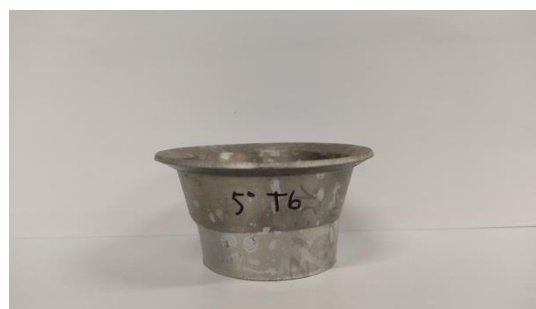
Figura 4.41: Pieza de Al 7075 re-laminada con un ángulo de 5°

Finalmente, mediante el uso del mandril de $\alpha = 5^\circ$, los conos solubilizados y los parámetros de la *Tabla 4.12*, se obtiene un espesor igual al teórico, $t_f = 0,17$ mm.

Las piezas laminadas con $\alpha = 5^\circ$ T4 y $\alpha = 5^\circ$ T6 se presentan en la *Figura 4.42 a)* y *Figura 4.42 b)* respectivamente.



a) Al 7075 estado T4



b) Al 7075 estado T6

Figura 4.42: Pieza de Al 7075 re-laminada con un ángulo de 5° y aplicado un tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación

El parámetro de *Spinning reduction* calculado mediante la Ecuación 3.3, se detalla en la Tabla 4.16.

Ángulo del mandril α (°)	Spinning reduction (%)
15	74,5
13	89,5
11	93
5	91,5

Tabla 4.16: Cálculo del parámetro de *Spinning reduction* de la aleación de Al 7075

Los espesores finales de los materiales utilizados durante el ensayo de laminación cónica, se manifiesta en la Tabla 4.17.

Material laminado	Espesor final (mm)
Al 7075 - $\alpha = 15^\circ$	0,51
Al 7075 - $\alpha = 13^\circ$	0,21
Al 7075 - $\alpha = 11^\circ$	0,14
Al 7075 - $\alpha = 5^\circ$ Sin T. T	0,17
Al 7075 - $\alpha = 5^\circ$	0,17
Al 6082 - $\alpha = 15^\circ$	0,48
Al 6082 - $\alpha = 13^\circ$	0,45
Al 6082 - $\alpha = 11^\circ$	0,38
Al 6082 - $\alpha = 9^\circ$	0,31
Al 6082 - $\alpha = 7^\circ$	0,24
Al 6082 - $\alpha = 5^\circ$ Sin T. T	0,17
Al 6082 - $\alpha = 5^\circ$	0,17

Tabla 4.17: Resumen de los espesores finales obtenidos de la laminación cónica

La obtención del resultado del espesor final t_f del laminado con el mandril de ángulo 5° de las aleaciones de aluminio, no depende del grosor del cono laminado con ángulo de 15° , sino que el parámetro determinante para el cálculo y obtención de el espesor teórico es el espesor inicial $t_0 = 2\text{mm}$ del disco recocido. Tal y como se detalla en la *Ecuación 3.2*.

Por un lado, la pieza inicial recocida no soporta el uso de ángulos de mandril pequeños debido a que tan pronto como se disminuye el ángulo del mandril, aparecen y aumentan la cantidad de combinaciones de esfuerzos de tensión presentes en la zona de flexión¹⁵ de la deformación del material. El material rompe cuando la combinación de tensiones de corte, de doblado y de compresión son demasiadas elevadas como para que el material pueda fluir correctamente. Este fenómeno se manifiesta en la *Tabla 4.14*, donde se observa que a medida que disminuye el ángulo, la obtención de la pieza y del espesor teórico se vuelve más complicado. Para el Al 6082 y del Al 7075, el último ángulo útil para la deformación directa del disco recocido es el de 7° y 11° respectivamente.

Por el otro lado, el hecho de usar conos laminados con anterioridad para la deformación mediante el mandril de ángulo de 5° , se debe a que al estar deformado previamente y por consiguiente, no poseer la zona de flexión propensa a la combinación de esfuerzos, se genere en el material un único trabajo bajo esfuerzos de tensiones compresivas que ayuden y faciliten el correcto fluido de la pieza y la correcta obtención del cono re-laminado.

La aplicación del tratamiento térmico de solubilizado a las aleaciones de aluminio de 7075 y 6082 provoca una disminución de la resistencia del material que, a su vez, provoca un aumento en la ductilidad. Esta disminución de la resistencia de la pieza viene dada por la disolución de los átomos de Mg y Si, en el caso del Al 6082, y Mg, Zn y Cu, en el caso del Al 7075 [33].

Los átomos durante el solubilizado generan pequeñas distorsiones en la red cristalina que dificultan el movimiento de las dislocaciones. Pero, estos mismos átomos no provocan tanta distorsión del campo de la red cristalina como la generada mediante la formación de los precipitados. Por esta característica, el solubilizado disminuye la dureza y disminuye la acritud [34].

En la *Figura 4.43* se observa un esquema de la adición de átomos en la red cristalina del material.

¹⁵ Zona de flexión: primera zona en que la rulina entra en contacto con el disco a deformar.

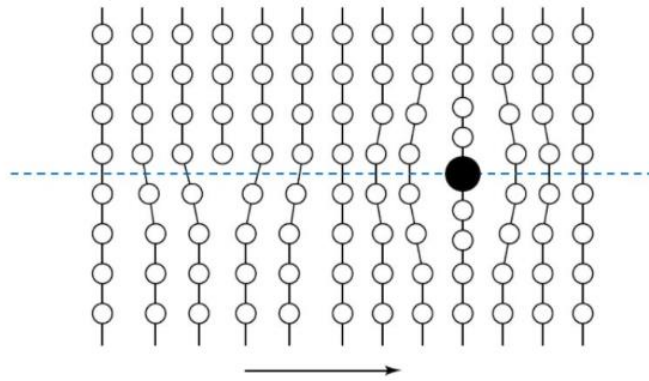


Figura 4.43: Esquema de la adición de los átomos en la red cristalina del material a deformar [34]

4.4.2. Microdureza Vickers

Los resultados del ensayo de microdureza de las aleaciones de Al 7075 y 6082 se presentan en las Figuras 4.44, 4.45 y 4.46.

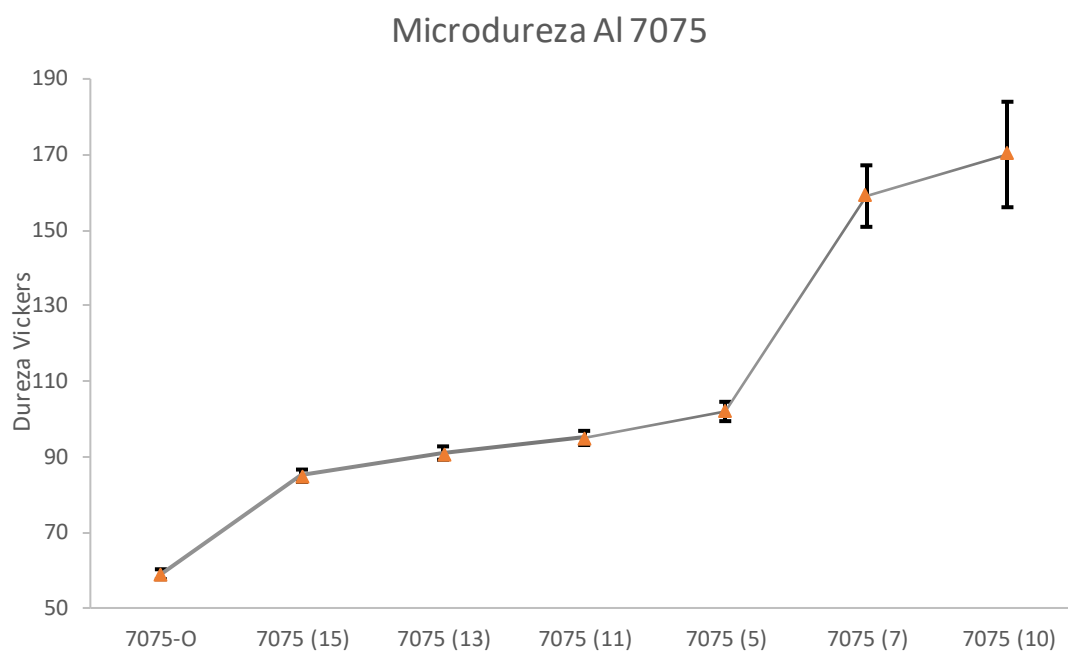


Figura 4.44: Gráfico de microdureza de la aleación de Al 7075

En la *Tabla 4.18* se determina los valores de dureza de la aleación de Al 7075 y los errores.

Muestra	Dureza Vickers	Desviación estándar
7075-O	59 HV 0,1	1,32
7075 (15)	85 HV 0,1	1,63
7075 (13)	91 HV 0,1	1,76
7075 (11)	95 HV 0,1	1,87
7075 (5)	102 HV 0,1	2,55
7075 (7)	159 HV 0,1	8,14
7075 (10)	170 HV 0,1	13,96

Tabla 4.18 : Resultado del ensayo de microdureza de la Al 7075

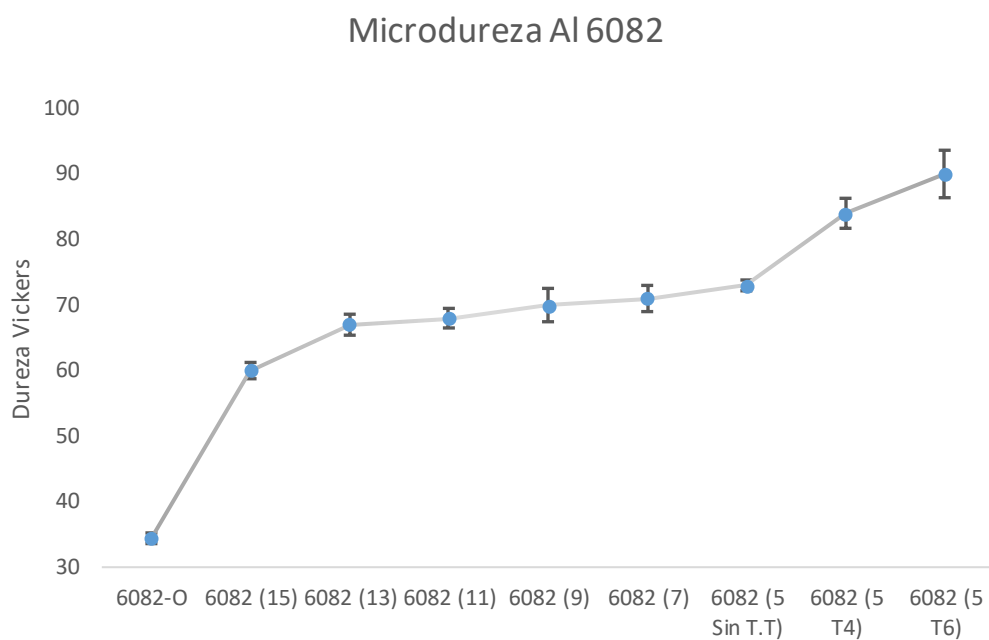


Figura 4.45: Gráfico de microdureza de la aleación de Al 7075

En la *Tabla 4.19* se determina los valores de dureza de la aleación de Al 7075 y los errores.

Muestra	Dureza Vickers	Desviación estándar
6082-O	34 HV 0,1	0,82
6082 (15)	60 HV 0,1	1,24
6082 (13)	67 HV 0,1	1,60
6082 (11)	68 HV 0,1	1,49
6082 (9)	70 HV 0,1	2,55
6082 (7)	71 HV 0,05	2,01
6082 (5 Sin T.T)	73 HV 0,1	0,82
6082 (5 T4)	84 HV 0,1	2,29
6082 (5 T6)	90 HV 0,1	3,62

Tabla 4.19: Resultado del ensayo de microdureza de la Al 6082

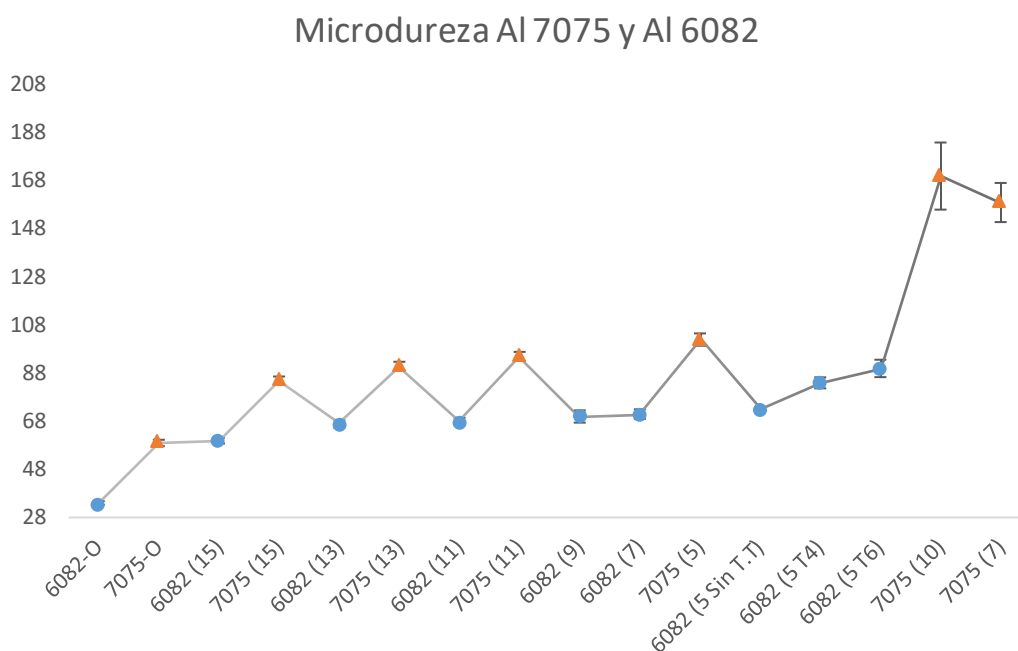


Figura 4.46: Comparativa microdurezas Al 7075 vs Al 6082

El aumento de la dureza de las aleaciones de aluminio viene dado por dos motivos:

- Endurecimiento por deformación: la dureza aumenta al aplicar la deformación en frío del material por medio de la laminación cónica.

En la *Figura 4.46* se observa como la pieza en estado recocido (7075-O o 6082-O) parte de una dureza inicial baja, como el caso de la aleación de Al 6082 (34 HV 0,1). Con la aplicación de la deformación se puede aumentar el valor de dureza, tal y como se observa con el uso del mandril de $\alpha = 7^\circ$ (71 HV 0,05).

La deformación en frío provoca un aumento de las propiedades mecánicas del material, pero disminuye otras propiedades como la ductilidad. Provocado por la adición de dislocaciones que provocan una disminución de la movilidad de estas y así, un endurecimiento.

- Tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación: como se observa en la *Figura 4.47*, en el proceso de solubilizado se tiene como finalidad la obtención de una solución sólida homogénea (fase α) saturada (1).

Posteriormente, se temple (2) con el objetivo de que no se precipite y que se forme una matriz con la fase α metaestable y el intermetálico ϑ .

El envejecimiento (3) provoca que la fase α sobresaturada precipite mediante el uso de temperatura. La formación de precipitados en el interior de la estructura cristalina aumenta las propiedades mecánicas del material, ya que los precipitados forman campos que dificultan el movimiento de las dislocaciones.

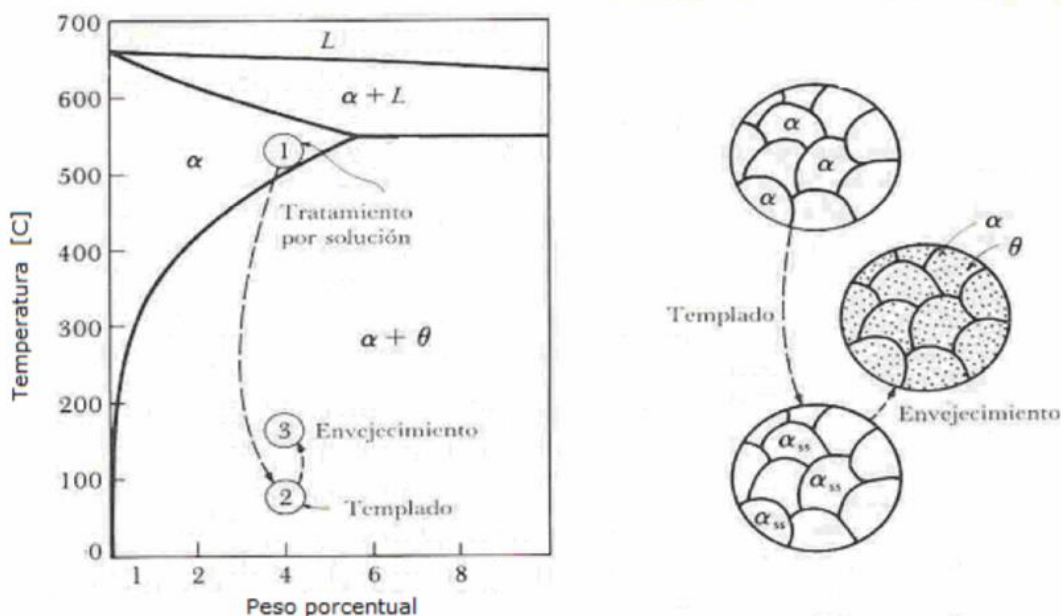


Figura 4.47: Diagrama de fase de las aleaciones de aluminio [25]

En el caso del Al 7075 el principal precipitado que se forma y que endurece el material es el $MgZn_2$. Mientras que para el Al 6082, el principal precipitado que endurece es el Mg_2Si [35].

Análisis del impacto ambiental

Durante el procedimiento de la parte experimental de la memoria se utiliza una gran cantidad de material de las aleaciones de Al 7075 y 6082.

Para evitar problemas de contaminación y con el objetivo de cuidar el medio ambiente, las piezas no resultantes de los ensayos practicados se almacenan en un cubo grande con la finalidad de poder reciclarlo (achatarlo) una vez esté lleno. En la *Figura 5.48* se observa la imagen en cuestión.



Figura 5.48: Cubo de reciclaje de piezas fallidas durante los ensayos de laminación cónica

Conclusiones

Durante la práctica de la memoria se resuelven los objetivos planteados en el informe presentado. El objetivo principal y los secundarios se aclaran en los siguientes puntos:

1. Se estudió el límite de conformado de las aleaciones de Al 7075 y 6082 en la primera etapa y en la segunda. Para la primera etapa, se logró alcanzar partiendo de una condición de recocido un límite de conformado de ángulo de mandril de 7° para el caso de la aleación AA6082 y un límite de conformado de 11° para el caso de la aleación de AA7075. Obteniendo un grado de reducción de 88%, en el caso del ángulo de 11° de la aleación AA6082 y de 93% para el ángulo de 11° de la aleación de AA7075. Estos resultados son determinantes e importantes ya que el límite teórico establecido para cualquier material es el de la deformación mediante el ángulo de mandril de 15° .
Mientras que, para la segunda etapa, se determinó el límite de conformado en 5° para las dos aleaciones de aluminio. Llegando a poder laminar las tres configuraciones planteadas y obteniendo un grado de reducción del 91,5% para las dos aleaciones.
2. Se planteó la ruta de tratamientos térmicos para la facilitación del estudio de la segunda etapa y el aumento de las propiedades mecánicas de los materiales. Se realizó un recocido para aliviar tensiones y homogeneizar, una laminación con el ángulo de mandril de 15° , un solubilizado de los conos para aumentar la ductilidad y facilitar la deformación y un envejecimiento para aumentar las propiedades mecánicas de la aleación.
3. Con la realización de la memoria se definen aspectos a ampliar para el proyecto relacionado con la tecnología estudiada: se debería estudiar los tratamientos térmicos de envejecimiento artificial para el logro de una mejoría en las propiedades mecánicas. Se podría mecanizar un mandril de ángulo más pequeño a 5° para el estudio de la deformación de la pieza en dos etapas. Se tendría que investigar si es posible la obtención en una sola etapa de espesores idénticos al teórico mediante el uso de ángulos de mandril inferiores a 15° .

Presupuesto y/o Análisis Económico

El presupuesto económico utilizado para la elaboración de la memoria práctica del trabajo se detalla en la *Tabla 7.20* [36]. Donde se ha determinado que el coste de servicio del estudiante es de 8€/h.

Descripción	Total horas/unidad	€/unidad	Total (€)
Ensayo de laminación cónica	160	8	1280
Maquinaria DENN (amortización a 5 años)	160	6	960
Preparación muestras	24	8	192
Ensayo de microdureza	8	8	64
Material para laminación cónica	800	2	1600
Redacción del informe	110	8	880
Otros (lijas, baquelita, máquina de corte...)	-	-	800
		Total	5696

Tabla 7.20: Presupuesto económico para el Trabajo de Final de Grado

Bibliografía

- [1] V3, M. (2019, 24 enero). *Trabajo del metal y tipos de conformado*. Metalistería V3. Recuperado 21 de marzo de 2022, de <<https://www.metalisteriav3.es/trabajo-del-metal-tipos-conformado/>> [En línea].
- [2] AGUILAR SCHAFFER, J. *Formado y conformado* [132] Recuperado 21 de marzo de 2022 <http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/5.pdf> [En línea].
- [3] *Proceso De Laminado*. (s.f.). Recuperado 21 de marzo de 2022, de <<https://sites.google.com/site/procesodelaminado/>> [En línea].
- [4] Colaboradores de Wikipedia. (2021, 16 diciembre). *Forjado con dado abierto y con dado cerrado*. Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperado 21 de marzo de 2022, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Forjado_con_dado_abierto_y_con_dado_cerrado> [En línea].
- [5] Extrusión. (s.f.). *CONFORMADO MECANICO DE PIEZAS*. Recuperado 21 de marzo de 2022, de <<https://conformadomecanicodepiezas.weebly.com/extrusioacuten.html>> [En línea].
- [6] *Trefilado - Casiopea*. (s.f.). Recuperado 21 de marzo de 2022, de <<https://wiki.ead.pucv.cl/Trefilado>> [En línea].
- [7] Webmaster, W. (2019, 26 octubre). *Doblado en V y Doblado de Bordes*. Censa Industrial. Recuperado 21 de marzo de 2022, de <<https://censaindustrial.com/doblado-en-v-y-doblado-de-bordes/>> [En línea].
- [8] Melissa, C. Y. (2022, 8 septiembre). *Embutido*. Recuperado 21 de marzo de 2022, de <<http://industrialmaterials20xx.blogspot.com/2013/03/embutido.html>> [En línea].
- [9] Melissa, C. Y. (2022a, septiembre 8). *Cizallado*. Recuperado 21 de marzo de 2022, de <<http://industrialmaterials20xx.blogspot.com/2013/03/cizallado.html>> [En línea].
- [10] [Professor Ravipudi Venkata Rao]. (2020, 7 mayo). *Metal Forming Processes* [Vídeo]. YouTube. Recuperado 23 de marzo de 2022, de <https://www.youtube.com/watch?v=o3kalwbOq1E&ab_channel=ProfessorRavipudiVenkataRao> [En línea].

- [11] López, B. S. (2020, 9 julio). *Procesos de conformado*. Ingeniería Industrial Online. Recuperado 23 de marzo de 2022, de <<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/procesos-industriales/procesos-de-conformado>> [En línea].
- [12] DENN Innovation & Experience in Metalforming (2020). *Laminación cónica*. Recuperado 3 de mayo de <<https://www.denn.es/index.php/es/tecnologias/laminacion-conica>> [En línea].
- [13] Music, O., Allwood, J. M., & Kawai, K. (2010). *A review of the mechanics of metal spinning*. *Journal of materials processing technology*, 210(1), 3-23. Keiser, G (2005). *Fundamentals of Flow Forming*.
- [14] Wang, Q., Wang, T., Wang, Z.R., 1989. *A study of the working force in conventional spinning*. In: *Proceedings of the Fourth International Conference of Rotary Forming*, October 17–21, pp. 103–108.
- [15] Lange, K., 1985. *Handbook of Metal Forming*. SME publications.
- [16] Britain, M. I. (2021, 21 mayo). *A Metal Spinning History. Made in Britain*. Recuperado 13 de junio de 2022, de <<https://www.madeinbritain.org/news/a-metal-spinning-history>> [En línea].
- [17] Keiser, G. *Fundamentals of Flow Forming*. *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME* 91–118 (2016) doi:10.1007/978-981-10-0945-7_4.
- [18] Wang, X. X., Zhan, M., Fu, M. W., Guo, J., Xu, R. Q., & Lei, X. P. (2017). *A unique spinning method for grain refinement: repetitive shear spinning*. *Procedia engineering*, 207, 1725-1730.
- [19] Kalpakcioglu, S. (1961). *On the mechanics of shear spinning*.
- [20] Kalpakcioglu, S. (1961). *A study of shear-spinnability of metals*.
- [21] Ri, U. C., Kye, K. M., & Pak, M. C. (2020). *On the evaluation of spinnability of metallic materials in the powerful spinning process: a review*. arXiv preprint arXiv:2012.01357.
- [22] Kalpakcioglu, S. E. R. O. P. E. (1962). *An application of theory to an engineering problem: power spinning*. In *Proc. 9th. Sagamore AMR Conf* (pp. 71-103).

- [23] Bligh, C. (2020, 14 octubre). *Metal Spinning Advantages and Disadvantages*. Excell Metal Spinning Ltd | ISO 9001:2015 UK Manufacturer. Recuperado 17 de julio de 2022, de <<https://www.excellmetalspinning.com/metal-spinning-advantages-and-disadvantages/>> [En línea].
- [24] M, D. (2016, 23 diciembre). *Spinning of Metals: Process, Advantages and Uses*. Your Article Library. Recuperado 17 de julio de 2022, de <<https://www.yourarticlelibrary.com/metallurgy/spinning-of-metals-process-advantages-and-uses/95525>> [En línea].
- [25] J.M. Cabrera (abril de 2020). *Aluminio*. [75]. Universitat Politècnica de Catalunya. Pág 23-26. Recuperado 16 de agosto de 2022 de <<https://eebe.upc.edu/ca>> [En línea].
- [26] *Chapa 7075 aluminio*. Recuperado 10 de julio de 2022, de <https://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_7075_aluminio.pdf> [En línea].
- [27] *Chapa 6082 aluminio*. Recuperado 10 de julio de 2022, de <https://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_6082_aluminio.pdf> [En línea].
- [28] ASM Handbook Committee (1991). *Heat Treatment*. Volume 4 of the ASM Handbook
- [29] Avila, C. A. B., Cetina, M. S., & Lemus, J. (2010). Influencia del tratamiento térmico de envejecimiento en las propiedades mecánicas de los aluminios 6061 T6 y 6063 T5. *AVANCES: Investigación en Ingeniería*, 1(13), 20-25.
- [30] Schneider, J. M., Bigerelle, M., & Iost, A. (1999). Statistical analysis of the Vickers hardness. *Materials Science and Engineering: A*, 262(1-2), 256-263.
- [31] Federación de Enseñanzas de CC.OO. de Andalucía (mayo de 2011). *Ensayos destructivos Metalúrgicos*. Temas para la Educación. Recuperado el 18 de agosto de 2022 de <<https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8427.pdf>> [En línea].
- [32] Dureza vickers. (s. f.). FullMecanica.com. Recuperado 18 de agosto de 2022, de <<http://www.fullmecanica.com/definiciones/d/1031-dureza-vickers>> [En línea].

- [33] Howard, R., Bogh, N., & MacKenzie, D. S. (2003). Heat treating processes and equipment. Handbook of Aluminum, 1, 881-916
- [34]. Martínez, L. C. (s. f.). Mecanismos de endurecimiento y fallos. Recuperado 20 de agosto de 2022, de <<https://es.slideshare.net/LucasCastro10/mecanismos-de-endurecimiento-y-fallos>> [En línea].
- [35]: MIL-H-6088G (1991). *Military specification: Heat treatment of aluminum alloys*. [S/S by SAE-AMS-H-6088].
- [36] Coyoy Ixquiac, P. S. (2021). Study of shear spinning processing (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).