



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

ESCUELA DE INGENIERÍA AERONÁUTICA

TRABAJO FINAL

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL CONFORMADO PLÁSTICO POR ESTIRADO APLICADO A RECUBRIMIENTOS DE AERONAVES

Autor: Heredia, Aldo Javier

Director UNC: Dr. Walter B. Castelló

Director FAdeA: Ing. Jorge Castagneris

Córdoba, 30 de Octubre de 2015

Intencionalmente en Blanco

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, mis hermanos y especialmente a mi madre por haberme bancado y tenido tanta paciencia a lo largo de todos estos años.

A Celeste por su comprensión, acompañamiento y aceptación.

A mi padre y abuelo, fuentes de inspiración y ejemplos de vida.

A mis compañeros de trabajo y operarios de la fábrica, porque sin su colaboración y aporte no hubiera sido posible realizar este proyecto.

A mis directores por sus correcciones, comentarios y guía.

Y finalmente, a todos aquellos que alguna vez pensaron y me dijeron que no lo lograría, porque sin darse cuenta me dieron fuerzas para continuar en más de una oportunidad....

Javier Heredia

RESUMEN

En la Industria Aeronáutica son muy empleadas las piezas de chapa de grandes dimensiones, como recubrimientos y paneles, que además de servir como cerramiento cumplen una función estructural activa transmitiendo los esfuerzos a que está sujeto un avión durante el vuelo. Por éste motivo los requerimientos sobre éstas piezas no son sólo geométricos sino también mecánicos. Esto representa una limitación en el abanico de posibilidades al momento de seleccionar el proceso de fabricación de una pieza.

*En éste trabajo se mencionan los distintos procesos de conformado para piezas de chapa disponibles actualmente en la industria para luego enfocaremos en uno de ellos, **el conformado por estirado**. El análisis de este proceso surge en respuesta a la necesidad de fabricar piezas como las descritas en este trabajo. El tipo de piezas estudiadas aquí demanda grandes cantidades de materia prima lo que limita la posibilidad de poner a punto el proceso basándose en pruebas y errores debido al costo que esto implica.*

Específicamente, dentro del proceso de conformado por estirado, se identifican las variables y parámetros que intervienen y limitan la fabricación, como las propiedades mecánicas del material, los movimientos relativos entre el molde, la chapa y las mordazas de la prensa, y la fricción en la interface molde-material. Para esto, se hace uso del análisis por elementos finitos.

Para lograr el objetivo se crean los modelos 3D de la prensa empleada y se importan a un software de elementos finitos junto con el modelo constitutivo del material. Mediante el análisis con elementos finitos se reproducen las condiciones relevadas del conformado para verificar el grado precisión del modelo, luego, en el mismo modelo, se simulan diferentes hipótesis de carga combinando cinemáticas de herramental y condiciones de lubricación. Finalmente se muestran los resultados obtenidos al llevar a la práctica las conclusiones extraídas del análisis.

INDICE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA	1
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Procesos de fabricación.	13
1.2. Conformado por estirado.....	15
1.2.1. Conformado por estirado simple.	15
1.2.2. Conformado por estiramiento tangencial.	16
1.2.3. Proceso de conformado Cyril-Bath.	17
1.2.4. Conformado por estiramiento Multi-axial.....	19
1.2.5. Otras técnicas de estirado.	20
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	25
2.1. Casos de estudio.....	25
3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	27
3.1. Procedimiento de caracterización de la aleación de aluminio AA 2524-T3	27
4. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL CONFORMADO POR ESTIRADO.	33
4.1. Metodología empleada.	33
4.2. Relevamiento de datos.....	34
4.3. Tracción con movimiento continuo (Caso 1).	37
4.4. Cinemática relevada, con aceite (Caso 3).....	40
4.5. Cinemática relevada corregida (Casos 4, 5 y 6).	44
4.6. Movimiento continuo (Casos 10, 11 y 12).	48
4.7. Movimiento Sostenido (Casos 13, 14 y 15).	51
4.8. Cinemática de Movimientos Escalonados (Casos 16, 17, 18 y 19).....	53
4.9. Efecto de la cinemática del conformado.	56
5. FUERZA NECESARIA PARA EL CONFORMADO.	60
5.1. Primera aproximación: Tracción simple.	60
5.2. Segunda aproximación: Método ACB, Aerospace Metal Forming ^[16]	60
5.3. Comparación de resultados.	61
6. CONCLUSIONES.....	64

7. REFERENCIAS:67

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Procesos de manufactura según DIN 8580.	13
Figura 2: Procesos de fabricación que utilizan la tecnología de conformado.	14
Figura 3: Procesos de conformado según DIN 8582.	14
Figura 4: Estirado de chapas con molde fijo y mordazas móviles. Ejemplo de pieza conformada por estirado y contorneada.	15
Figura 5: Técnica de estirado simple.	16
Figura 6: Conformado por estiramiento tangencial.	17
Figura 7: Proceso de estirado Cyril-Bath.	18
Figura 8: Conformado por estirado multi-axial.	20
Figura 9: Combinación de estirado y conformado incremental.	21
Figura 10: Principio del conformado por estirado de ciclo corto.	21
Figura 11: Ejemplo de moldes y piezas obtenidas con el SCS.	22
Figura 12: Etapas del proceso SCS.	22
Figura 13: Matriz de conformado por estiramiento multi-punto.	23
Figura 14: Esquema de conformado Multi-punto.	24
Figura 15: Casos de estudio.	26
Figura 16: Capacidad de la prensa empleada.	26
Figura 17: Propiedades mecánicas de la AA 2024.	27
Figura 18: Influencia del estado en el módulo de elasticidad E.	28
Figura 19: Propiedades físicas y mecánicas de la AA2524-T3.	28
Figura 20: Curva Tensión-Deformación de la AA2524-T3 en el MMPDS-01.	29
Figura 21: Digitalización de la curva Tensión-Deformación.	29
Figura 22: Planilla de cálculo de la curva Tensión-Deformación para el aluminio AA2524-T3.	30
Figura 23: Ensayo de tracción virtual.	30
Figura 24: Ensayo de tracción estándar. Nodos analizados.	31
Figura 25: Distribución de tensiones longitudinales en la seccion central de la probeta.	31
Figura 26: Tensiones longitudinales sobre la probeta.	31
Figura 27: Modelo de material vs. datos bibliograficos.	32
Figura 28: Inicio de fluencia en tracción estándar. Diferencias.	32

Figura 29: Condiciones de carga simuladas.	34
Figura 30: Combinación de casos analizados.....	35
Figura 31: Prensa empleada.	35
Figura 32: Método empleado para el relevamiento de datos.....	36
Figura 33: Calibres colocados sobre chapa a conformar.....	36
Figura 34: Pieza A, Caso 1.....	37
Figura 35: Pieza A, Caso 1, Nodos analizados.....	37
Figura 36: Velocidades de carga para tracción por rotación de mordazas.	38
Figura 37: Curva tensión deformación para tracción pura.	39
Figura 38: Detalle del inicio de la fluencia en tracción.....	39
Figura 39: Condiciones de desplazamiento impuestas.....	40
Figura 40: Alargamiento Relevado vs Simulado.....	41
Figura 41: Nodos analizados.	41
Figura 42: Curvas de fluencia obtenidas por relevamiento de datos experimentales.....	42
Figura 43: Representación de las bandas de Lüders en la curva tensión deformación. Aspecto de las bandas de Lüders sobre piezas conformadas por estirado.....	43
Figura 44: a) Efecto PLC sobre la curva de fluencia. b) Bandas PLC sobre una chapa plana después del estirado.	44
Figura 45: Cinemática relevada vs. Cinemática relevada corregida.	44
Figura 46: Cinemática Relevada Corregida, efecto del lubricante.....	45
Figura 47: Cinemática Relevada Corregida. Inicio de la plastificación.....	46
Figura 48: Tensiones actuantes sobre un elemento de chapa en el conformado por estirado.	47
Figura 49: Influencia del radio de curvatura local en las tensiones por flexión.	48
Figura 50: Influencia del radio de curvatura local sobre las tensiones por rozamiento.	48
Figura 51: Cinemática de Movimientos Continuos.....	49
Figura 52: Cinemática de Movimientos Continuos, efecto del lubricante.	50
Figura 53: Cinemática de Movimiento Sostenido.	51
Figura 54: Cinemática de Movimientos Sostenidos, efectos del lubricante.....	52
Figura 55: Cinemática de Elevación Escalonada.	53
Figura 56: Cinemática de Rotación Escalonada.....	53
Figura 57: Elevación Escalonada del molde. Curvas de Fluencia.....	54
Figura 58: Rotación Escalonada. Efecto del Lubricante	55

Figura 59: Conformado con aceite. Influencia de la cinemática	57
Figura 60: Conformado con aceite y silicona. Influencia de la cinemática.....	57
Figura 61: Conformado con aceite. Inicio de la plastificación.....	58
Figura 62: Conformado con aceite y silicona. Inicio de la plastificación.	58
Figura 63: Deformaciones plásticas alcanzables.....	59
Figura 64: Fuerza requerida. Aproximación por tracción simple.....	60
Figura 65: Fuerza requerida. Método ACB, Aerospace Metal Forming.	61
Figura 66: Prensa. Fuerzas de tracción sobre el blank.	62
Figura 67: Recubrimiento conformado.	65

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Influencia del estado en las propiedades mecánicas de la AA 2024.	27
Tabla 2: Variables de control de la prensa.	40
Tabla 3: Coeficientes de fricción (μ) para diferentes aleaciones de aluminio.....	45
Tabla 4: Deformaciones Plásticas. Comparación.....	51
Tabla 5: Dimensiones del blank.	61
Tabla 6: Límites de fluencia y rotura, AA 2524-T3.....	61
Tabla 7: Fuerza de tracción necesaria. Comparación de resultados.	62

ABREVIATURAS Y DEFINICIONES

AA	Aleación de aluminio.
ASTM	Sociedad Americana de Ensayos y Materiales.
FEM	Método de elementos finitos.
SF	Conformando por estirado.
BM	Rotación de la mordaza izquierda.
CM	Rotación de la mordaza derecha.
Z	Elevación de la mesa.
SCS	Conformado por estirado de ciclo corto.
PLC	Efecto Portevin-Le Chatelier.
DSA	Envejecimiento dinámico por tensión.
DRV	Recuperación dinámica.
DRX	Recristalización dinámica.
YS	Tensión de Fluencia.
UTS	Tensión última de tracción o tensión de rotura.
SS	Resistencia al corte.
Blank	Chapa a conformar.
Scrap	Pieza no apta o mal conformada.
AQ	As-Quenched / Como-Templado. Estado térmico de las aleaciones de aluminio que favorece al conformado.
W	Estado térmico o condición de las aleaciones de aluminio inmediatamente posterior al estado AQ. Es una condición inestable durante la cual el material envejece naturalmente.
T3	Estado térmico de las aleaciones de aluminio.
T42	Estado térmico de las aleaciones de aluminio.
ksi	Kilo libra por pulgada cuadrada / kilo pound square inch.
HB	Dureza Brinell.

NOMENCLATURA

μ	Coeficiente de fricción.
σ_y'	Tensión de fluencia aparente.
σ_y	Tensión de fluencia.
σ_u	Tensión de rotura.
σ_t	Tensión de tracción.
σ_b	Tensión por flexión.
σ_r	Tensión de rozamiento.
σ_s	Resistencia al corte.
ε	Deformación.
E	Módulo de elasticidad.
G	Módulo de elasticidad transversal.
ρ	Radio de curvatura del molde.
y	Distancia entre el plano analizado y la fibra neutra.
F	Fuerza.
F_r	Fuerza de rozamiento.
F_v	Fuerza vertical.
N	Componente de la fuerza entre el molde y la chapa normal a la superficie del molde.
l	Ancho del blank.
t	Espesor instantáneo de la chapa.
S	Sección transversal instantánea del blank.

1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presenta la clasificación de los procesos de fabricación de acuerdo con las normas DIN, haciendo foco especialmente en los procesos de conformado de metales según la naturaleza de los esfuerzos intervinientes, para luego desarrollar las distintas alternativas presentes en el conformado por estirado, mostrando sus ventajas y desventajas.

1.1. Procesos de fabricación.

En el momento en que el ingeniero de procesos debe elegir cuál es el proceso más adecuado para la fabricación de una pieza atendiendo a sus especificaciones, se encontrará con un gran abanico de posibilidades. Como lo describe la norma DIN 8580, ver Figura 1, los procesos de fabricación pueden considerarse divididos en seis grandes grupos: Pre-formado, Separación, Unión, Laminado, Modificación de las propiedades de la materia y el Conformado del material.

El *pre-formado* consiste en obtener un cuerpo rígido a partir de un material carente de forma como polvos, líquidos, gases o granulados. Ejemplos: la fundición, el moldeo o el sinterizado.

La *separación* es la producción de una pieza a través de la sustracción de material. En éste caso la forma final está contenida en el material de partida. Ejemplos: torneado, fresado y mecanizados en general.

La *unión* consiste en fabricar una pieza o conjunto mediante la adición de materia a una parte. Ejemplos: soldadura, remachado.

El *laminado* consiste en fabricar piezas aplicando los componentes en capas.

La *modificación de las propiedades del material* tiene por objeto crear una pieza mejorando las propiedades de su materia prima, alterando su estructura molecular. Ejemplos: los tratamientos térmicos.

Finalmente, el *conformado* consiste en producir una pieza modificando plásticamente la materia prima conservando la cantidad de material. Ejemplos: Forja, extrusión, embutizado y el conformado por estirado.

PROCESOS DE MANUFACTURA	PRE-FORMADO
	SEPARACIÓN
	UNIÓN
	LAMINADO
	MODIFICACIÓN DE PROPEDADES
	CONFORMADO

Figura 1: Procesos de manufactura según DIN 8580.

Según la norma DIN 8580 se define el conformado como la tecnología de fabricación que permite obtener piezas por la modificación tridimensional plástica de la forma, sin perdidas de masa ni cohesión. A

diferencia de la deformación, en el conformado la modificación de la forma se realiza con control de la geometría. Los procesos de conformado se clasifican como sin viruta o con remoción de material.

Por su parte, dentro de la fabricación por conformado podemos encontrar una variedad de alternativas dependiendo de la dirección de los esfuerzos intervinientes, como se muestra en la Figura 2. En la práctica éste proceso de fabricación se encuentra combinado con otras alternativas como el corte por láser, la unión por conformado o la fundición.

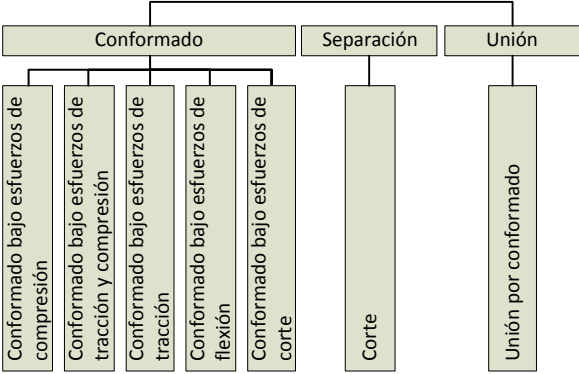


Figura 2: Procesos de fabricación que utilizan la tecnología de conformado.

Conforme lo presenta la norma DIN 8582, los procesos de conformado pueden a su vez considerarse clasificados como se muestra en la Figura 3.

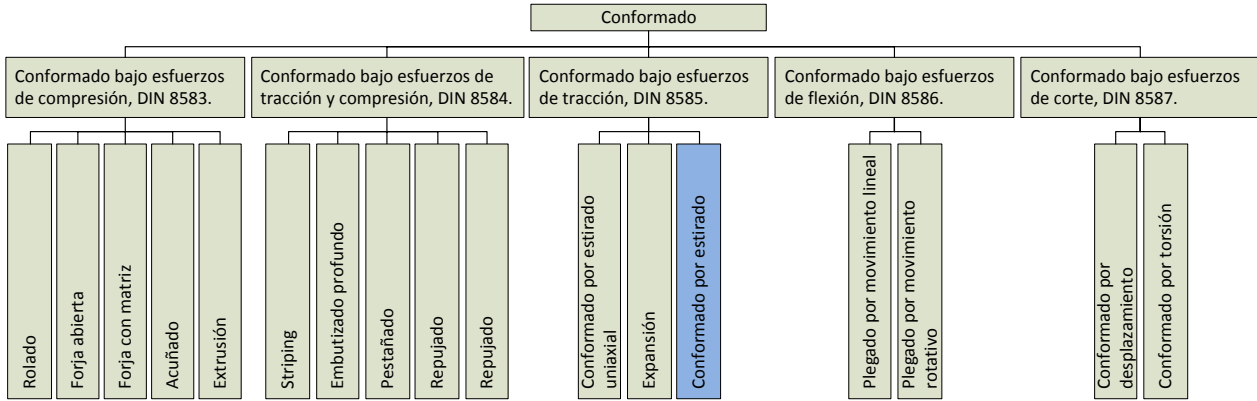


Figura 3: Procesos de conformado según DIN 8582.

En la industria aeronáutica encontramos una gran variedad de piezas de chapa de distintos materiales, por ejemplo aluminio, acero y titanio. La fabricación de estas piezas involucra una serie de operaciones entre las cuáles tenemos al conformado. Es común que una misma pieza requiera más de un proceso de conformado, por ejemplo: conformado en prensa de goma o hidráulica y luego plegado. Además, entre las distintas operaciones de conformado pueden ser necesarios tratamientos térmicos a fin de restaurar las propiedades del material y eliminar el endurecimiento por deformación plástica. Éstas son las

consideraciones que deberá tener en cuenta el Ingeniero de proceso al momento de definir la fabricación de una pieza.

Generalmente, los recubrimientos de las aeronaves tienen grandes dimensiones con contornos suaves y grandes radios de curvatura. Cuando presentan curvatura simple son fabricadas por rolado, mientras que cuando presentan curvaturas complejas o doble curvatura se fabrican por estirado.

1.2. Conformado por estirado.

El conformado por estirado es el proceso de conformado de chapas y perfiles que combina esfuerzos de tracción y flexión. Este proceso puede definirse, según la norma DIN 8585, como la acción de un punzón indeformable sobre una chapa sujeta rígidamente en los bordes. La chapa a conformar puede estar sujeta con herramientas fijas o con mordazas móviles como se muestra en la Figura 4.

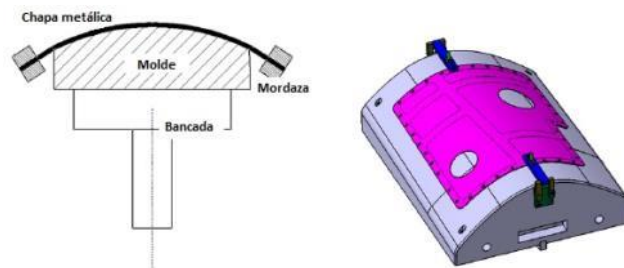


Figura 4: Estirado de chapas con molde fijo y mordazas móviles. Ejemplo de pieza conformada por estirado y contorneada.

Por su parte, dentro del proceso de conformado por estirado, encontramos distintas técnicas:

1.2.1. Conformado por estirado simple.

En el proceso de conformado por estirado simple la chapa a conformar se sujeta entre dos mordazas situadas en extremos opuestos. El molde de conformado se coloca sobre una mesa que puede desplazarse verticalmente mediante un accionamiento hidráulico. Las fuerzas necesarias para el conformado se transfieren a la chapa a través del molde, como se ilustra en la Figura 5.

La pieza a conformar recibe la forma durante el movimiento del molde mientras que las mordazas permanecen estacionarias. Debido a la gran superficie de contacto entre el molde y el blank¹, las fuerzas de fricción se oponen a la deformación de la chapa en ésta área. Esto se presenta especialmente en piezas con poca curvatura, donde un pequeño desplazamiento del molde es suficiente para que el blank lo cubra completamente.

¹ Blank: término empleado para definir la chapa a conformar.

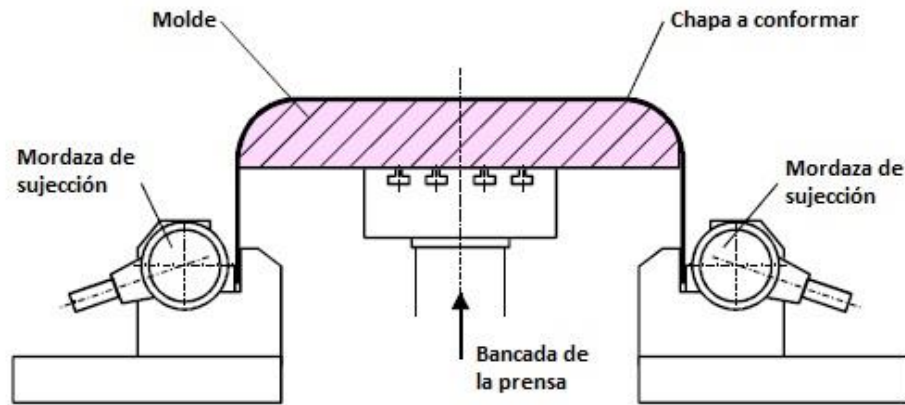


Figura 5: Técnica de estirado simple.

A medida que el molde continúa desplazándose, el blank se tensa, especialmente en los contornos del molde. Debido a las fuerzas de fricción, las regiones medias de la chapa apenas se deforman sin alcanzar el límite de deformación máximo admisible. Esto implica que el alargamiento máximo alcanzable, calculado teóricamente en base a la longitud del blank entre las mordazas, no puede alcanzarse, porque las zonas centrales de la chapa apenas se deforman y no contribuyen a la deformación total. La chapa metálica se expande por efecto de los esfuerzos de tracción, a expensas de su espesor.

Sólo piezas predominantemente planas con áreas convexas relativamente pequeñas y de suave curvatura pueden ser producidas por éste método, de lo contrario será necesaria una prensa de estirado con contra-molde. Durante la operación de conformado se debe tener cuidado de que el blank no se deslice hacia los lados del molde.

Una desventaja del estirado simple es que como las regiones medias del blank no resultan lo suficientemente deformadas, la distribución de tensiones en la sección transversal no es uniforme. Esto conduce en parte a la recuperación elástica o springback y consecuentemente a la pérdida de precisión dimensional, y por otro lado, a un insuficiente endurecimiento por deformación lo que resulta en una pieza con pobres propiedades mecánicas.

1.2.2. Conformado por estiramiento tangencial.

En el conformado por estiramiento tangencial, el blank también se sujeta con mordazas en extremos opuestos. La principal diferencia con el estiramiento simple es que en éste, tanto el molde como las mordazas son móviles.

Empleando este proceso, es posible someter al blank a una pre-deformación plástica previa al conformado final, de modo que toda la sección transversal del material experimente una deformación plástica uniforme.

Otra ventaja es que las fuerzas de tracción siempre se aplican tangencialmente a la chapa. Este proceso se puede considerar dividido en dos etapas, como se muestra en la Figura 6.

En la primera etapa, el blank se sujeta con mordazas opuestas entre sí. Luego, las mordazas se mueven horizontalmente, alejándose una de otra, creando así en estado de deformación plástica uniforme en toda la sección transversal de la chapa. En la segunda etapa, el molde de conformado se desplaza verticalmente hacia el blank. Las mordazas se inclinan y orientan en la dirección de los esfuerzos de tracción de manera que el blank, constantemente sometido al esfuerzo de tracción necesario para sostener la deformación plástica cubra totalmente el molde.

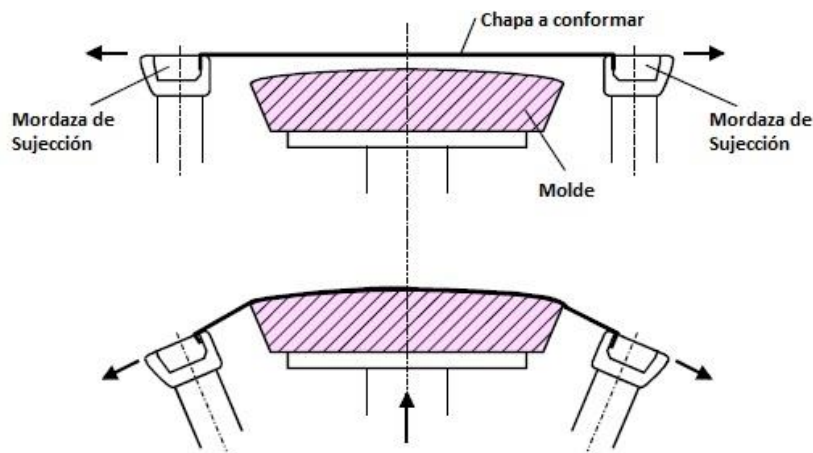


Figura 6: Conformado por estiramiento tangencial.

Debido al alargamiento proporcionado al blank antes del contacto con el molde, las áreas centrales de la chapa se conforman sin estar bajo el efecto de las fuerzas de fricción. Otra ventaja es que la tensión de tracción aplicada al blank durante la deformación, reduce las tensiones residuales. La reducción de tensiones residuales conduce a menor recuperación elástica (springback) en comparación con el estiramiento simple, esto a su vez, permite obtener una mayor exactitud en el conformado, además de una resistencia también más elevada en la pieza conformada.

1.2.3. Proceso de conformado Cyril-Bath.

Basado en el proceso de conformado con estiramiento tangencial, la compañía Cyril-Bath ha desarrollado un proceso con el cual es posible realizar un conformado con estiramiento tangencial en una prensa de embutizado mecánica o hidráulica, ver Figura 7. Éste proceso es utilizado para fabricar piezas grandes, con formas relativamente planas, por ejemplo tapas de motor o baúl de automóviles tanto en series numerosas como de poca cantidad de piezas.

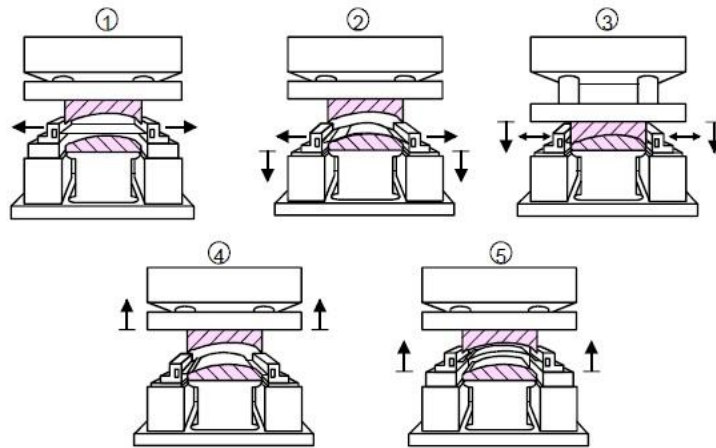


Figura 7: Proceso de estirado Cyril-Bath.

Éste proceso puede considerarse como una combinación del conformado por estirado y del embutición profunda. Por éste motivo a veces se conoce como proceso de estirado-embutición.

Este proceso se utiliza en la fabricación en serie de partes para carrocerías, dependiendo de la forma, entre un 6% y un 10% de las piezas de una carrocería pueden fabricarse con éste método, pudiendo lograr una cadencia de hasta 8 piezas por minuto.

Esta técnica emplea dos mordazas enfrentadas una a la otra que pueden moverse tanto horizontal como verticalmente, Las mordazas se ubican a los lados de la bancada de una prensa hidráulica simple. El molde de conformado se coloca sobre la bancada de la prensa y el contra-molde se monta sobre el pistón de la prensa.

El conformado de una pieza con ésta técnica consta de cinco pasos:

- ① El blank se sujeta entre las mordazas. Las mordazas se mueven, alejándose una de otra, produciendo un alargamiento de la chapa del 2% al 4%.
- ② Sin reducir el esfuerzo de tracción, las mordazas se desplazan hacia abajo hasta que la chapa envuelve completamente el molde, conformando las formas convexas.
- ③ El contra-molde se desplaza hacia abajo presionando la chapa y conformando los contornos cóncavos. Para prevenir la rotura de la chapa, las mordazas se mueven horizontal y verticalmente de manera controlada y pre-definida.
- ④ El contra-molde retorna a su posición inicial.
- ⑤ Las mordazas se abren y retornan a su posición inicial permitiendo retirar la pieza conformada.

La principal diferencia entre el proceso Cyril-Bath y el conformado por estirado reside en el tercer paso, ya que las mordazas se mueven de manera controlada. Debido a éste movimiento controlado, la tensión aplicada a la chapa se puede mantener constante o, si es necesario, reducirla. Esto permite que toda la chapa fluya durante el conformado, con lo que el aumento de superficie necesario para el mismo no se obtiene sólo a expensas de una reducción del espesor.

Una de las ventajas del proceso Cyril-Bath es la buena formación de las regiones medias de las piezas, principalmente aquellas con poca línea de forma, en las cuáles es posible obtener un alto grado de endurecimiento por deformación y consecuentemente una buena resistencia. Al mismo tiempo, debido a que el conformado se produce en estado plástico, las tensiones residuales son menores, lo que reduce la recuperación elástica y permite reproducir la forma del molde con mayor precisión.

Una limitación al proceso Cyril-Bath es que sólo es posible ejercer tracción en una dirección, de modo que sólo pueden conformarse piezas que requieren poca deformación transversal a la dirección del esfuerzo. Es decir que no permite reproducir eficientemente piezas con doble curvatura.

1.2.4. Conformado por estiramiento Multi-axial.

El incremento de popularidad del proceso Cyril-Bath y del estiramiento tangencial propició el diseño de un equipamiento de estirado flexible y programable.

El objetivo de ésta técnica es utilizar las ventajas de ambos procesos a la vez que para eliminar las desventajas, dispone de mordazas a los dos lados de los moldes.

Los requerimientos impuestos para una máquina de conformado por estirado flexible, fueron:

- ① Las mordazas de sujeción debían ser capaces de ubicarse todo alrededor del blank con el objetivo de aumentar la variedad de formas a producir.
- ② Debía usarse un sistema de sujeción segmentado que permitiera un mejor control de la fluencia del material, a la vez que posibilitara producir piezas con formas asimétricas.
- ③ El sistema debía ser capaz de ser mejorado y adaptado a la producción de piezas de formas cóncavas-convexas.

Una consecuencia de éstos requerimientos es un sistema flexible de estiramiento que consiste de sistemas de estiramiento individuales dispuestos alrededor del molde de conformado. Cada uno de estos sistemas puede programarse individualmente.

El principio de funcionamiento de las máquinas que hacen posible la técnica de estirado multi-axial se muestra en la Figura 8.

El proceso de conformado multi-axial consta de los siguientes pasos:

- ① El blank se sujeta con la mordazas por todos sus extremos. Luego, las mordazas se mueven una hacia la otra de modo de permitir que las demás mordazas sujeten también la chapa. Finalmente, todas las mordazas se alejan entre sí pre-tensionando el blank.
- ② Todas las mordazas se mueven vertical y horizontalmente, de manera coordinada, permitiendo que la chapa envuelva completamente el molde de conformado.

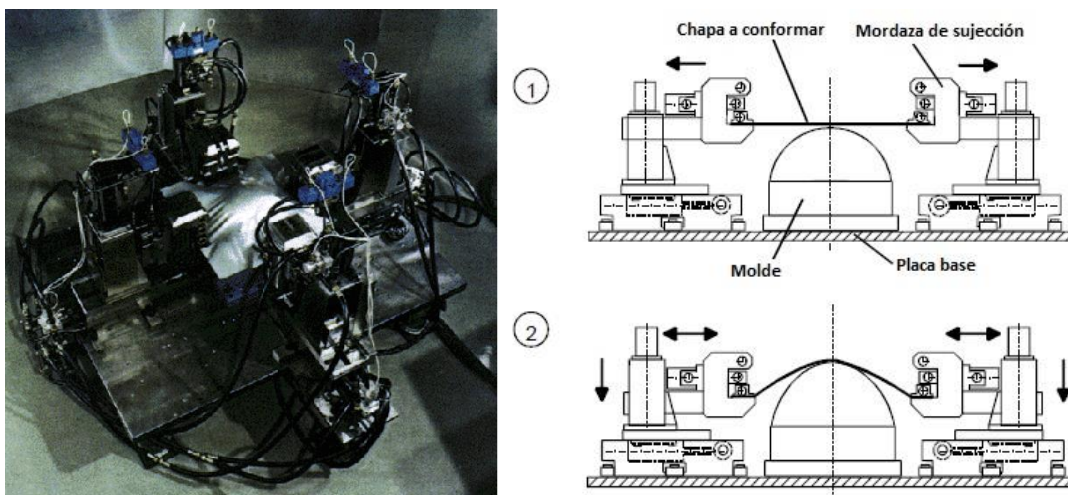


Figura 8: Conformado por estirado multi-axial.

La determinación y programación de las trayectorias de las mordazas es fundamental para lograr un conformado con precisión. Cada mordaza puede programarse para describir una trayectoria individual, ya sea de movimientos lineales o curvas simples creadas a partir de pequeños movimientos discretos.

En moldes con geometrías complicadas, la trayectoria de las mordazas debe determinarse manualmente empleando como base el diseño de la pieza a conformar. La puesta a punto final del proceso se hace entonces experimentalmente, mediante un método iterativo.

1.2.5. Otras técnicas de estirado.

Otras técnicas de conformado por estirado, aún en fase experimental son por ejemplo,

- La combinación del conformado asimétrico incremental con el conformado por estirado mostrado en la Figura 9.
- El conformado por estirado de ciclo corto, SCS ^[1] por sus siglas en inglés, en desarrollo en el Instituto para la Tecnología de Conformado de Metales de la Universidad de Stuttgart, es una tecnología que está haciendo interesante la aplicación de este método de conformado para la Industria Automotriz, en la que los costos y tiempos de proceso deben ser acotados.
- El conformado por estirado de ciclo corto combina el pre-tensionado plano de la chapa con el embutizado, de manera similar a la técnica de Cyril-Bath, sólo que con el uso de ésta tecnología no se requieren de mordazas de sujeción para el tensionado, sino que éste se logra a partir de un ingenioso diseño del herramental, mostrado en la Figura 10 y la Figura 11. Las distintas etapas del SCS se ilustran en la Figura 12.

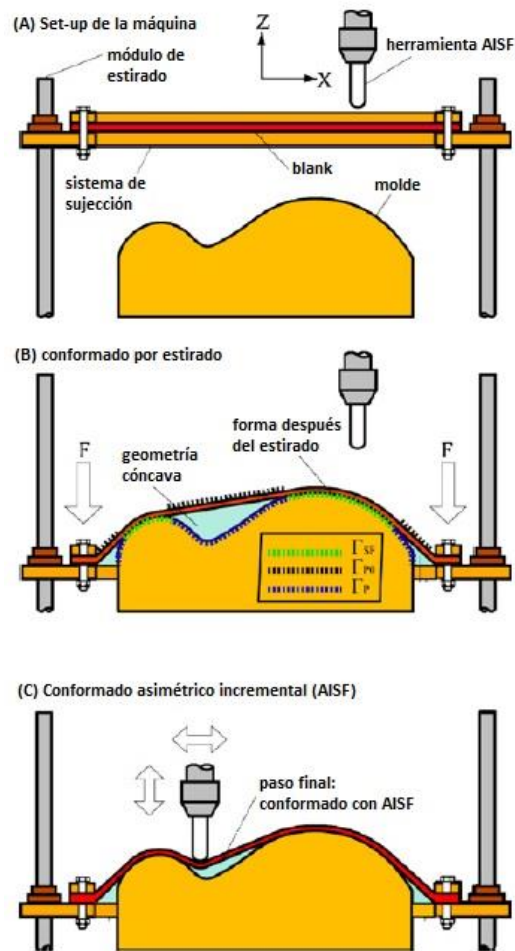


Figura 9: Combinación de estirado y conformado incremental.

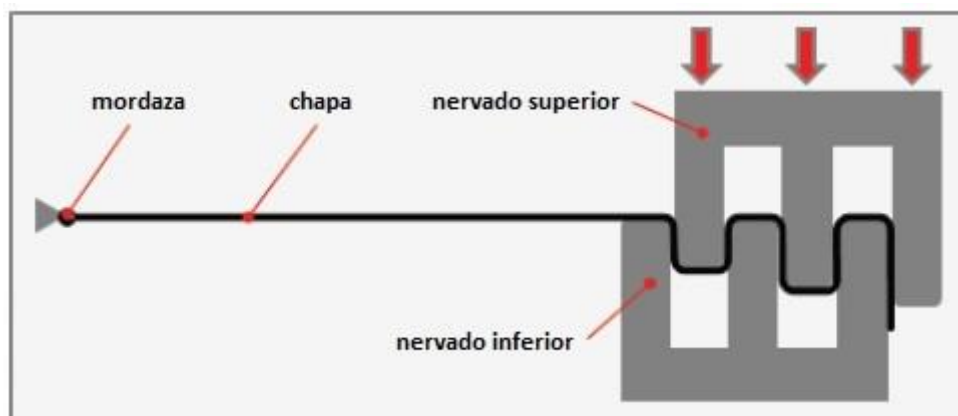


Figura 10: Principio del conformado por estirado de ciclo corto



Figura 11: Ejemplo de moldes y piezas obtenidas con el SCS.

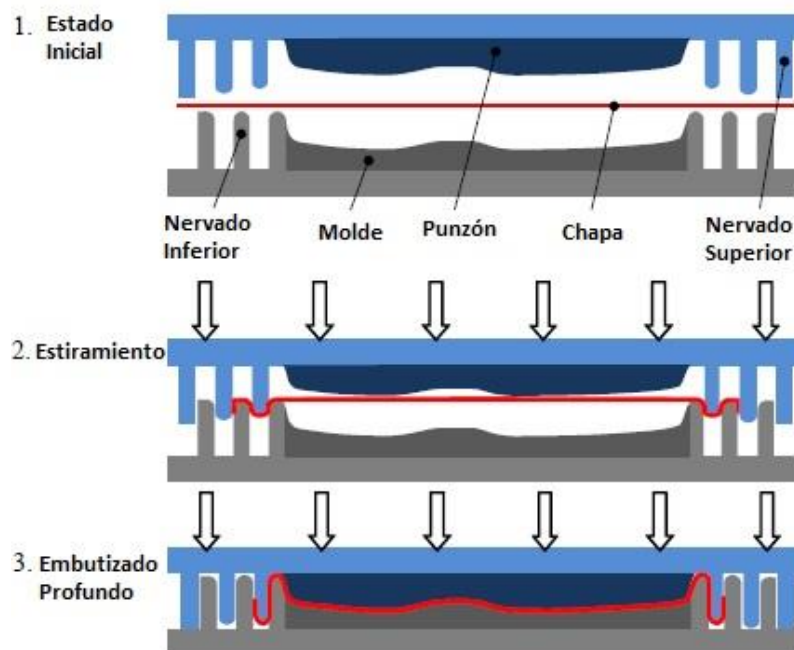


Figura 12: Etapas del proceso SCS.

Además de las dos técnicas mencionadas anteriormente, existen otras innovaciones en el proceso de conformado por estirado

- El conformado por estirado multi-punto es un sistema que pretende reducir los costos de diseño de los moldes de conformado haciendo más rápida la compensación del springback sin necesidad de grandes re-trabajos. Además, este sistema flexibiliza el proceso, ya que con un solo molde programable se pueden obtener una gran variedad de piezas.

En el conformado por estirado multi-punto se emplea un molde compuesto por una matriz de elementos que pueden regularse en altura, de modo de obtener la geometría deseada en la superficie de conformación, ver Figura 13. Los parámetros más importantes en este proceso son el tamaño de los elementos de la matriz y el radio de sus extremos hemisféricos.

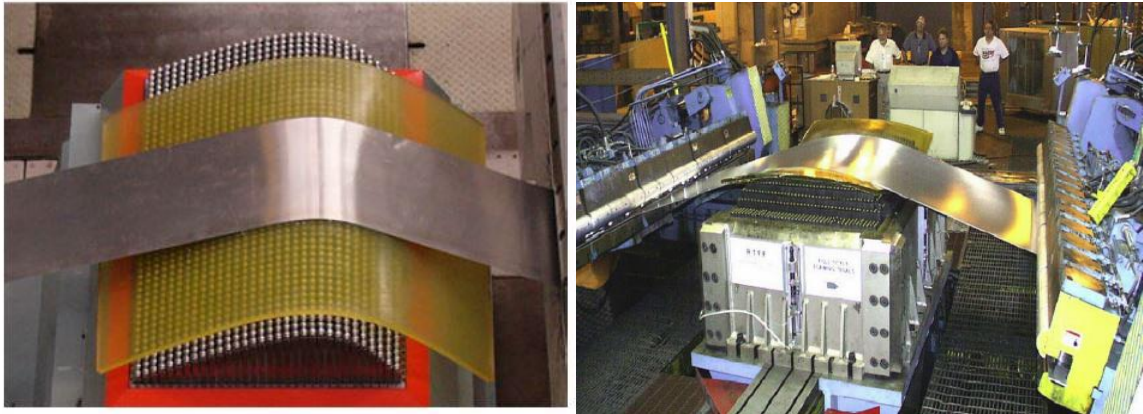


Figura 13: Matriz de conformado por estiramiento multi-punto.

El concepto de un utillaje re-configurable fue introducido por un equipo de investigación del Instituto Tecnológico de Massachusetts. La posición de los elementos de la matriz que componen el molde de conformado se gobiernan mediante un algoritmo de computadora, de éste modo, los errores de forma en el conformado se consideran como problemas de control de forma y se resuelven iterativamente.

El conformado por estirado multi-punto incluye las siguientes etapas:

Paso 1: Calcular la altura de los elementos de la matriz de conformado a partir del diseño de la pieza que se desea obtener. Configurar los elementos de la matriz. En algunos casos, cuando las piezas son pequeñas, puede ser necesario configurar sólo una parte de la matriz como se ve en la Figura 14.

Paso 2: La chapa se dispone sobre un colchón elástico y se sujeta con las mordazas de estirado por lados opuestos. De ésta manera la chapa está completamente en contacto con la matriz.

Paso 3: Estirar la chapa moviendo las mordazas de sujeción haciendo que la chapa supere su límite de fluencia de manera de reducir la recuperación elástica y así asegurar la precisión en el conformado.

Paso 4: Reducir la fuerza de estiramiento y abrir las mordazas de sujeción liberando la chapa. La pieza conformada experimenta una leve contracción por efecto de su recuperación elástica. La almohadilla elástica recupera su forma inicial.

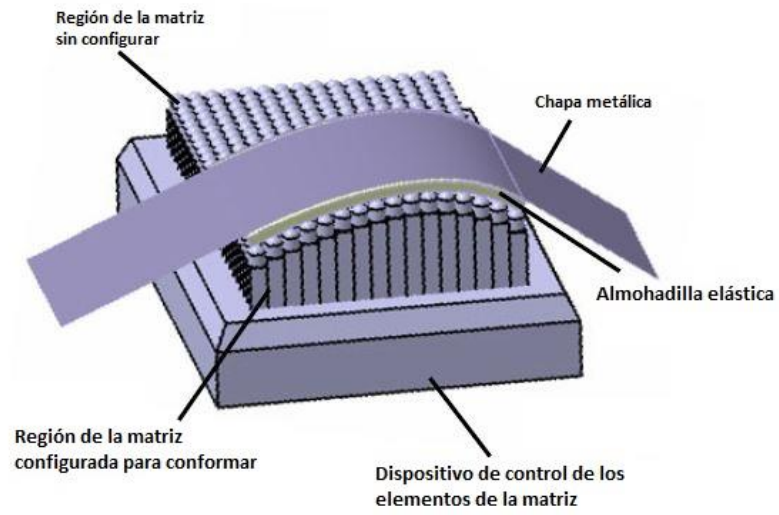


Figura 14: Esquema de conformado Multi-punto.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

La fabricación de recubrimientos de fuselajes, en la Industria Aeronáutica, es un caso típico de la utilización del proceso de conformado por estirado.

Los paneles de recubrimientos son piezas estructurales destinadas a resistir y transmitir esfuerzos durante su vida en servicio. En la actualidad, debido al compromiso que existe entre el peso de las aeronaves y las prestaciones cada vez mayores que se pretenden de ellas, los requerimientos mecánicos sobre los recubrimientos han aumentado. Históricamente, por ejemplo, éstas piezas se fabricaban con chapas de aleación de aluminio AA2024, hoy en día, ésta aleación está siendo reemplazada por la AA2524 que presenta una mayor resistencia a la fatiga, pero además se le han impuesto otras condiciones que impactan tanto en la elaboración de la materia prima como en el proceso de fabricación de la aero-parte. Desde el punto de vista de la elaboración de la materia prima, se exige que las chapas de aluminio posean una condición de tensiones residuales mínimas, MRS por sus siglas en inglés. Y, desde el punto de vista de la fabricación de la pieza se exige un delicado equilibrio entre dureza y resistencia. Éste se logra controlando entre otras variables los valores de deformación y su distribución durante el conformado, de modo de asegurar un suficiente grado de endurecimiento por deformación, la uniformidad de espesor, el crecimiento de grano y su dirección, además, por supuesto de la geometría. Es nuestro objetivo, entender cómo se relacionan éstas variables e identificar cuáles de ellas son las que mayor influencia tienen en el resultado final.

2.1. Casos de estudio

Nuestro estudio se focaliza en el conformado de recubrimientos de grandes dimensiones, con línea de forma suave, fabricados en chapa de aleación de aluminio AA2524 Alclad que de acuerdo a las especificaciones del cliente se deben conformar en frío en condición AQ/W² con un alargamiento del 4% al 6%, para luego envejecer naturalmente a la condición T42³. En la Figura 15 se muestran los recubrimientos y sus respectivos moldes.

El cumplimiento de las distintas exigencias mencionadas anteriormente, nos coloca en una posición delicada y, es precisamente este motivo lo que impulsa nuestro interés en el tema.

Debido a las dimensiones de las piezas en estudio, 2 m de ancho por 1,6 a 1,8 m de largo, nos encontraremos trabajando próximos al límite operativo de la prensa de estirado que tiene una capacidad máxima de 125 Tn de tracción en las mordazas y hasta 250 Tn de fuerza vertical sobre la mesa que soporta el molde, además de la limitación geométrica, ya que la máxima apertura de las mordazas rotadas es de 2490 mm como se muestra Figura 16. Éstas razones hacen que sea muy importante reconocer cuáles son y cómo influyen los distintos parámetros del proceso de conformado.

² AQ/W: Estado térmico de las aleaciones de aluminio inmediatamente posterior al tratamiento de solubilizado.

³ T42: Estado térmico de los aluminios después del envejecido posterior al tratamiento de solubilizado.

En general, las características o especificaciones que definen una prensa de conformado por estirado son:

- Mordazas: el número de mordazas, el ancho y la distancia entre las mordazas, la carrera y tonelaje, el balanceo y la presión de cierre o agarre.
- Mesa: tamaño y peso, tonelaje mínimo y máximo, largo y ancho máximo de las piezas a conformar, ángulo de inclinación, velocidad de conformado y recorrido.
- Sistema hidráulico: potencia de las bombas, caudal, presión y tipo de fluido. Fuerzas, recorridos, tracciones máximas y mínimas de los cilindros.

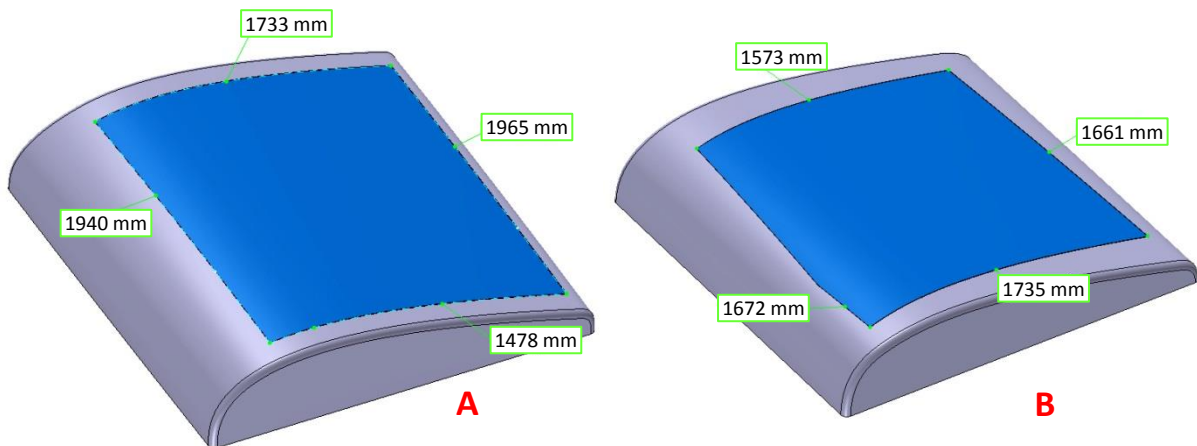


Figura 15: Casos de estudio.

Debido al costo de la materia prima y la cantidad requerida para cada pieza, resulta importante poder conocer de antemano las mejores condiciones de conformado que permitan obtener un producto de calidad, que cumpla las especificaciones del cliente, y reduzca al mínimo la generación de piezas scrap⁴.

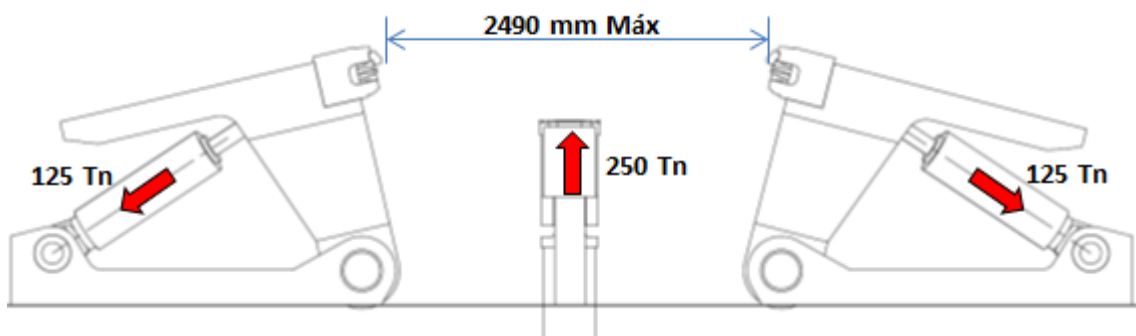


Figura 16: Capacidad de la prensa empleada.

⁴ Scrap: Pieza no apta / Pieza mal conformada que debe descartarse.

3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

A continuación se detalla el procedimiento empleado para obtener el modelo matemático del material que reproduzca fielmente su comportamiento real.

3.1. Procedimiento de caracterización de la aleación de aluminio AA 2524-T3

Ante la imposibilidad de llevar a cabo los ensayos necesarios para caracterizar las propiedades mecánicas de los metales conforme lo establecen las normas internacionales ^[2], se emplean datos bibliográficos extraídos del MMPDS (Metallic Materials Properties Development and Standardization) ^[3] mostrados en la Figura 19 y la Figura 20, como fuente de las propiedades físicas y mecánicas del material.

Es importante resaltar que si bien la aleación de aluminio empleada en la fabricación de las aero-partes en estudio es la misma que la modelada, su estado térmico es diferente. Las piezas se deben conformar a partir de chapas de aluminio AA 2524 en estado AQ/W, mientras que el modelo simulado corresponde a la aleación AA 2524 en estado T3. Esta diferencia en el estado térmico incide directamente en los límites de fluencia y rotura como se muestra en la Tabla 1 y la Figura 17 para la aleación AA 2024. El módulo de elasticidad, por su parte, permanece esencialmente invariable como se puede ver en la curva tensión deformación de la Figura 18.

Aleación	Densidad [gr/cm ³]	Dureza [HB]	σ_u (UTS) [ksi]	σ_y (YS) [ksi]	E [ksi x 10 ³]	σ_f (FS) [ksi]	G [ksi x 10 ³]	σ_s (SS) [ksi]
AA 2524-O	2.78	47	27	11	10600	13	4.06	18
AA 2524-T3	2.78	120	70	50	10600	20	4.06	41
AA 2524-T42	2.78	120	68	47	10600	20	4.06	41

Tabla 1: Influencia del estado en las propiedades mecánicas de la AA 2024.

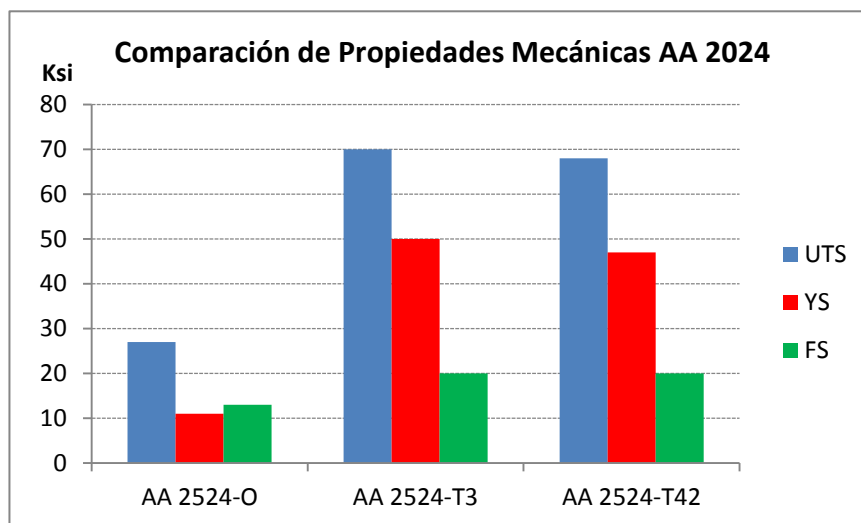


Figura 17: Propiedades mecánicas de la AA 2024.

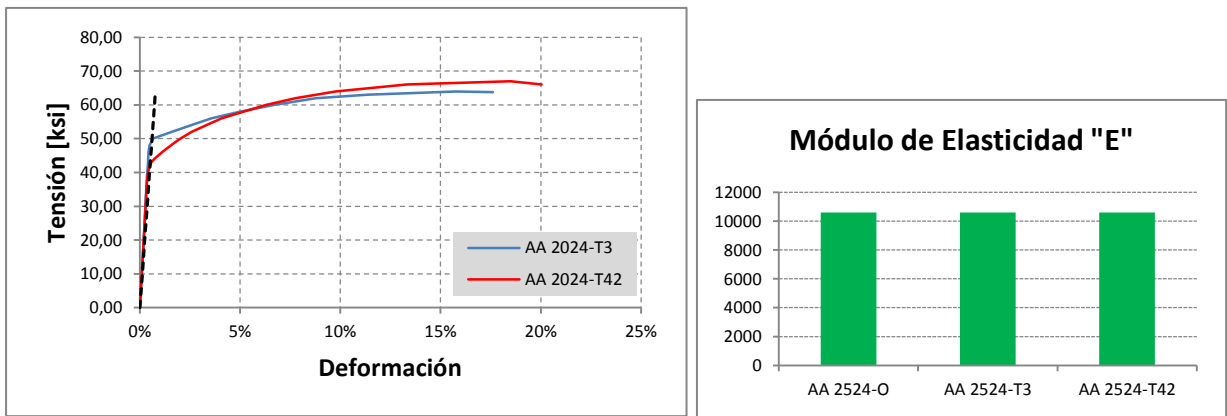


Figura 18: Influencia del estado en el módulo de elasticidad E.

Las propiedades mecánicas del estado AQ/W son semejantes a las del estado O. Por este motivo es de esperar que al llevar a la práctica las conclusiones de este trabajo se observe un comportamiento menos resistente por parte del material, con la capacidad de absorber mayores deformaciones plásticas.

MMPDS-01
31 January 2003

Table 3.2.12.0(b). Design Mechanical and Physical Properties of Alclad 2524-T3 Aluminum Alloy Sheet and Plate

Specification	AMS 4296						
	Sheet and Plate						
Form	T3						
Condition	T3						
Thickness, in.	0.032-	0.063-0.128	0.129-0.249	0.129-0.249	0.129-0.249	0.250-0.310	0.250-0.310
Basis	S	A	B	A	B	A	B
Mechanical Properties:							
F_{T0} , ksi:							
L	59	61	62	62	62	62	63
LT	59	61 ^a	62	62	62	62	63
$F_{0.2}$, ksi:							
L	44	45	47	45	46	45	46
LT	39	40 ^b	42	40	41	40	41
$F_{0.01}$, ksi:							
L	38	39	41	39	40	39	40
LT	42	43	45	43	44	43	44
$F_{0.2}^c$, ksi:							
L	40	41	42	42	42	42	43
F_{brw}^d , ksi:							
(e/D = 1.5)	93	97	98	98	98	98	100
(e/D = 2.0)	117	121	123	123	123	123	125
F_{brw}^d , ksi:							
(e/D = 1.5)	65	67	70	67	69	67	69
(e/D = 2.0)	76	78	82	78	80	78	80
e, percent (S-basis):							
LT	15	15	...	15	...	15	...
Elastic Properties:							
E , 10^3 ksi:							
Primary				10.3			
Secondary				9.8			
E_c , 10^3 ksi:							
Primary				10.5			
Secondary				10.0			
G , 10^3 ksi				...			
μ				0.35			
Physical Properties:							
ω , lb/in. ³				0.100			
C, K, and α				not available			

a S-basis value. The $T_{0.2}$ value is 62 ksi.
b S-basis value. The $T_{0.01}$ value is 41 ksi.
c Determined in accordance with ASTM B 831-93.
d Bearing values are "dry pin" values per Section 1.4.7.1. See Table 3.1.2.1.1.

Figura 19: Propiedades físicas y mecánicas de la AA2524-T3.

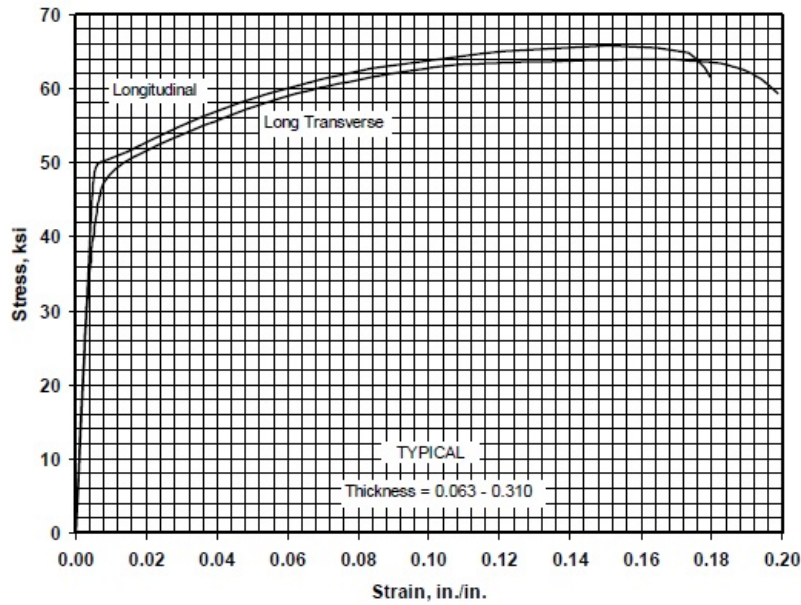


Figure 3.2.12.1.6(c). Typical tensile stress-strain curves (full range) for 2524-T3 clad aluminum alloy sheet and plate at room temperature.

Figura 20: Curva Tensión-Deformación de la AA2524-T3 en el MMPDS-01.

La curva de tensión-deformación del material (ver Figura 20), se digitaliza con la ayuda del software libre WebPlotDigitizer ^[4] como se ve en la Figura 21. Como resultado se obtiene una tabla con 70 puntos que permiten trazar esta misma curva en una planilla de cálculo para luego importarla desde el software de elementos finitos, ver Figura 22.

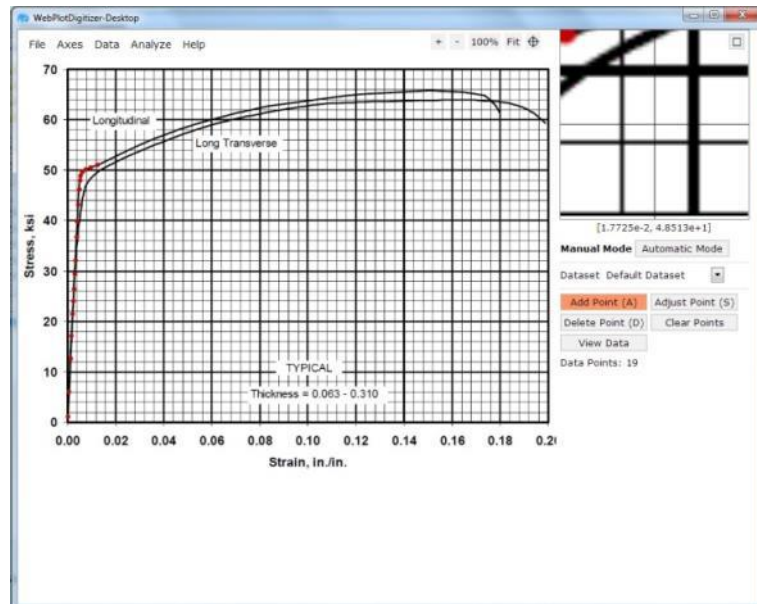


Figura 21: Digitalización de la curva Tensión-Deformación.

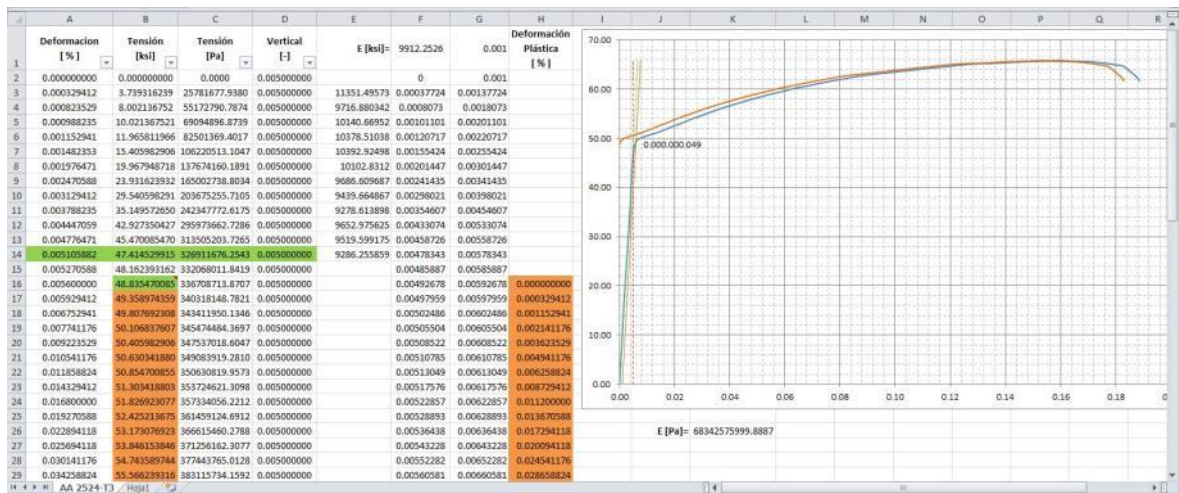


Figura 22: Planilla de cálculo de la curva Tensión-Deformación para el aluminio AA2524-T3.

Para verificar si el comportamiento del modelo matemático del material es coherente con la información bibliográfica, se simula un ensayo de tracción con una probeta de dimensiones estándar a la que se asigna el material modelado. Para esto se confecciona un modelo tridimensional de un ensayo de tracción estándar que luego se exporta al software de elementos finitos para su estudio como se representa en la Figura 23.

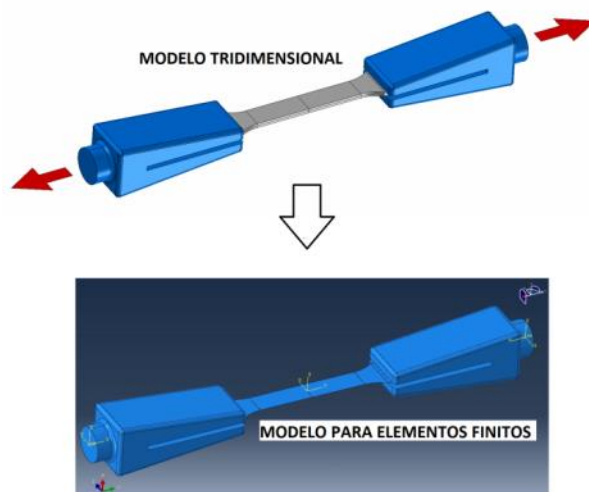


Figura 23: Ensayo de tracción virtual.

El estudio se focaliza sobre lo que acontece en toda la sección calibrada de la probeta, principalmente las tensiones longitudinales en los nodos A, B y C, mostrados en la Figura 24.

Se realizaron diferentes simulaciones con elementos finitos, con distintas cargas de tracción, variando la cantidad de intervalos de iteración dentro del “step” y se determinaron las curvas de tensión deformación sobre los nodos estudiados.

En la Figura 25 se muestra la distribución de tensiones en la zona calibrada, mientras que la Figura 26 presenta las tensiones principales en la dirección longitudinal.

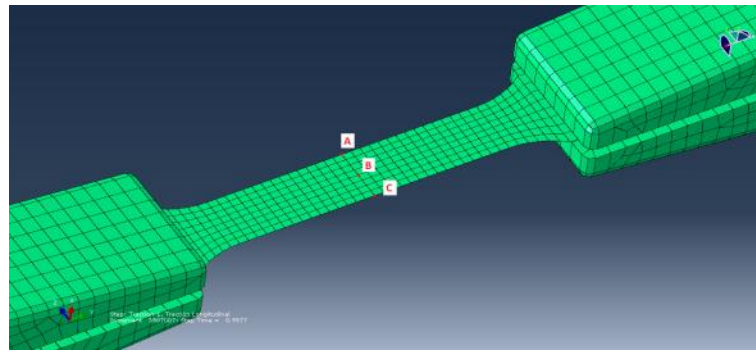


Figura 24: Ensayo de tracción estándar. Nodos analizados.

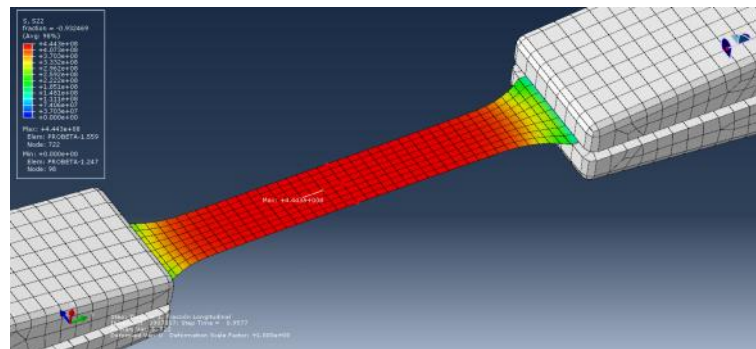


Figura 25: Distribución de tensiones longitudinales en la sección central de la probeta.

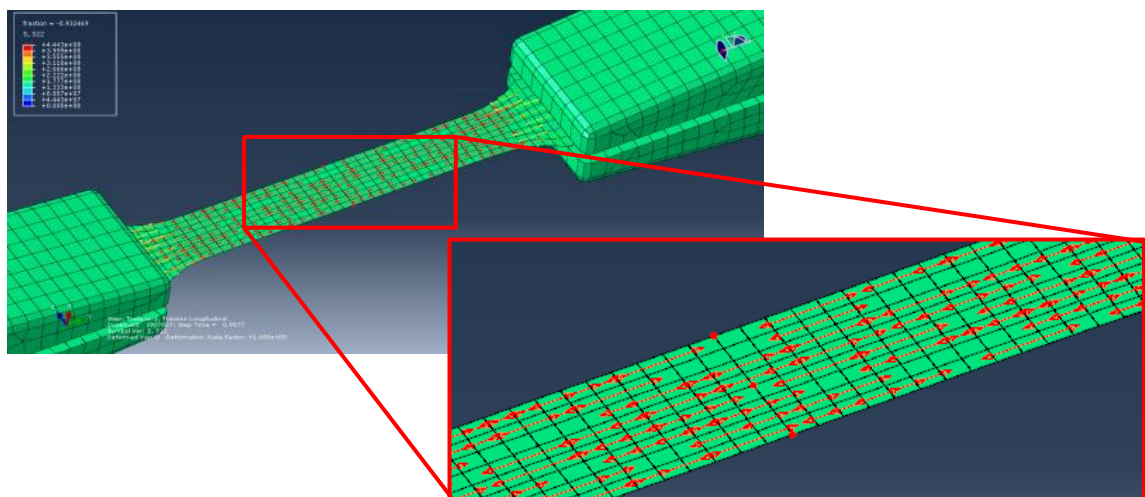


Figura 26: Tensiones longitudinales sobre la probeta.

Los resultados obtenidos son comparados con las curvas digitalizadas en la Figura 27. Se observa que el modelo matemático del material se corresponde con la curva de fluencia impuesta al material real. Sólo se aprecian diferencias en el inicio de la plastificación que no influyen de manera global sobre el proceso de

conformado debido a que están confinadas a una región muy pequeña de la curva de fluencia (ver Figura 28). El principal interés en este tipo de procesos se sitúa dentro del campo plástico, posterior a la fluencia.

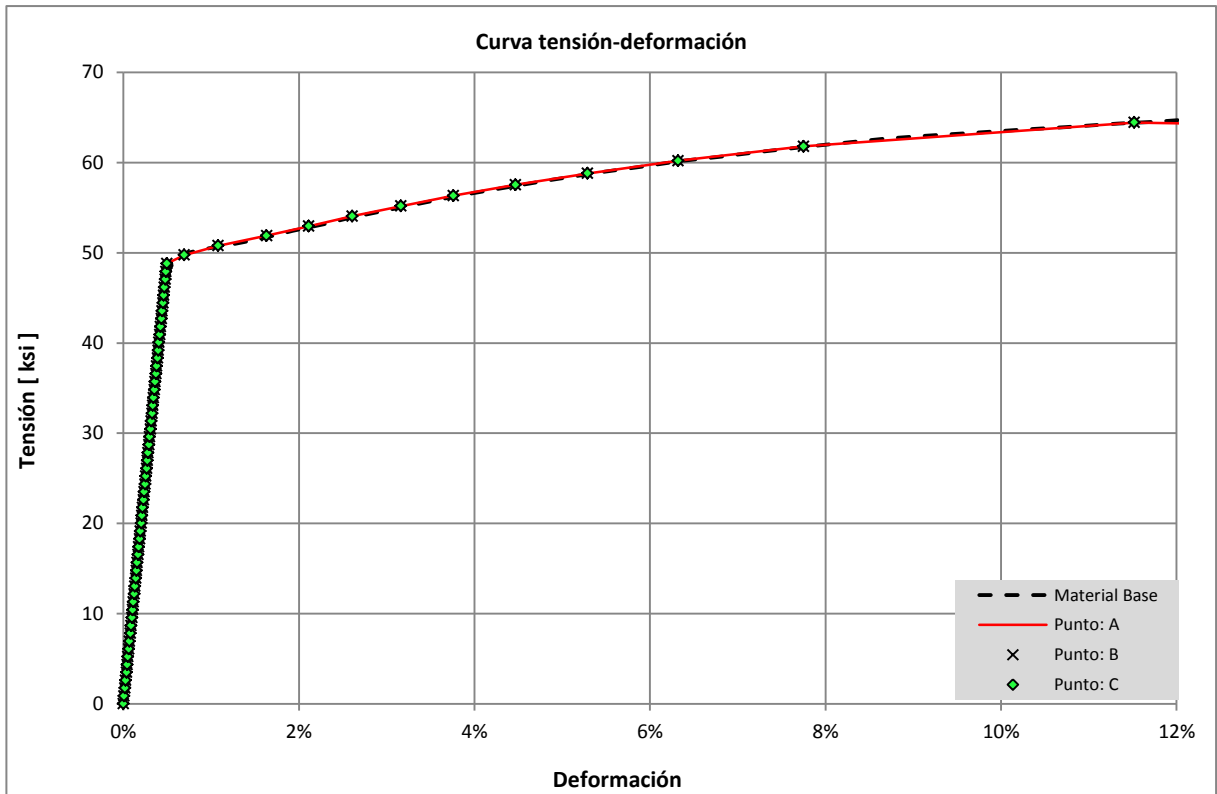


Figura 27: Modelo de material vs. datos bibliográficos.

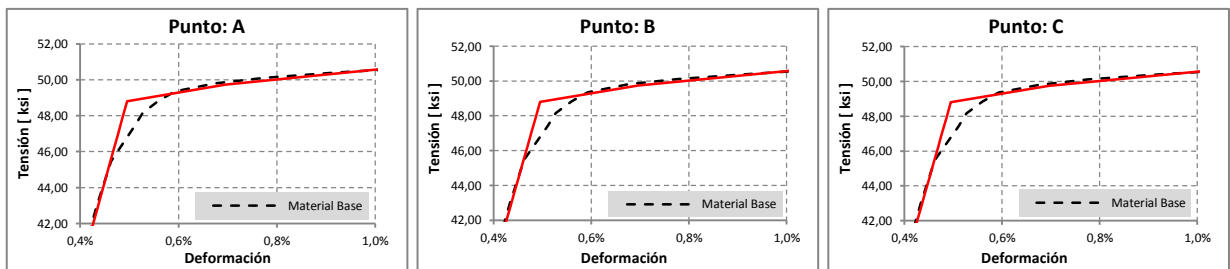


Figura 28: Inicio de fluencia en tracción estándar. Diferencias

Para los fines prácticos buscados en este trabajo, se puede decir que el comportamiento del modelo de material es adecuado y se prosigue con el estudio del conformado, que es el principal interés.

4. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL CONFORMADO POR ESTIRADO.

En este capítulo se estudia mediante simulaciones numéricas basadas en el método de elementos finitos, la influencia y el efecto de los distintos parámetros del proceso, principalmente los asociados a la cinemática del conformado y a las condiciones de lubricación.

4.1. Metodología empleada.

Para conocer cómo influyen en el conformado, tanto la cinemática como el lubricante utilizado, se confeccionó el modelo de la prensa, los moldes y los blanks empleados. Estos modelos se exportaron al software de análisis por elementos finitos donde se simularon distintas hipótesis de carga de manera de poder discriminar y analizar el efecto de los parámetros que afectan el conformado, sobre los cuales tenemos influencia desde el punto de vista operativo.

Para analizar el efecto de la cinemática del conformado, se plantean distintas condiciones de carga. Las condiciones de carga empleadas se imponen al modelo a través de la rotación de las mordazas y la elevación de la mesa que soporta al molde, del mismo modo que se realiza durante el conformado real.

Las condiciones de análisis empleadas son:

- Cinemática Relevada: obtenida a partir de los datos experimentales observados durante el conformado.
- Relevada Corregida: corrección lineal de los datos obtenidos durante el conformado. Se emplea para analizar el efecto de las pequeñas fluctuaciones en los desplazamientos.
- Movimiento Continuo: consiste en obtener los mismos desplazamientos y rotaciones absolutas que en el caso relevado pero de manera lineal y continua desde el inicio del conformado hasta el final.
- Movimiento Sostenido: igual que el movimiento continuo emplea una variación lineal de los desplazamientos y rotaciones, pero en vez de comenzar a crecer al inicio del conformado, su aplicación coincide, en el tiempo, con la cinemática relevada.
- Cinemática Escalonada: es la aplicación intermitente de los desplazamientos y rotaciones. Ésta es una metodología muy empleada durante los conformados controlados manualmente por el operador de la prensa.

En la Figura 29 se muestran las condiciones de análisis empleadas en términos de amplitud referidas a los desplazamientos y rotaciones relevadas.

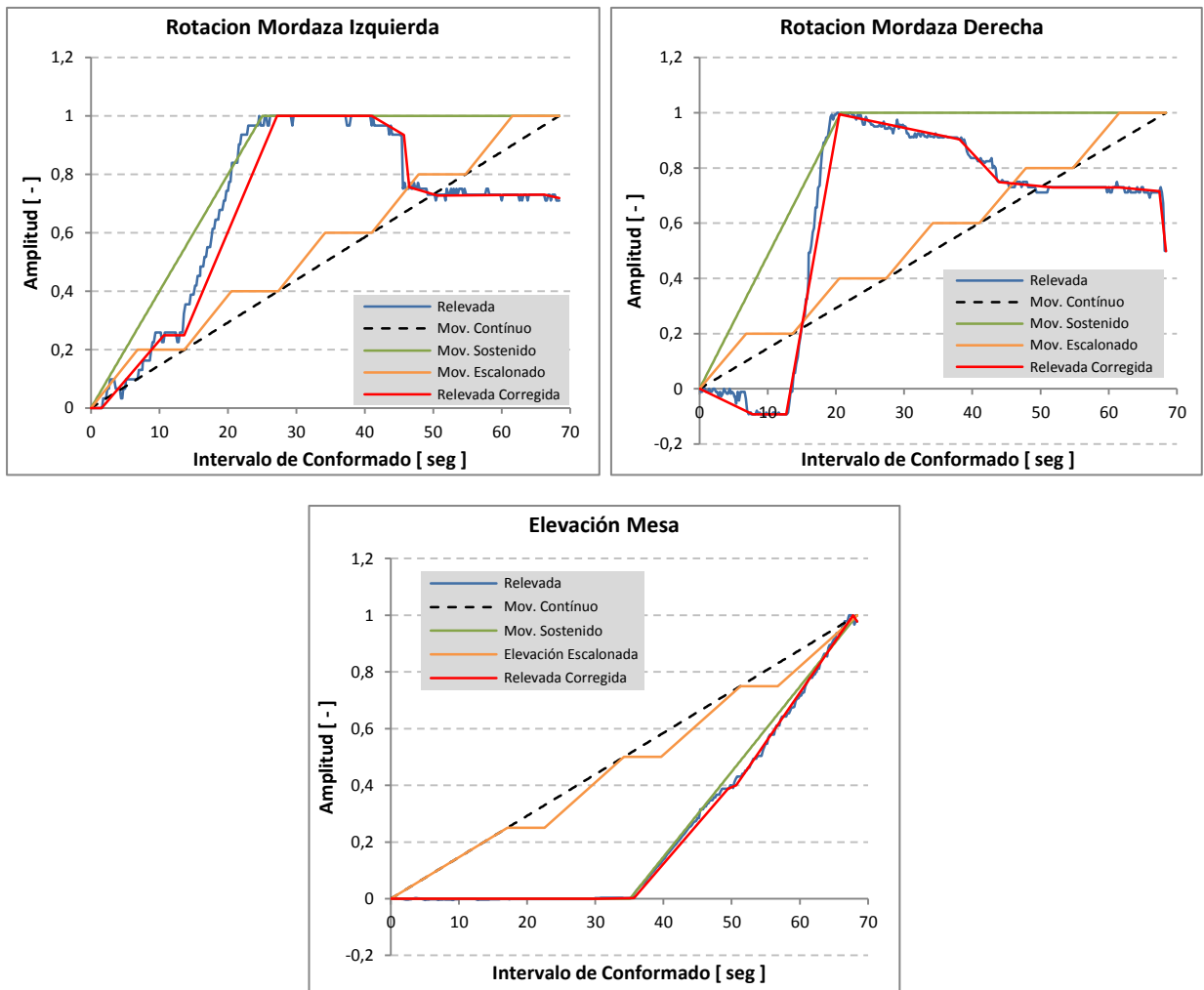


Figura 29: Condiciones de carga simuladas.

Para analizar el efecto del lubricante, las solicitaciones sobre el blank se combinaron con diferentes condiciones de lubricación de la interface chapa- molde. En el modelo numérico las condiciones de lubricación se representan a partir del coeficiente de fricción entre las superficies en contacto. Todas las combinaciones de hipótesis de carga y lubricante estudiadas se resumen en el cuadro de la Figura 30.

4.2. Relevamiento de datos.

En esta sección se resume la metodología empleada para relevar los datos de los conformados experimentales.

Como la prensa de estirado empleada, mostrada en la Figura 31, no cuenta con un sistema que permita grabar y extraer directamente los valores de los distintos parámetros del proceso, la metodología empleada para obtenerlos consistió en grabar la pantalla de información durante las secuencias de estirado, para luego mediante un software de edición, analizar el video cuadro por cuadro y llevar los valores mostrados a planillas de cálculo que pudieran exportarse al software de análisis por elementos finitos proceso que se ilustra en la Figura 32.

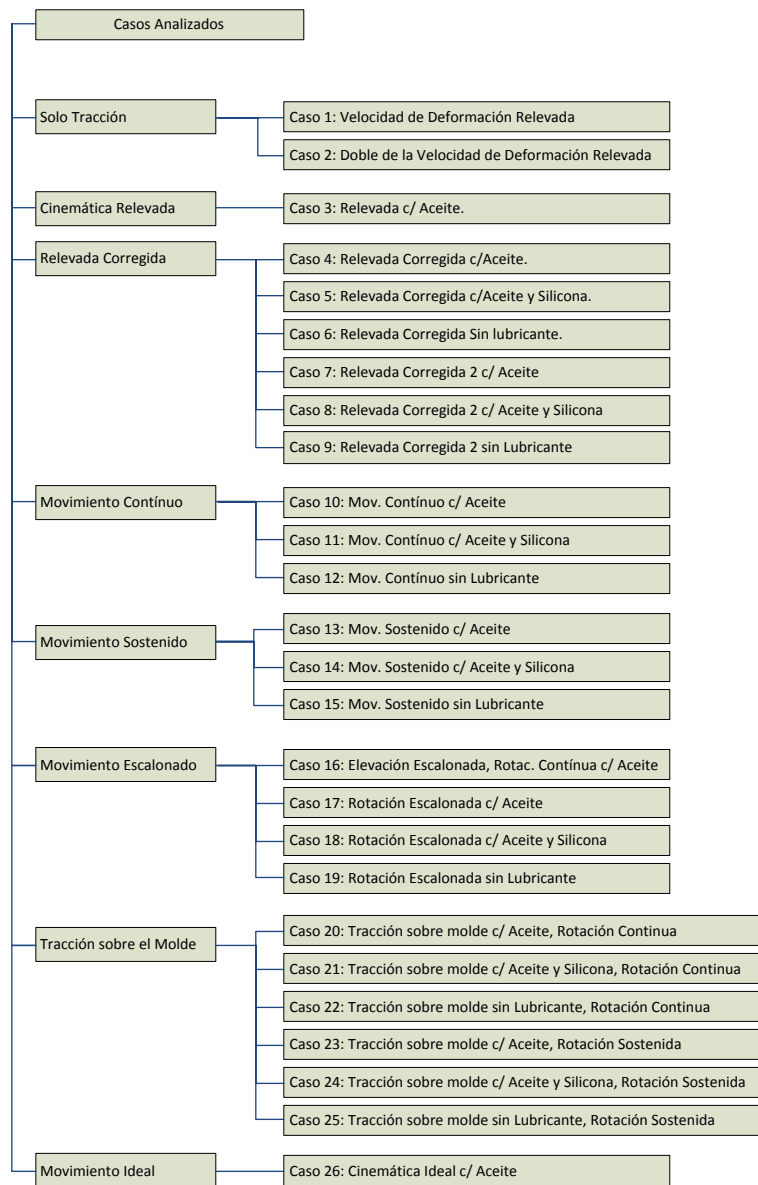


Figura 30: Combinación de casos analizados.



Figura 31: Prensa empleada.



Figura 32: Método empleado para el relevamiento de datos.

La evolución del alargamiento fue relevada mediante el uso de calibres adheridos en la superficie externa de la chapa como se observa a continuación en la Figura 33.

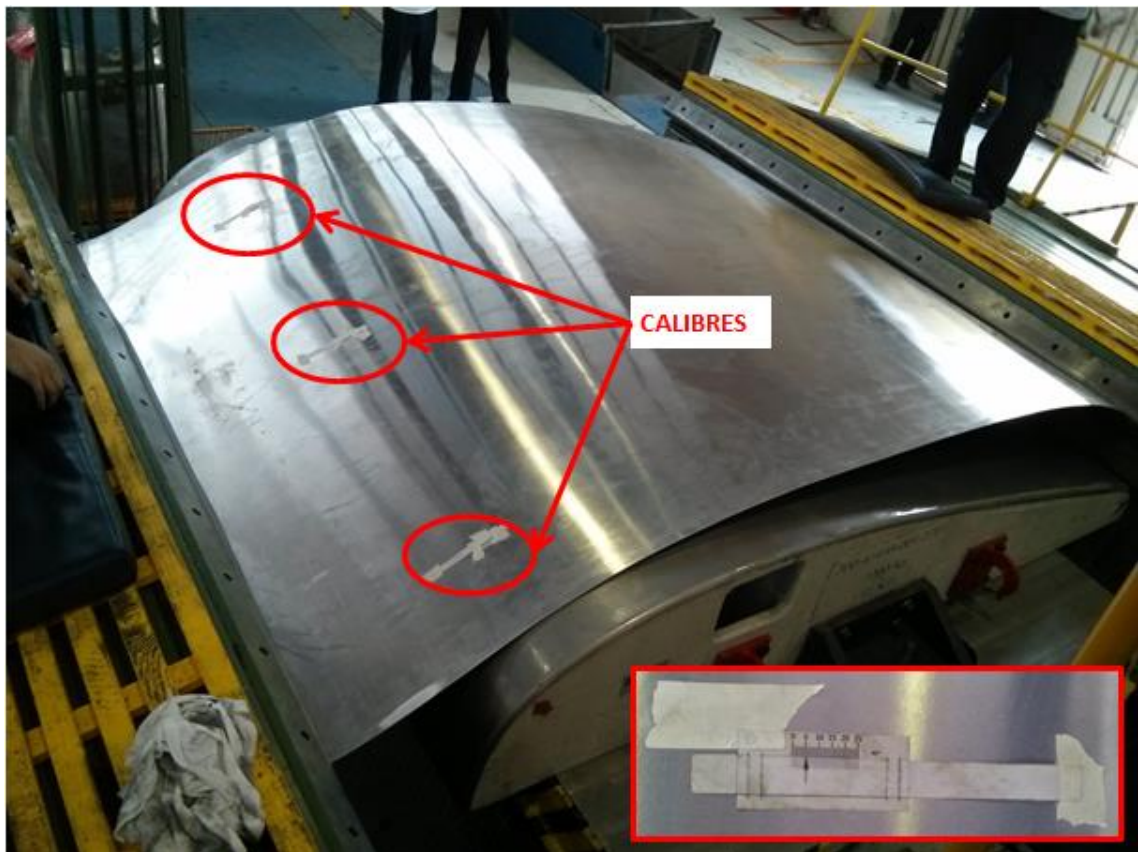


Figura 33: Calibres colocados sobre chapa a conformar.

4.3. Tracción con movimiento continuo (Caso 1).

Este caso permite evaluar si existen diferencias notables entre un estado de tracción pura como en el ensayo de tracción estándar y una tracción obtenida mediante la rotación de las mordazas de la prensa, sin contacto entre el molde y la chapa.

Para llevar a cabo esta simulación se fuerza al modelo de la prensa a adoptar una configuración que no es posible de obtener en la prensa real debido a que la mesa debería ubicarse en una posición más allá del límite inferior de la carrera vertical, ver Figura 34.

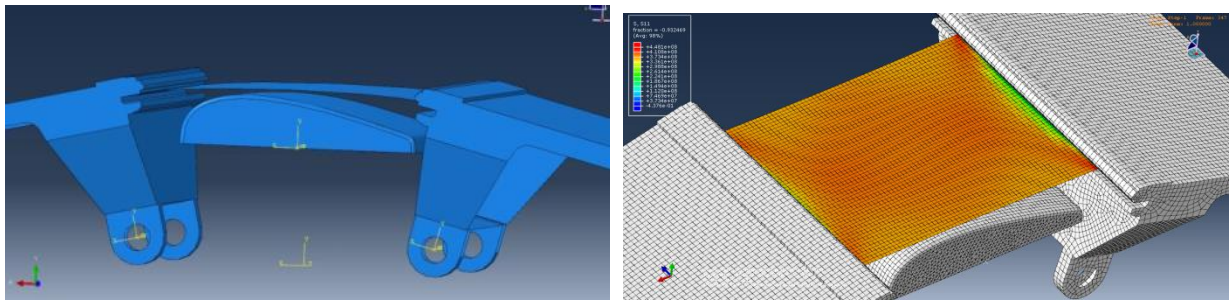


Figura 34: Pieza A, Caso 1

Para evaluar el comportamiento se analizan las tensiones y deformaciones en los tres puntos mostrados en la Figura 35, ubicados en la zona que soportará la mayor deformación durante el conformado de la pieza. En este estudio se aplican dos velocidades de deformación distintas para evaluar el efecto de ésta también, Figura 36.

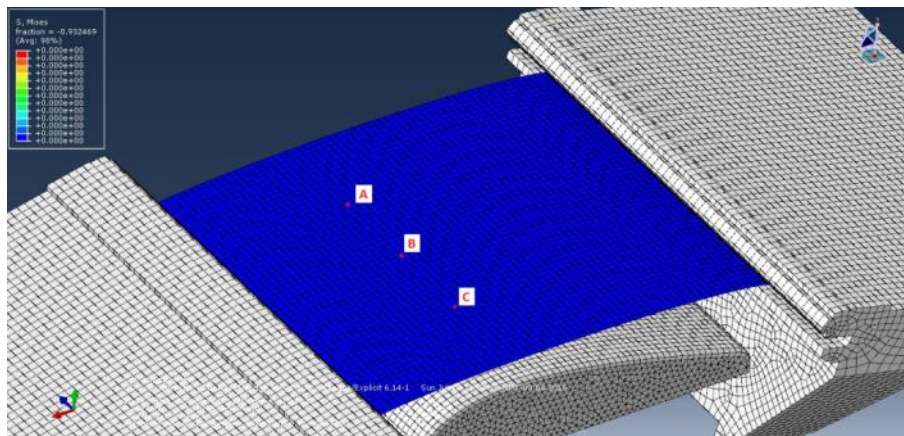


Figura 35: Pieza A, Caso 1, Nodos analizados.

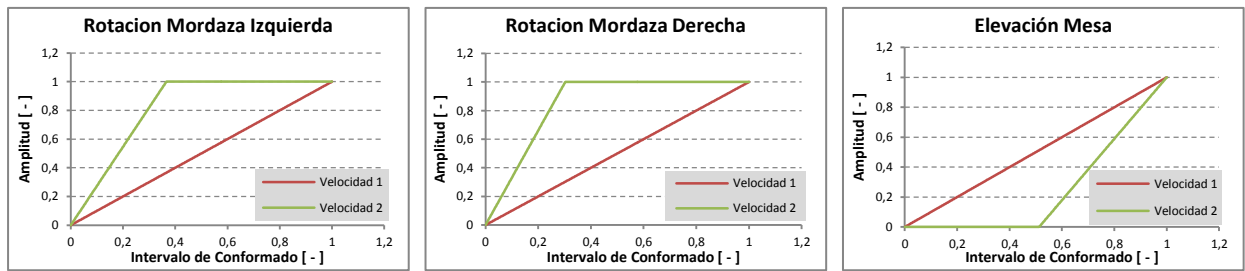


Figura 36: Velocidades de carga para tracción por rotación de mordazas.

En la Figura 37, se presentan dos juegos de curvas para cada punto. A la izquierda, las curvas tensión-deformación correspondientes a las dos velocidades de aplicación de carga, a la derecha se representan las curvas de velocidad de deformación obtenidas para cada punto.

Las gráficas permiten ver que el comportamiento del material es prácticamente el mismo que el de la aleación de aluminio de referencia, presentando diferencias sólo en el inicio de la fluencia. En la Figura 38 se muestran con mayor detalle estas diferencias.

Analizando todas las variables que pudieran causar las diferencias observadas, recordando que en la simulación del ensayo de tracción se evidenciaron las mismas diferencias respecto del material de referencia, y considerando que en ambas simulaciones los modelos de material y las leyes de endurecimiento por deformación empleadas son las mismas, se puede concluir que tales diferencias, tienen su origen en la naturaleza misma del modelo matemático. Para todos los análisis por elementos finitos presentados en este trabajo se empleó un modelo de cálculo dinámico explícito. Los análisis dinámicos explícitos son especialmente adecuados para el estudio de procesos cuasi estáticos en los que intervienen fuerzas de contacto complejas y no-linealidades, como por ejemplo los procesos de estampado, forja y conformado. Éste tipo de análisis discretiza el tiempo total del proceso en intervalos y utiliza los resultados de un intervalo para calcular el siguiente mediante el método de integración de las diferencias centrales. Una desventaja del método dinámico explícito es que el tiempo de solución es restringido por el tamaño de los elementos, lo cual puede demandar largos tiempos de cálculo.

Por otra parte, recordando que en este trabajo interesan las deformaciones plásticas en el rango del 4% al 6% y, que las diferencias observadas se encuentran acotadas a valores de deformaciones plásticas inferiores al 0.6%. Se puede considerar que estas diferencias no afectan significativamente el objetivo de éste trabajo por estar confinadas a una región muy pequeña de la curva de fluencia y despreciarlas.

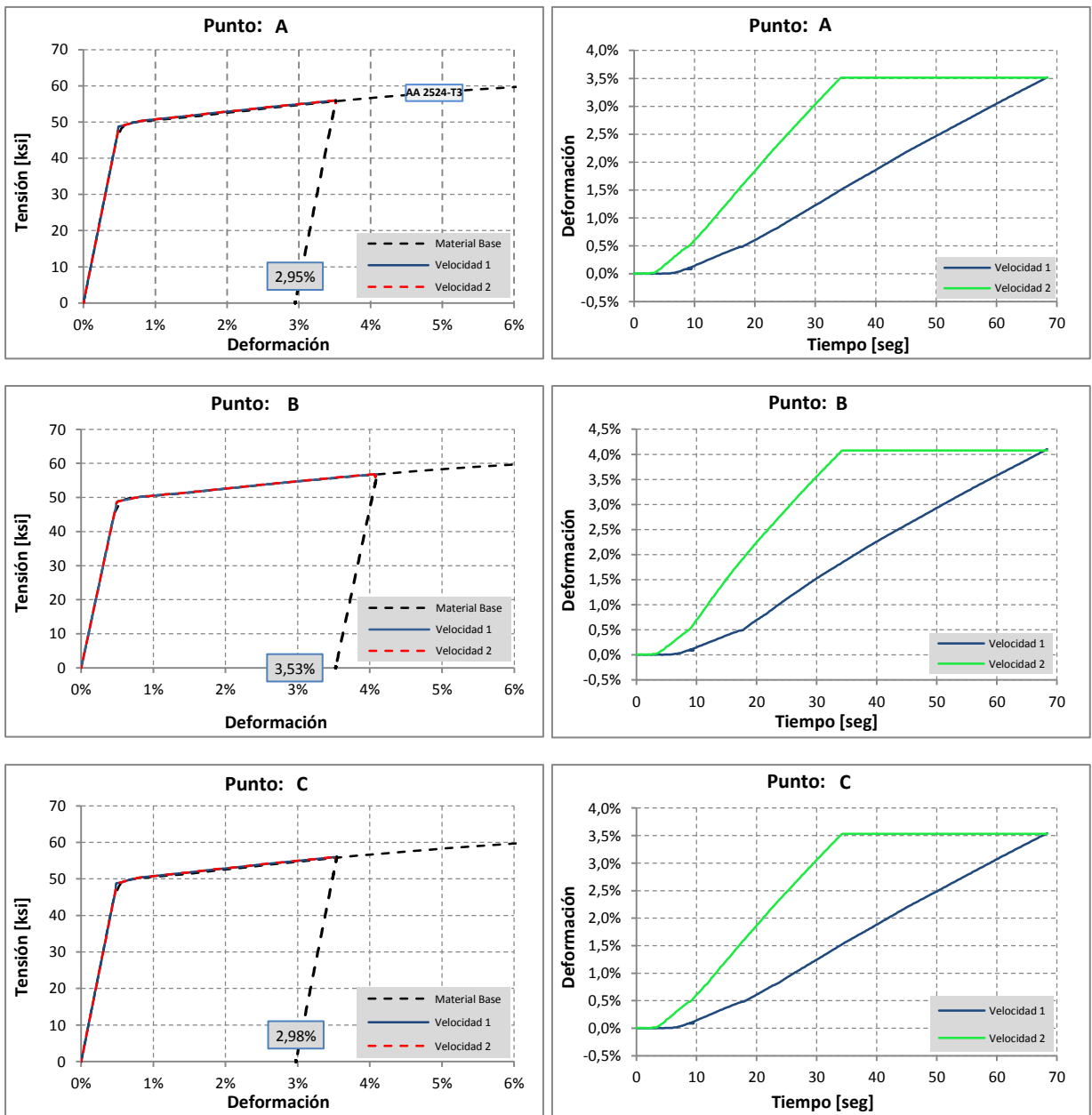


Figura 37: Curva tensión deformación para tracción pura.

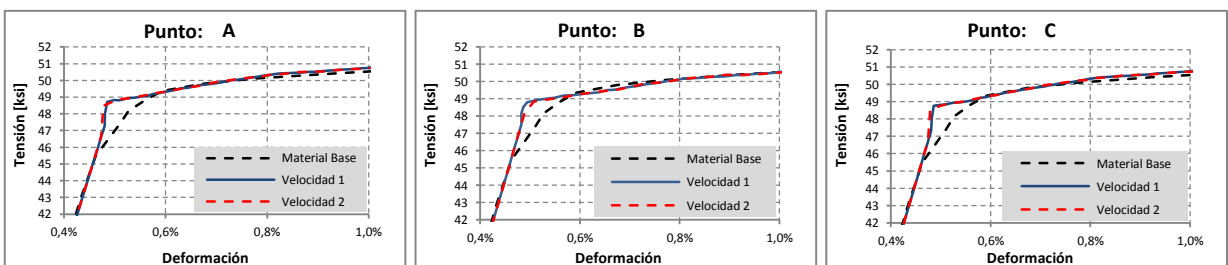


Figura 38: Detalle del inicio de la fluencia en tracción.

4.4. Cinemática relevada, con aceite (Caso 3).

Este caso muestra el comportamiento del material para las condiciones reales durante el conformado de la pieza A de la Figura 15. Las variables relevadas en el conformado son las que controlan las rotaciones y los desplazamientos de la prensa que se muestran en la Tabla 2. Como se explicó, las condiciones de carga se aplican mediante la rotación de las mordazas y la elevación del molde, ver Figura 39.

El coeficiente de fricción empleado para las interfaces con movimiento relativo se establece en 0.15, correspondiente a la lubricación con aceite, conforme se muestra en la Tabla 3 junto con otros valores del coeficiente de fricción basados en el estudio de Celal Alkaş^[5].

Variable	Parámetro controlado
BM	Rotación de la mordaza Izquierda [°]
CM	Rotación de la mordaza Derecha [°]
Z	Elevación de la Mesa [mm]

Tabla 2: Variables de control de la prensa.

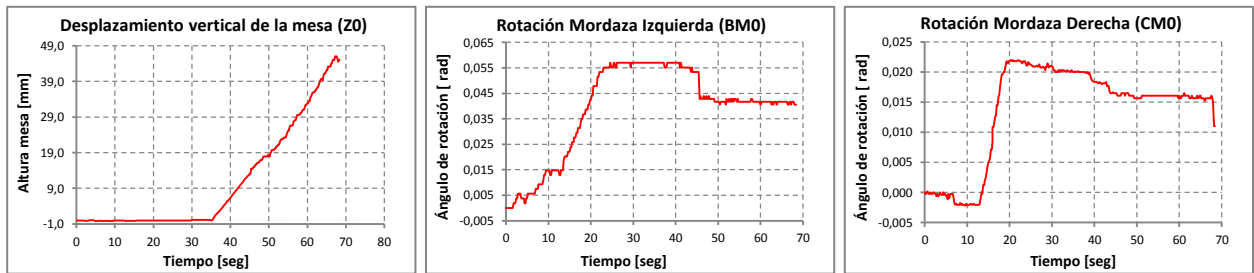


Figura 39: Condiciones de desplazamiento impuestas.

Los nodos analizados mediante el método de elementos finitos se eligen de modo que sean coincidentes con las zonas donde se montaron los calibres en el conformado del recubrimiento para relevar los alargamientos, ver Figura 41. En la Figura 40 se comparan los alargamientos relevados con los calculados a partir de la simulación por elementos finitos para los puntos A y B. Sobre el punto C no se logró realizar ésta comparativa porque el calibre no se mantuvo adherido a la chapa durante el conformado. Como se observa en las curvas los alargamientos relevados, representados en las curvas de color azul, no muestran el mismo comportamiento que las calculadas a partir del modelo matemático, en color rojo. Éstas diferencias se deben al rudimentario del sistema empleado para relevarlas y también, a que el modelo constitutivo del material simulado no es el mismo que el de la chapa conformada. Siendo más resistente el material modelado, era esperable observar menores deformaciones sobre el modelo que en la chapa. No obstante, las curvas presentan una tendencia a converger con diferencias máximas del orden del 9% sobre una longitud calibrada de 25mm. Ver detalle en Figura 33.

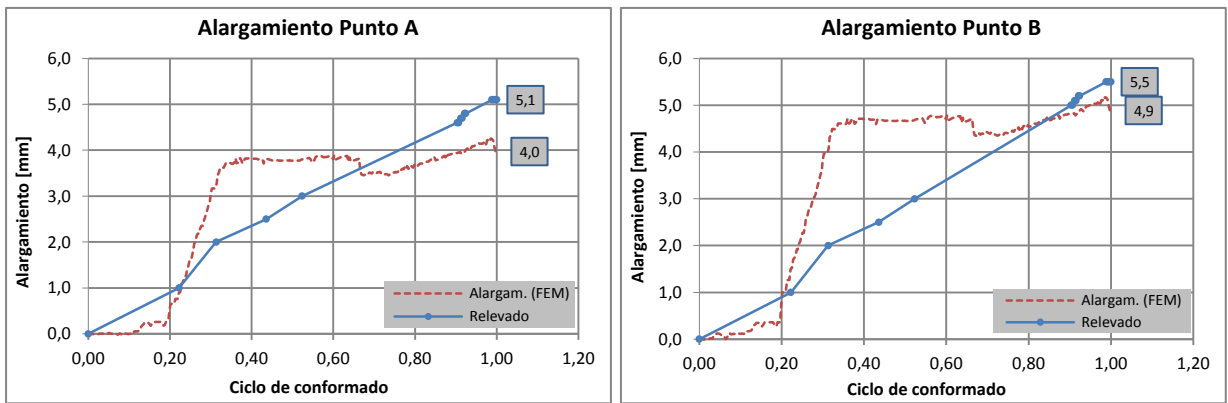


Figura 40: Alargamiento Relevado vs Simulado.

El análisis por el método de elementos finitos realizado sobre el conformado relevado arroja como resultado la serie de curvas de fluencia mostradas en la Figura 42, que presentan comportamientos algo diferentes a los obtenidos en la simulación de la tracción. La diferencia más apreciable se encuentra sobre el final del ciclo de carga, con una serie de oscilaciones con pronunciados descensos en los valores de tensión, que no son acompañados por disminuciones en las deformaciones. Estas fluctuaciones tienen su origen en retroceso en las rotaciones de las mordazas y el desplazamiento de la mesa. Si se observan las gráficas de la Figura 39 se puede apreciar que en todos los casos, después de alcanzar el valor máximo de desplazamiento o rotación, se produce una caída del mismo.

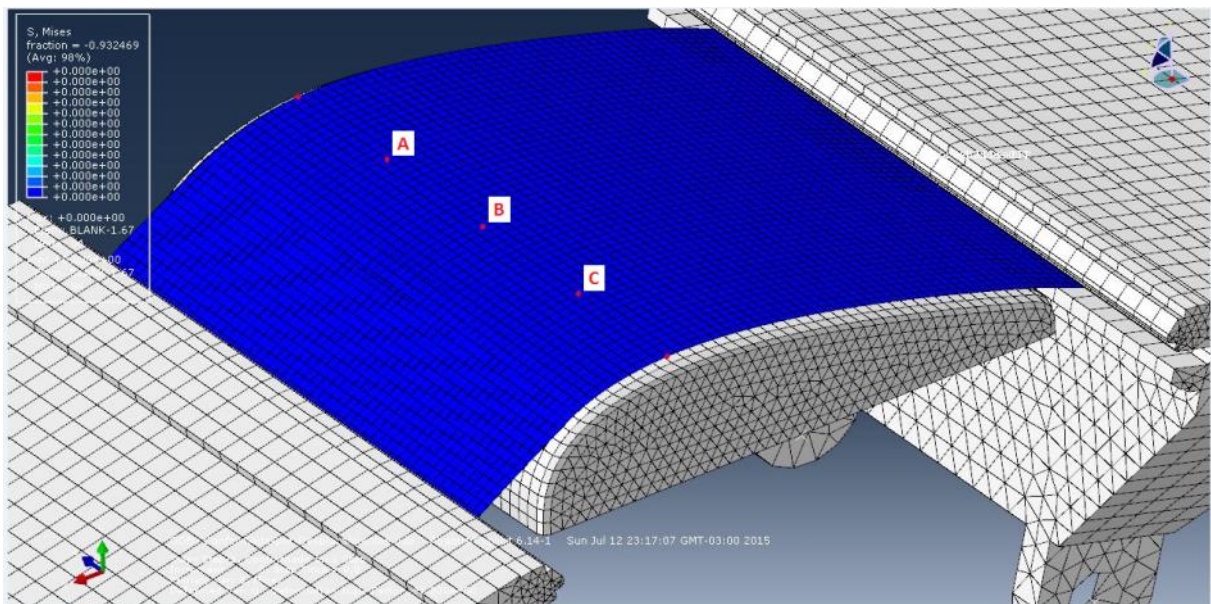


Figura 41: Nodos analizados.

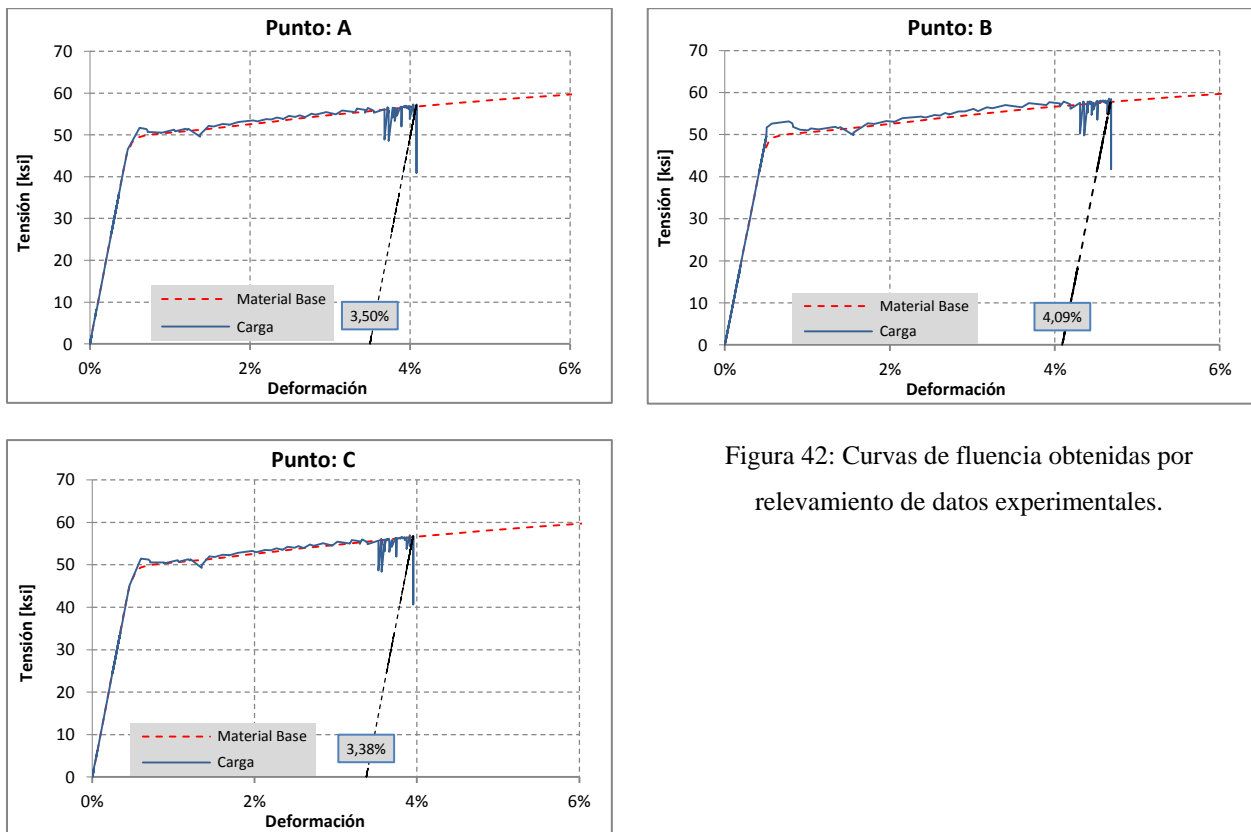


Figura 42: Curvas de fluencia obtenidas por relevamiento de datos experimentales.

Las caídas en los valores de desplazamientos de la mesa y las rotaciones de las mordazas de la prensa, respectivamente, se deben a pérdidas de presión de los cilindros hidráulicos que las accionan por el hecho de trabajar al límite de sus capacidades. Estas caídas se hacen aún más pronunciadas después unas horas de trabajo, cuando el aceite hidráulico está caliente y pierde rendimiento debido a su mayor viscosidad.

Desde el punto de vista del conformado, estas fluctuaciones limitan la posibilidad de alcanzar los valores de deformación requeridos por las especificaciones del producto, y es muy importante tenerlas en cuenta ya que pueden dar origen a fallas o inestabilidades del material a nivel intergranular, siendo las más comunes y evidentes, las llamadas bandas de Lüders y el efecto Portevin-Le Chatelier ^{[6][7][8][9][10]}.

Las bandas de Lüders delimitan regiones deformadas y no deformadas del material, están normalmente asociadas a conjuntos simples de puntos de fluencia superior e inferior en las curvas tensión-deformación, en la Figura 43 se muestra una ampliación del fenómeno descrito. Estas bandas aparecen en una concentración de tensiones, por ejemplo una marca en la chapa, al mismo tiempo que se forma la banda, la tensión desciende hasta el límite de fluencia inferior, luego se propaga a velocidad constante hacia el otro extremo de la chapa, siempre que la velocidad de deformación permanezca constante. Normalmente, estas bandas tienen una orientación de 45° respecto del eje de tracción. Cuando se han formado varias bandas de Lüders, la curva de fluencia es irregular, correspondiendo cada codo a la formación de una nueva banda. Una vez que las bandas se han propagado hasta cubrir toda la longitud de la chapa, la fluencia aumenta de manera habitual con la tensión. La apariencia que presenta la curva tensión-

deformación en el punto de fluencia se conoce como Fenómeno del Límite Elástico Aparente y se asocia normalmente a la presencia de pequeñas impurezas intersticiales o de sustitución.

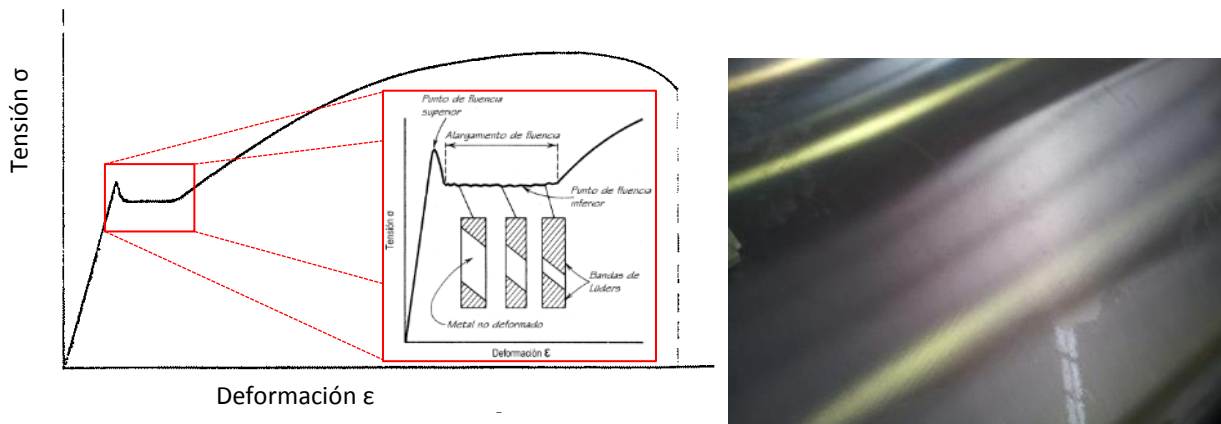


Figura 43: Representación de las bandas de Lüders en la curva tensión deformación. Aspecto de las bandas de Lüders sobre piezas conformadas por estirado.

El concepto de Cottrell atribuye el fenómeno del límite elástico aparente a la interacción de los átomos de soluto con las dislocaciones sosteniendo que, los átomos de soluto difunden hacia las dislocaciones haciendo descender la energía de deformación del cristal. La tensión a la que las dislocaciones son arrancadas de sus atmósferas de soluto, corresponde al punto de fluencia superior. Esta tensión, libera una gran cantidad de dislocaciones que precipitan en el plano de deslizamiento y se apilan en el borde del grano. La concentración de tensiones en el extremo del apilamiento se combina con la tensión aplicada en el grano vecino y libera las dislocaciones de éste. De este modo la banda de Lüders se propaga por el material pasando de un grano a otro. Actualmente se opina que la rápida caída de tensión que sigue al punto de fluencia superior, no se origina al arrancar las dislocaciones de sus atmósferas de soluto, sino por un mecanismo de multiplicación rápido de dislocaciones y porque su velocidad de movimiento es función de la tensión ^[11].

El efecto Portevin-Le Chatelier (PLC) es una inestabilidad plástica que resulta en una deformación no homogénea (localización de deformaciones). Este fenómeno involucra procesos micro-estructurales asociados a la interacción dinámica entre los átomos móviles de soluto y el deslizamiento de dislocaciones. Conocido como envejecimiento dinámico por tensión o DSA, por sus siglas en inglés. El efecto PLC es claramente visible en la superficie de una chapa ya que presenta “grupos” de líneas paralelas, también es observable en la curva de tensión-deformación mostrando una curva dentada con caídas repentinas de la tensión de deformación casi constante. Este fenómeno se observa principalmente en las aleaciones de aluminio no endurecidas con agregados de magnesio ^[12].

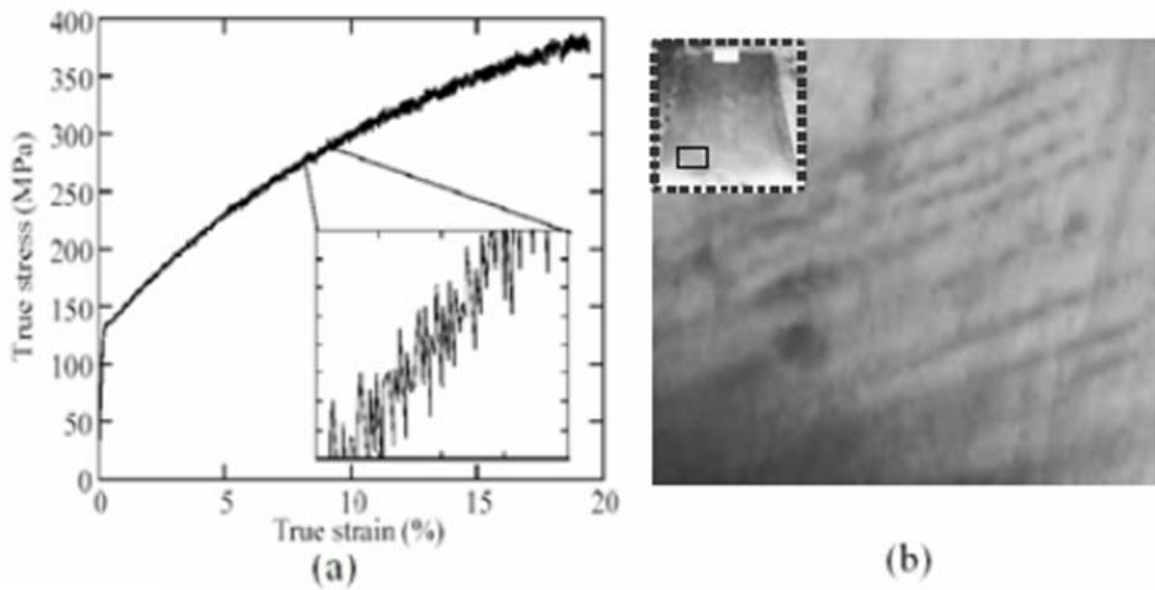


Figura 44: a) Efecto PLC sobre la curva de fluencia. b) Bandas PLC sobre una chapa plana después del estirado.

4.5. Cinemática relevada corregida (Casos 4, 5 y 6).

Con el objeto de poder estudiar el conformado independientemente de las irregularidades asociadas a la maquinaria, se define una condición de carga ideal a partir de la condición relevada en el conformado. Esta condición de carga se denomina “Relevada Corregida” y consiste en alcanzar los mismos valores máximos de desplazamientos y rotaciones que la cinemática relevada, en el mismo instante de tiempo, pero de manera continua y lineal. En la Figura 45 se representa esta condición junto con la relevada para facilitar su comprensión.

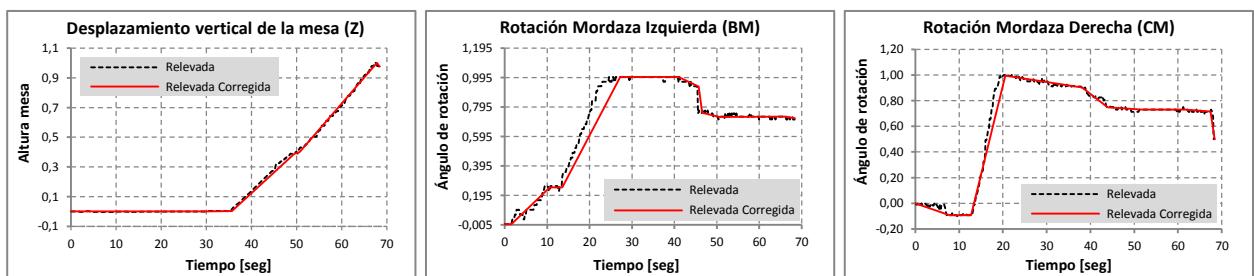


Figura 45: Cinemática relevada vs. Cinemática relevada corregida.

La cinemática corregida se aplica sobre el modelo de elementos finitos, combinándola con diferentes condiciones de lubricación para analizar la influencia de este factor en el conformado. Cabe resaltar en este punto, que en todos los casos la velocidad de aplicación de la carga es la misma.

Lubricantes	2024-O	2024-O CLAD	6061-O	7075-O	7075-O CLAD
Sin lubricante	0.2	0.25	0.2	0.175	0.2
Aceite	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Aceite + Nylon	0.1	0.125	0.1	0.1	0.1
Aceite + Silicona	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Tabla 3: Coeficientes de fricción (μ) para diferentes aleaciones de aluminio.

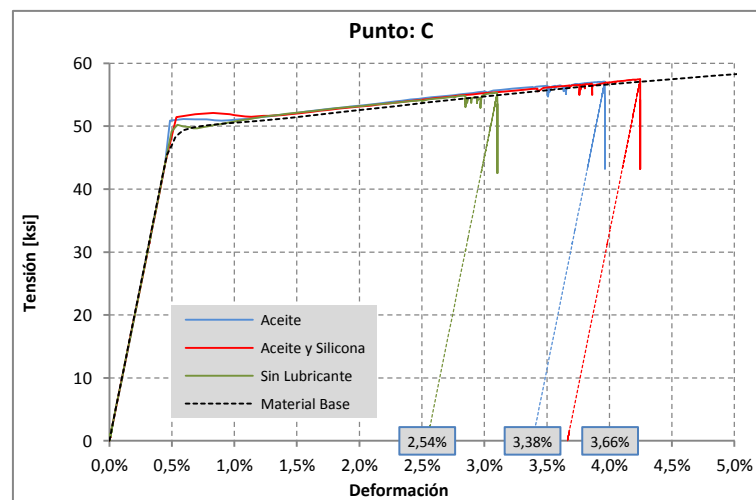
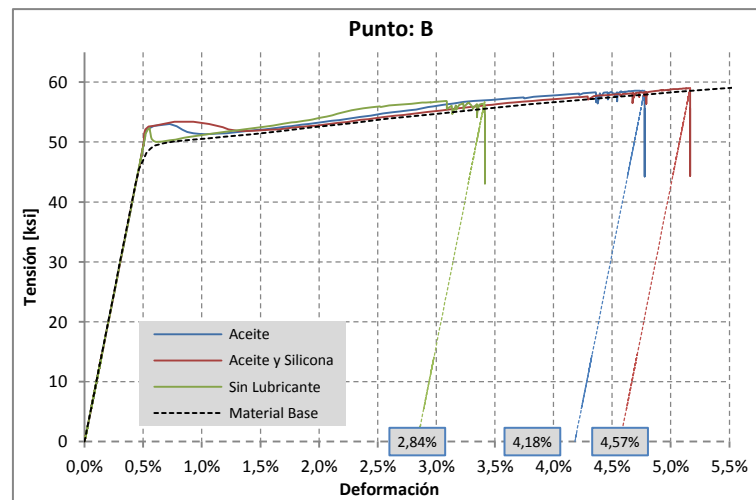
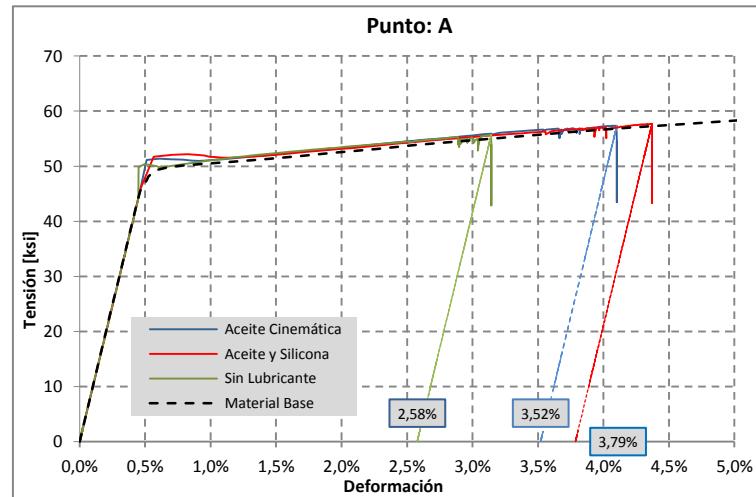


Figura 46: Cinemática Relevada Corregida, efecto del lubricante.

Al comparar las curvas de fluencia de la Figura 42 con las de la Figura 46 se observa la ausencia de fluctuaciones durante la mayor parte de la deformación plástica. Esto contribuye a reducir los factores que promueven las inestabilidades plásticas del material. Al final del ciclo de conformado, no obstante, se continúa apreciando una serie de fluctuaciones en la tensión sin variaciones en la deformación. Este fenómeno, como se verificará más adelante, está relacionado al hecho de que una vez alcanzados los valores máximos de los desplazamientos y rotaciones, estos disminuyen. Lo interesante en este punto es que si bien disminuyen continuamente, la tensión se recupera hasta llegar a los valores normales continuando así la deformación del material. Como se constató en la práctica, estas descargas repentinas están acompañadas por la formación de bandas de Lüders mostradas en la Figura 43 derecha, favorecidas además por el estado térmico de conformación (AQ/W) ^[13].

Analizando las curvas de fluencia de la Figura 46, se puede ver claramente la importancia que tiene el lubricante utilizado. Se observa que en promedio, no emplear lubricante reduce la deformación alcanzable hasta un 27.8%, mientras que emplear un mejor lubricante como la combinación de aceite y silicona permite alcanzar una deformación hasta un 8.4% mayor, sin necesidad de modificar los desplazamientos ni las rotaciones.

Las curvas de la Figura 46, también ponen de manifiesto un fenómeno que acontece en el inicio de la plastificación, sobre el cual tiene efecto el tipo de lubricante empleado para el conformado. A continuación se muestra este fenómeno con mayor detalle.

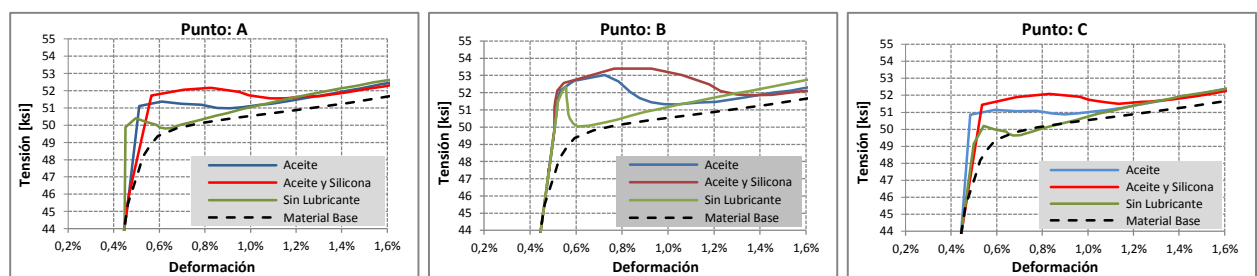


Figura 47: Cinemática Relevada Corregida. Inicio de la plastificación.

Como se concluyó en el Apartado 4.3, en el cual no hay interacción de la chapa sobre el molde, el comportamiento presentado por las curvas de la Figura 47 en el inicio de la fluencia se debe en parte al método dinámico explícito empleado en el cálculo y en parte a la interacción entre la chapa y el molde.

Algunos metales presentan este tipo de comportamiento cuando la velocidad de aplicación de la carga es muy distinta a la empleada para caracterizar el material en el ensayo de tracción estándar. Cuando la aplicación de la carga se realiza con velocidad elevada, el movimiento de las dislocaciones a través de los granos, que tiene un rango de velocidad acotado para cada material en función de la tensión, estado y temperatura, no consigue acompañar totalmente la velocidad de aplicación de las tensiones. Esto se conoce como endurecimiento por deformación. Como resultado, el material se muestra más resistente, presentando un límite de fluencia σ_y' mayor. Este tipo de comportamientos es típico en metales en estado

recocido ^[14]. El modelo constitutivo del material empleado en este trabajo no permite predecir este tipo de comportamientos. Para ello sería necesario un modelo elasto-visco-plástico. Una característica curiosa de estas curvas es que presentan la misma morfología que los materiales que experimentan restauración (DRV) y recristalización dinámica (DRX) que son fenómenos asociados al conformado en caliente. Puede verse que la forma y velocidad de esta pseudo-restauración dinámica depende esencialmente del lubricante empleado.

La interacción entre la chapa a conformar y el molde se combina con otro factor que influye en el comportamiento observado, el complejo estado de tensiones a que está sometida una chapa durante el estirado. Las tensiones actuantes no son puramente de tracción, sino que son a una combinación de tensiones de tracción, flexión y tensiones originadas por las fuerzas de rozamiento representadas en la Figura 48 ^[15].

Se observa que cuanto mayor son las fuerzas de rozamiento F_r , más rápida es la pseudo-restauración dinámica del material. Desde el punto de vista de las tensiones, este es un comportamiento favorable, sin embargo, como se vio en el apartado 4.4 este comportamiento también promueve inestabilidades plásticas comprometiendo la resistencia estructural de la pieza conformada.

Cuanto mejor es el lubricante empleado, no sólo se obtienen mayores deformaciones sobre la chapa, sino que la calidad de éstas también mejora. Por otra parte, el aumento de tensión necesario al emplear un mejor lubricante no supera el 2% como se observa sobre el punto C en el cuál la tensión inicial de fluencia pasa de 51.1489 ksi a 52.0878 ksi cuando empleamos aceite y silicona en lugar de sólo aceite.

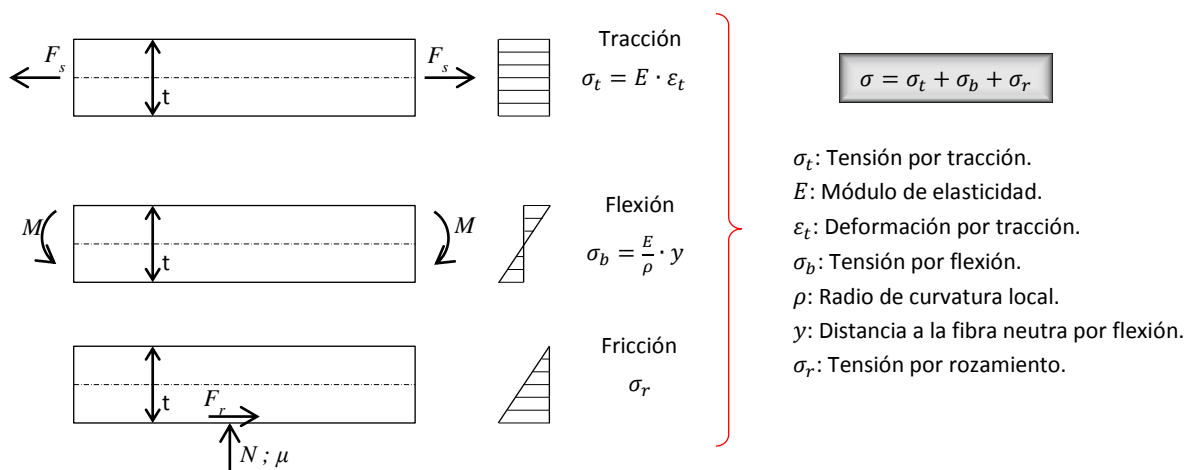


Figura 48: Tensiones actuantes sobre un elemento de chapa en el conformado por estirado.

Las expresiones de las tensiones involucradas en el conformado por estirado de la Figura 48 ponen en evidencia la influencia de la geometría del molde. Analizando la expresión de las tensiones por flexión vemos que cuanto menor es el radio de curvatura local del molde, mayor debe ser la tensión por flexión para lograr que la chapa copie adecuadamente el molde.

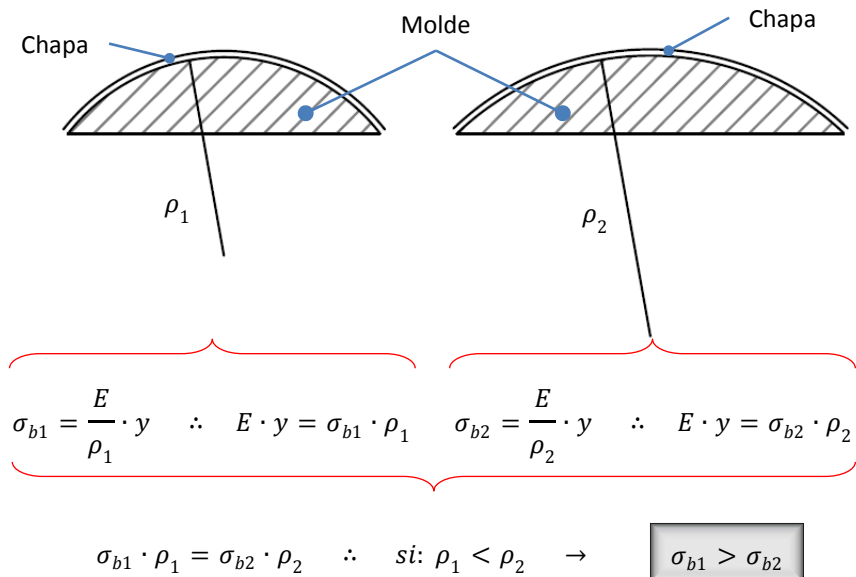


Figura 49: Influencia del radio de curvatura local en las tensiones por flexión.

Por su parte, el efecto del radio de curvatura sobre las tensiones por rozamiento es inverso al efecto sobre las tensiones por flexión, es decir que cuanto mayor es el radio de curvatura local, mayores son las tensiones por rozamiento que generan, como se ilustra en la Figura 50 para igual valor de fuerza vertical sobre el molde.

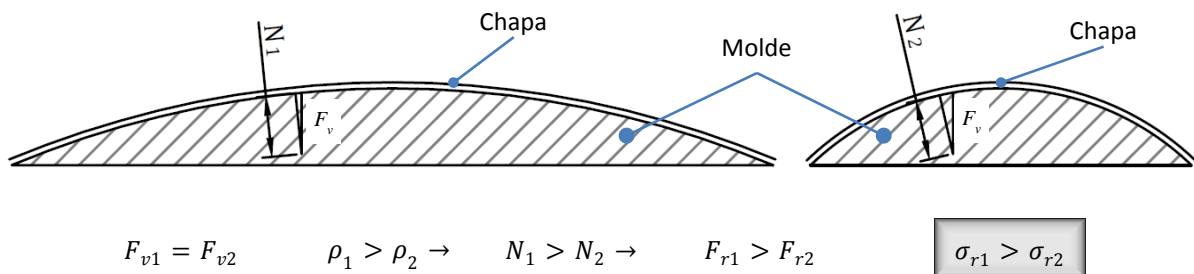


Figura 50: Influencia del radio de curvatura local sobre las tensiones por rozamiento.

4.6. Movimiento continuo (Casos 10, 11 y 12).

En el apartado anterior se plantearon algunas hipótesis sobre el efecto que tenía en el conformado, la reducción del desplazamiento del molde y de la rotación de las mordazas luego de alcanzar sus valores máximos, se dijo que las fluctuaciones presentadas hacia el final del ciclo de carga en las curvas de fluencia provenían de este comportamiento de la prensa. Pues bien, para validar ésta hipótesis se define una nueva condición de carga denominada “Cinemática de Movimientos Continuos”. Esta condición consiste en aplicar el máximo valor de desplazamiento y rotación relevados de manera lineal y continua desde el inicio del ciclo de conformado hasta su finalización. Igual que en el caso anterior, en la Figura 51

se muestra esta condición de carga aplicada sobre el modelo de elementos finitos, junto con la condición relevada para resaltar sus diferencias.

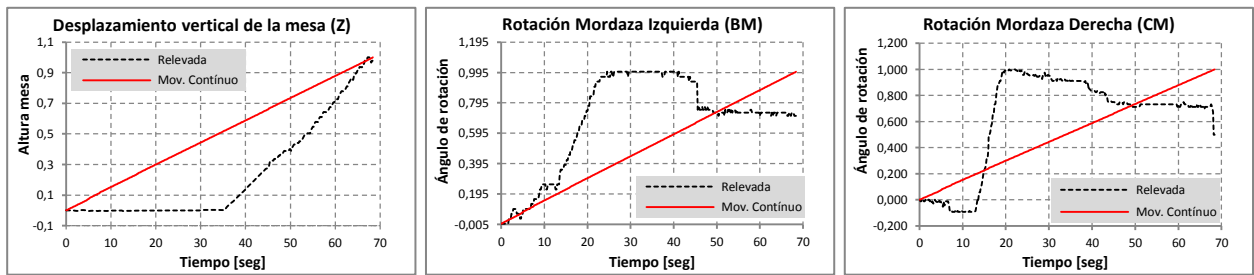


Figura 51: Cinemática de Movimientos Continuos.

Siguiendo la misma metodología empleada en el punto anterior, a continuación se muestran las curvas de fluencia obtenidas al aplicar los movimientos continuos en el modelo de elementos finitos. Cabe resaltar que se analizan los mismos puntos de la Figura 41.

Las curvas de la Figura 52 confirman la hipótesis planteada respecto del origen de las oscilaciones en las curvas de fluencia hacia el final del ciclo de conformado. Se verifica que si los desplazamientos y rotaciones no disminuyen, no se producen descargas repentinas. Esto contribuye significativamente a eliminar una de las variables que propician la formación de las bandas de Lüders y del efecto Portevin-Le Chatelier.

En el inicio de la plastificación se continúa observando los mismos comportamientos que con la cinemática relevada, esto permite deducir que este comportamiento es independiente de lo que sucede con la cinemática del molde y las mordazas hacia el final del ciclo de conformado, a la vez que refuerza la hipótesis de que este comportamiento está asociado a parámetros como el estado tensional, las condiciones de lubricación y la interacción entre la chapa y el molde hasta que se establece una condición de deslizamiento favorable.

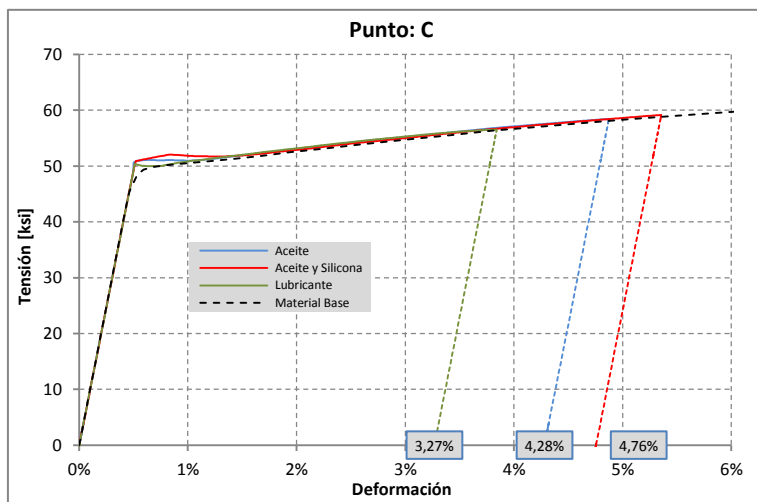
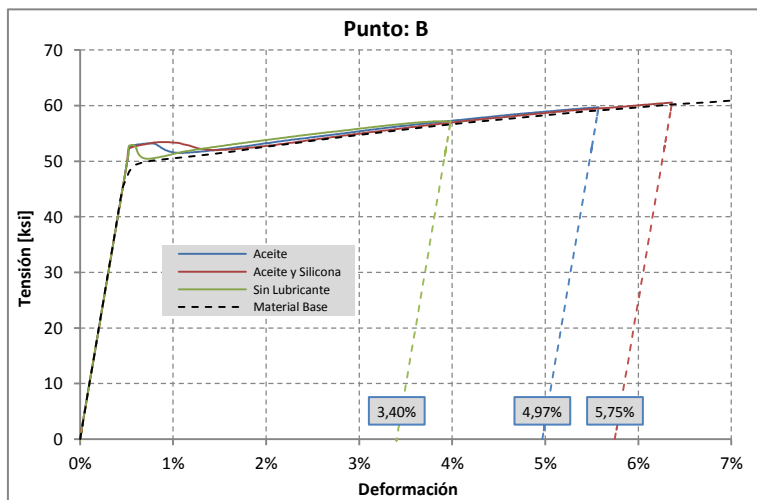
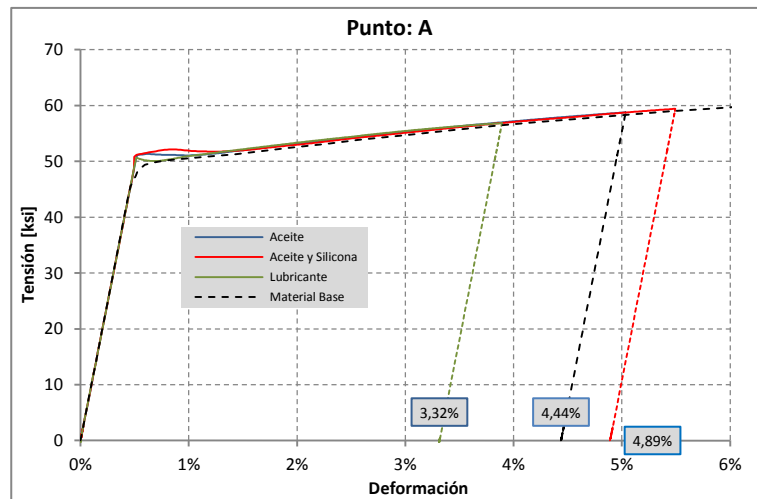


Figura 52: Cinemática de Movimientos Continuos, efecto del lubricante.

El efecto del lubricante es coherente con el observado en el caso de la cinemática relevada. Como muestran las curvas de fluencia de la Figura 52, la aplicación continua del desplazamiento del molde y de las rotaciones de mordazas permite aumentar significativamente el umbral de deformación plástica

alcanzado. En la Tabla 4 se presentan las deformaciones plásticas obtenidas comparadas con el caso anterior.

Punto	Lubricante	Cinemática		Variación
		Relevada Corregida	Mov. Continuos	
A	Aceite	3.52%	4.44%	Aumenta: 26.13%
	Aceite y Silicona	3.79%	4.89%	Aumenta: 29.02%
	s/ Lubricante	2.58%	3.32%	Aumenta: 28.68%
B	Aceite	4.18%	4.97%	Aumenta: 18.89%
	Aceite y Silicona	4.57%	5.75%	Aumenta: 25.82%
	s/ Lubricante	2.84%	3.40%	Aumenta: 19.72%
C	Aceite	3.38%	4.28%	Aumenta: 26.63%
	Aceite y Silicona	3.66%	4.76%	Aumenta: 30.05%
	s/ Lubricante	2.54%	3.27%	Aumenta: 28.74%

Tabla 4: Deformaciones Plásticas. Comparación

Los valores de las deformaciones plásticas muestran que aun en el caso más desfavorable de conformado, es decir sin lubricante, una mejora en la cinemática representa un aumento promedio del 25.7% en la deformación obtenida. Para el caso de la lubricación con aceite el promedio de aumento es del 23.8% y, en el caso de la combinación de aceite y silicona la mejora promedio es del 28.3%.

4.7. Movimiento Sostenido (Casos 13, 14 y 15).

Para analizar con mayor detalle el efecto de la velocidad de aplicación de la carga, se simula sobre el modelo de elementos finitos una condición de carga denominada “Cinemática de Movimiento Sostenido”, representada en la Figura 53.

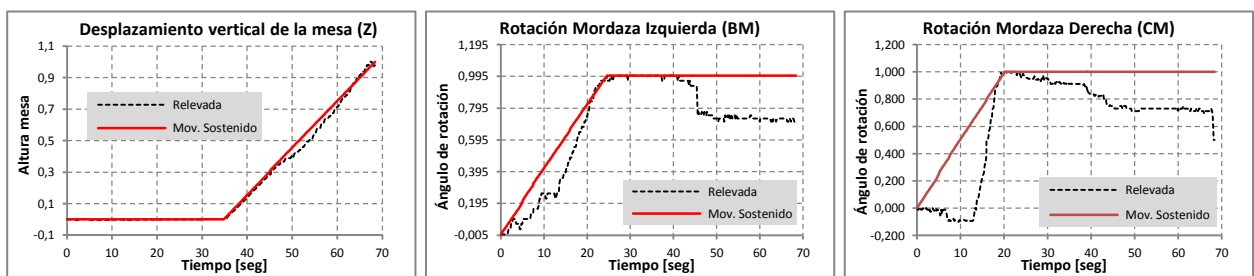


Figura 53: Cinemática de Movimiento Sostenido.

Esta condición de carga impone una variación lineal del desplazamiento del molde y de las rotaciones de las mordazas, pero a diferencia de la Cinemática de Movimiento Continuo, el instante en que comienzan y terminan las variaciones coincide en el tiempo con la Cinemática Relevada. Desde este punto de vista, constituye una idealización de la cinemática relevada.

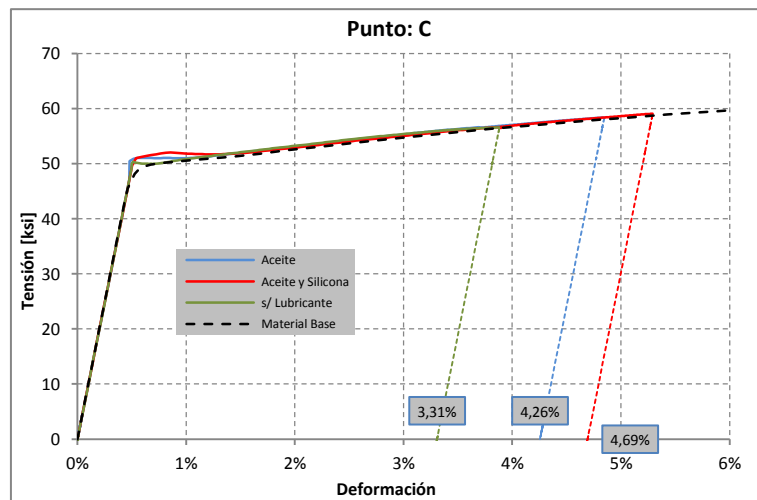
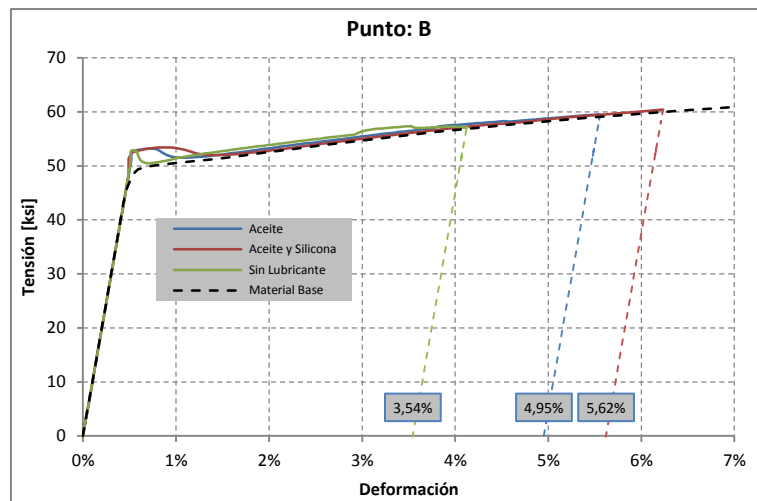
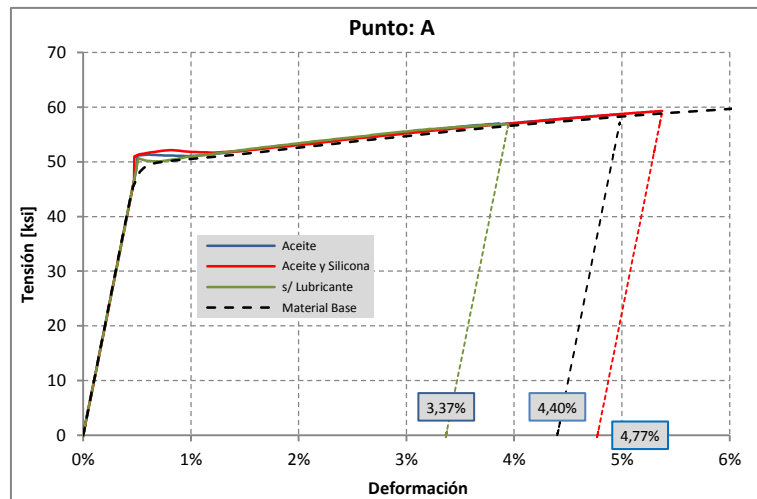


Figura 54: Cinemática de Movimientos Sostenidos, efectos del lubricante.

En las curvas de fluencia determinadas bajo esta hipótesis de carga, mostrada en la Figura 54, podemos ver que sigue aconteciendo el fenómeno de interacción entre la chapa y el molde al inicio de la plastificación como en los casos anteriores.

La influencia del lubricante también es coherente con los casos anteriores, pero se observa que al aumentar la velocidad de aplicación de la carga, el material presenta un comportamiento disímil. En comparación con la cinemática relevada, las deformaciones plásticas obtenidas siguen siendo mayores. Pero al compararlas con la cinemática de movimientos continuos se observan algunas particularidades. Las deformaciones plásticas resultantes disminuyen cuando se emplean lubricantes y aumentan cuando se conforma sin éste. Se deduce que la explicación a este comportamiento yace en la naturaleza de las fuerzas de rozamiento. Siendo mayor el coeficiente de rozamiento estático que el dinámico, cuanto más rápido se produzca el movimiento relativo de las superficies en contacto, menores serán las fuerzas de rozamiento y con ello su influencia en el conformado. Luego, al comparar dos conformados sin lubricación es de esperar que aquél que se realice más rápido sea también el que alcance mayores deformaciones.

4.8. Cinemática de Movimientos Escalonados (Casos 16, 17, 18 y 19).

Una práctica muy frecuente en el conformado por estirado controlado manualmente por un operario, es que éste ejecute los movimientos de la prensa de manera discontinua, corrigiendo permanentemente la incidencia del molde sobre la chapa. Esta razón es justificativo suficiente para que una vez analizados los conformados con movimientos continuos se estudie el efecto que producen los movimientos discontinuos sobre la chapa.

Para lograr este objetivo se emplean dos cinemáticas diferentes que se imponen al modelo de elementos finitos por separado, primero se define la “Cinemática de Elevación Escalonada” del molde, luego la “Rotación Escalonada” de las mordazas, mostradas en la Figura 55 y Figura 56 respectivamente.

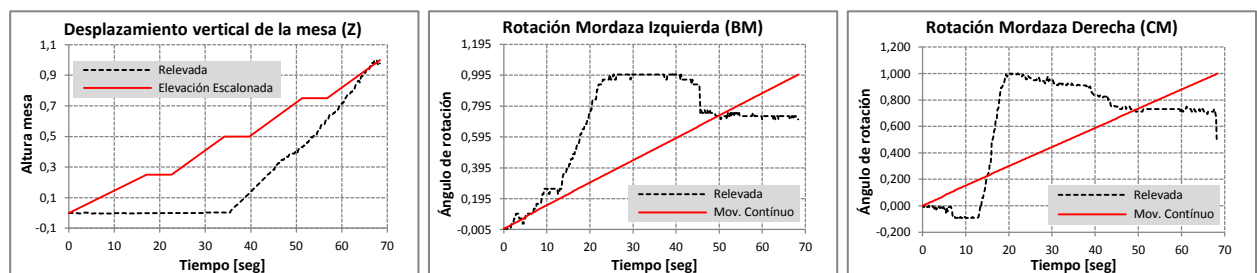


Figura 55: Cinemática de Elevación Escalonada.

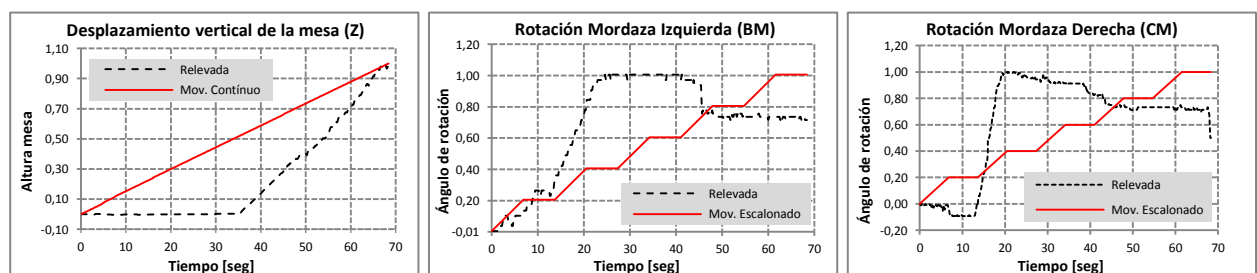


Figura 56: Cinemática de Rotación Escalonada.

Las curvas de tensión-deformación para la elevación escalonada resultan:

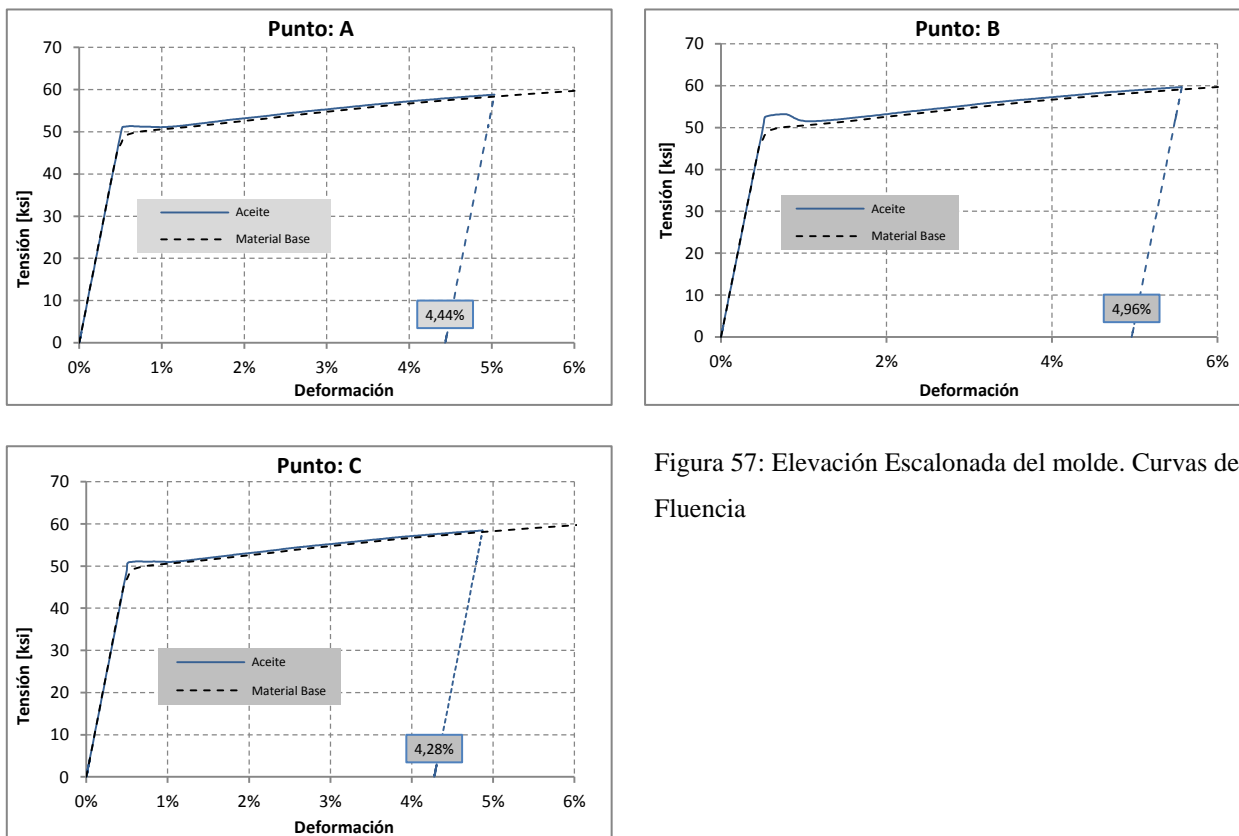


Figura 57: Elevación Escalonada del molde. Curvas de Fluencia

Observando las curvas de la Figura 57 y la Figura 58 se puede apreciar que para las situaciones de carga analizadas no se presentan los factores que promueven inestabilidades plásticas a pesar de la aplicación discontinua de esfuerzos, a excepción del conformado sin lubricante.

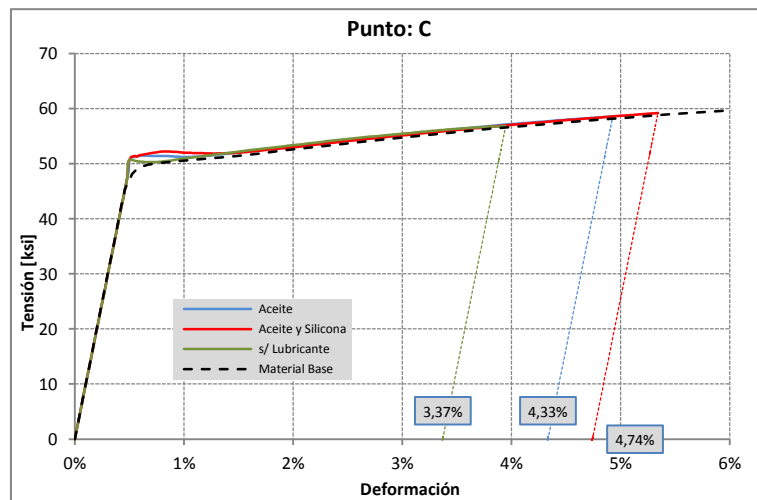
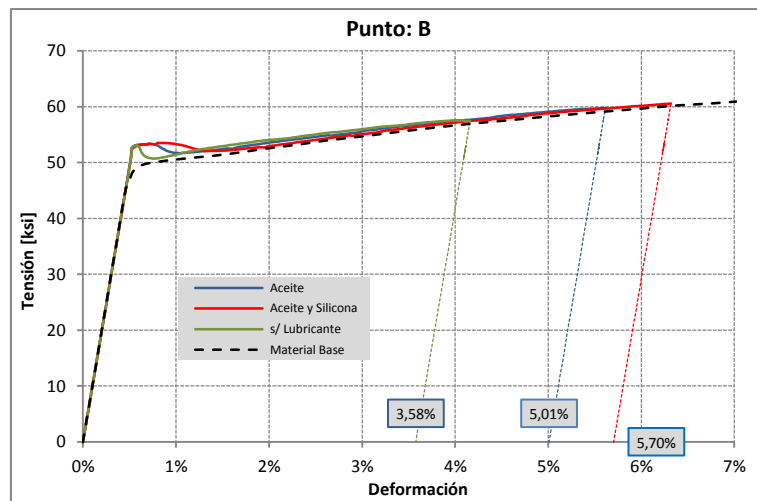
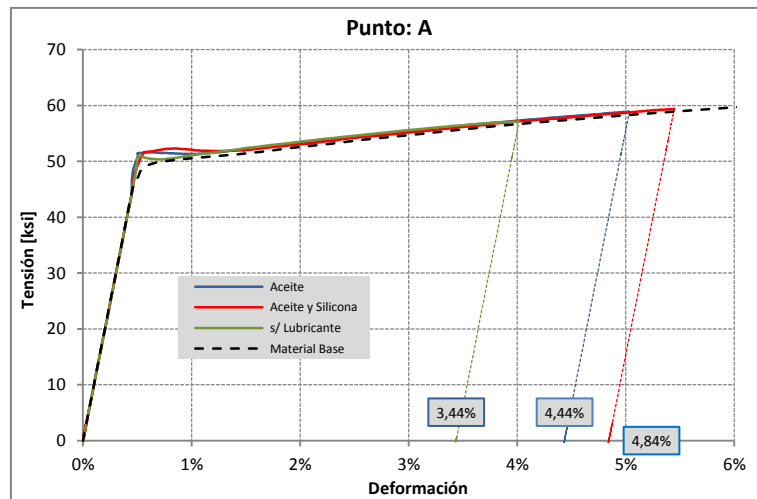


Figura 58: Rotación Escalonada. Efecto del Lubricante

Comparando las curvas obtenidas para la Rotación Escalonada con las correspondientes a la Cinemática de Movimiento Continuo (ver Figura 52) puede notarse que no hay prácticamente diferencia en la deformación plástica acumulada en la pieza. De hecho, bajo la hipótesis de un conformado sin lubricación, sería posible inclusive obtener deformaciones levemente mayores que las respectivas

asociadas a cinemáticas de movimiento continuo o sostenido. Esto refuerza las conclusiones obtenidas respecto del efecto de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico

4.9. Efecto de la cinemática del conformado.

Hasta aquí se han presentado los resultados relevados y simulados que se obtienen al cambiar de lubricante para una cinemática determinada. En este punto se presentarán y discutirán los efectos específicos de la cinemática sobre el conformado, estudiando las características que presentan las distintas técnicas de conformado para una condición de lubricación dada.

Solo se tratarán los casos de lubricación con aceite y de lubricación combinada de aceite y silicona, considerando ésta última como una mejora del proceso. No se considera el caso de conformado sin lubricante por ser un método que no se emplea en la práctica para la fabricación de piezas.

En la Figura 59 se muestran las curvas tensión-deformación obtenidas para todas las cinemáticas empleando aceite como medio lubricante. Todas las curvas presentan gran similitud, siendo la diferencia más evidente el umbral de deformación plástico alcanzado para la cinemática relevada que se encuentra muy por debajo del obtenido en las simulaciones de las otras cinemáticas. En la zona central del blank por ejemplo, para la cinemática relevada se obtiene un 4.09% de deformación plástica, mientras que para las otras técnicas de movimiento el rango de deformaciones alcanzables varía desde 4.95 a 4.97%, siendo la Rotación Escalonada y el Movimiento Sostenido las cinemáticas asociadas a los valores máximos y mínimos respectivamente.

De modo similar, se puede observar que en el caso de la lubricación con aceite y silicona las curvas de fluencia resultan semejantes y nuevamente la cinemática relevada presenta el idéntico comportamiento al caso anterior. Se observa también una marcada diferencia en el rango de deformaciones plásticas alcanzadas en relación a la lubricación con aceite, siendo mayores incluso para la cinemática más desfavorable. Ver Figura 60.

Dejando de lado la cinemática relevada, una vista detallada de las deformaciones plásticas permanentes permite ver que el límite inferior corresponde a la Cinemática de Movimientos Sostenidos, pero que dependiendo del tipo de lubricante empleado, el límite superior está asociado a la Rotación Escalonada de las mordazas o al Movimiento Continuo como se representa de manera esquemática en la Figura 63.

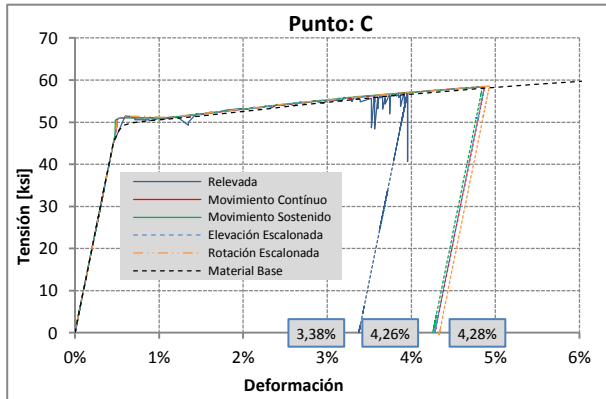
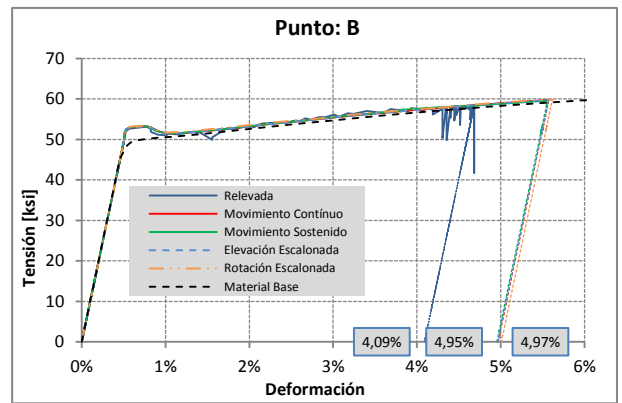
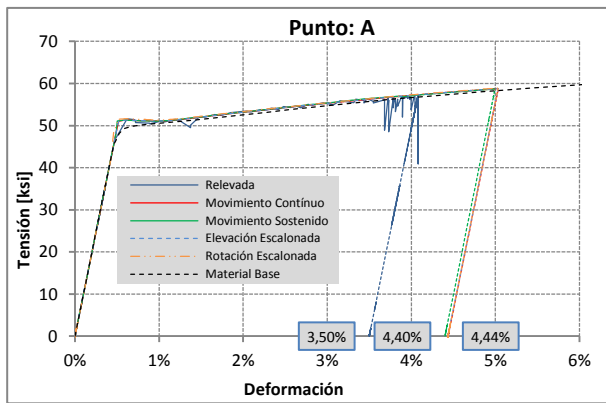


Figura 59: Conformado con aceite. Influencia de la cinemática

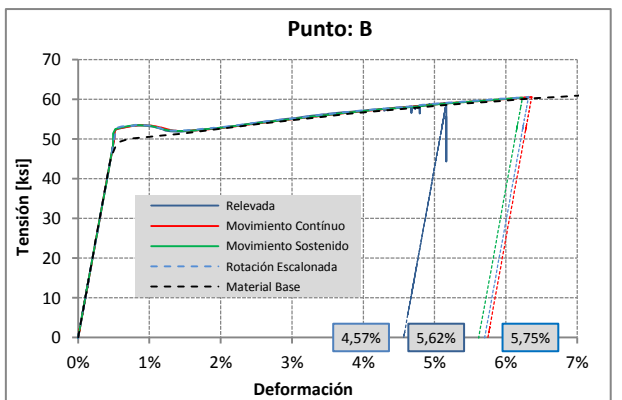
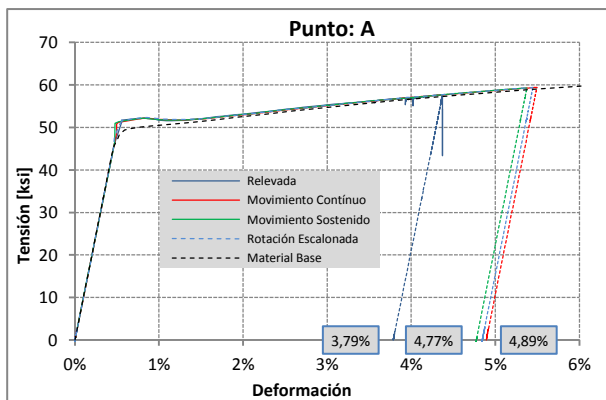
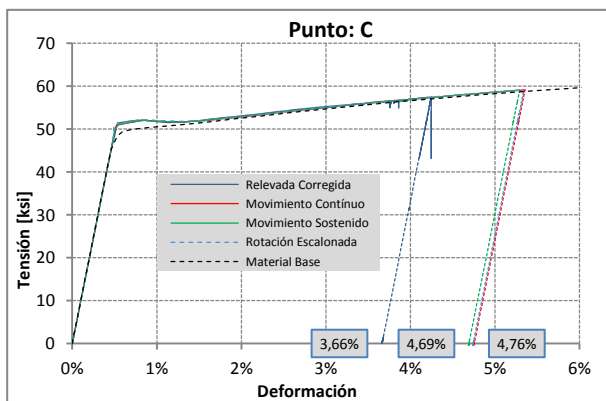


Figura 60: Conformado con aceite y silicona. Influencia de la cinemática.



En las curvas de la Figura 61 y de la Figura 62 se presenta con mayor detalle el comportamiento del material en el inicio de la plastificación dónde puede verse la ya mencionada pseudo-recuperación dinámica.

Estas curvas refuerzan las conclusiones obtenidas anteriormente mostrando que para un determinado material el comportamiento en el inicio de la fluencia depende sólo del material, su estado térmico y la interacción entre el molde y la chapa hasta alcanzar condiciones de deslizamiento estables. Siempre que se emplee el mismo tipo de lubricante la influencia de la cinemática no tiene efectos significativos sobre las primeras etapas de la plastificación, dentro del rango de velocidades usuales de conformado.

La reducción de las fuerzas de rozamiento, contribuye a atenuar los factores que propician las inestabilidades plásticas en la cercanía del punto de fluencia, a la vez que permite alcanzar mayores deformaciones plásticas permanentes.

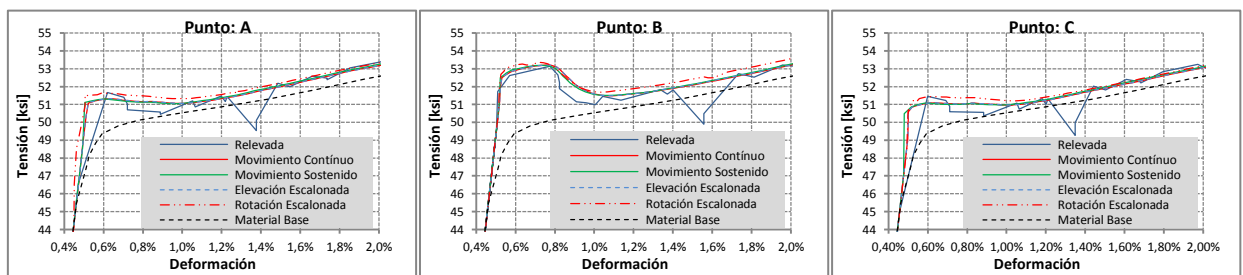


Figura 61: Conformado con aceite. Inicio de la plastificación

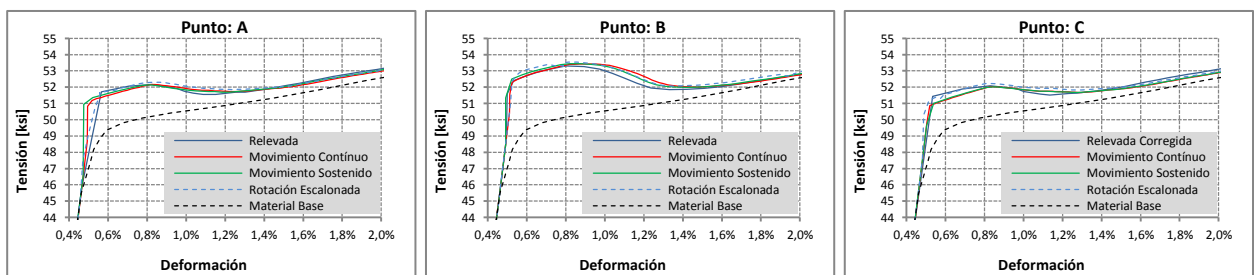


Figura 62: Conformado con aceite y silicona. Inicio de la plastificación.

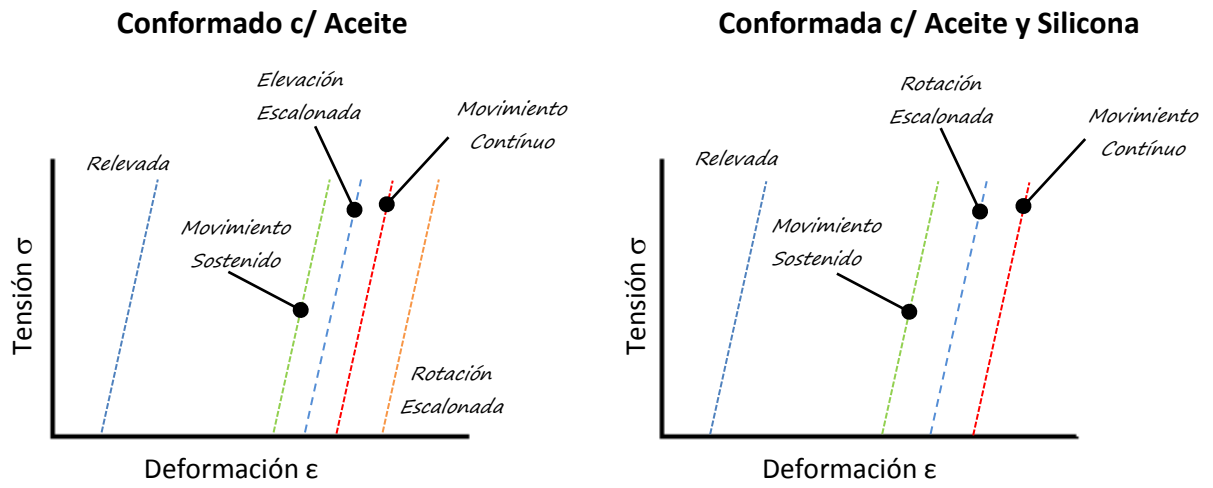


Figura 63: Deformaciones plásticas alcanzables.

5. FUERZA NECESARIA PARA EL CONFORMADO.

En esta sección se presentan dos aproximaciones comúnmente empleadas para determinar la fuerza necesaria para el conformado por estirado, se comparan con los valores obtenidos mediante la simulación por elementos finitos y se discuten algunas de las diferencias más notables entre ellas.

5.1. Primera aproximación: Tracción simple.

En algunos textos es posible encontrar este método como una forma para determinar la fuerza necesaria para conformar una pieza por estirado. Según este método el esfuerzo que se necesita para producir la elongación de la chapa se determina como si se tratara de un estado de tracción simple. No toma en consideración el efecto del rozamiento, la interacción entre el molde y la chapa, ni tampoco considera la influencia de la curvatura. Además, este método no considera la deformación plástica que se desea sobre la pieza conformada.

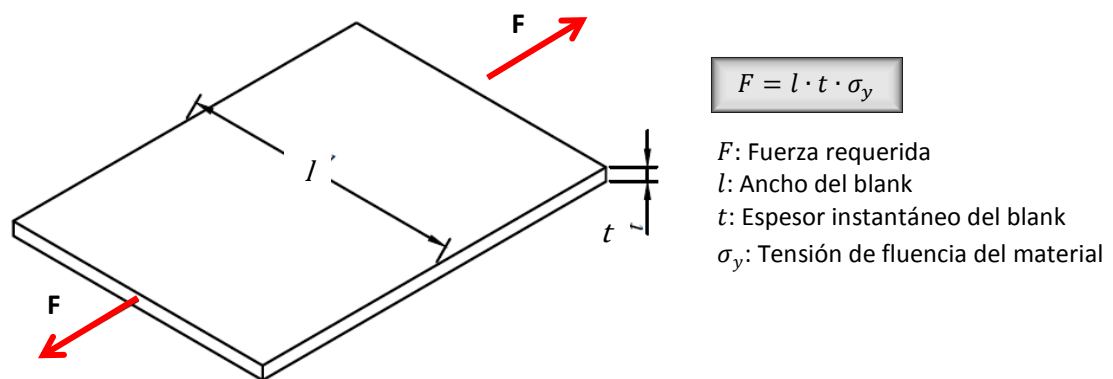


Figura 64: Fuerza requerida. Aproximación por tracción simple.

5.2. Segunda aproximación: Método ACB, Aerospace Metal Forming ^[16].

Este método es el sugerido por la empresa ACB Aerospace Metal Forming, fabricante de más del 80% de las prensas de conformado por estirado del mundo. Como se muestra en la Figura 65, la fuerza necesaria para conformar una chapa según ésta propuesta, se basa en la determinación de una tensión límite promedio entre la tensión de fluencia y la de rotura del material. Si bien éste método es más ajustado a la realidad que el anterior, tampoco considera los efectos de interacción entre el molde y la chapa, la configuración geométrica del molde ni la deformación plástica requerida sobre la pieza conformada.

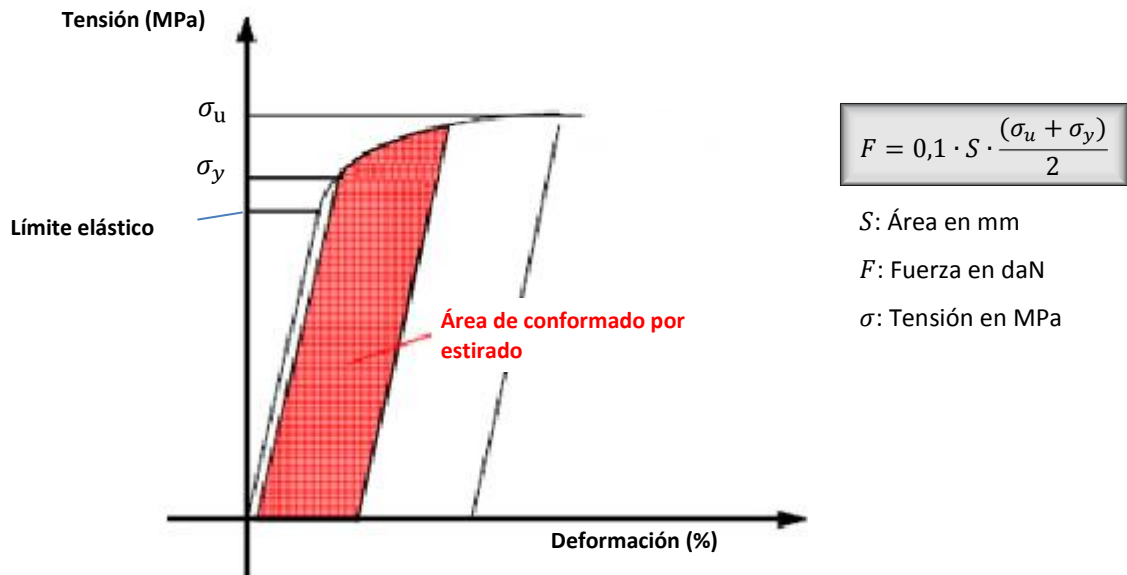


Figura 65: Fuerza requerida. Método ACB, Aerospace Metal Forming.

5.3. Comparación de resultados.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la determinación de la fuerza necesaria para el conformado de la pieza estudiada en este trabajo. En primera instancia se presentan los resultados obtenidos con los dos métodos mostrados en los apartados 5.1 y 5.2, luego se presentan los resultados para la fuerza de tracción ejercida por las mordazas calculados a partir del relevamiento de datos durante el conformado y finalmente los estimados a partir de la simulación con elementos finitos.

En la Tabla 5 se resumen las dimensiones del blank. En la Tabla 6 se muestran los límites de fluencia y rotura para la aleación de aluminio AA 2524-T3.

Longitud blank:	$l = 2165 \text{ mm} \rightarrow 2,165 \text{ m}$
Espesor:	$t = 2,54 \text{ mm} \rightarrow 0,00254 \text{ m}$

Tabla 5: Dimensiones del blank.

$\sigma_f =$	47 ksi	\rightarrow	324053592,8 Pa	\rightarrow	324,0535928 MPa
$\sigma_u =$	62 ksi	\rightarrow	427474952,2 Pa	\rightarrow	427,4749522 MPa

Tabla 6: Límites de fluencia y rotura, AA 2524-T3.

El cálculo de la fuerza de tracción ejercida por las mordazas se realiza a partir de las presiones en los cilindros hidráulicos que controlan la rotación de las mismas. En la Figura 66 se muestra el esquema de fuerzas actuantes. Con las presiones relevadas se determinan las fuerzas actuantes en dirección de cada

cilindro hidráulico, luego se determina el momento que producen cada una de estas fuerzas respecto del eje de rotación de la mordaza sobre la cual actúa. Con el momento sobre el eje de rotación de la mordaza conocido, se determina la fuerza de tracción actuante en dirección tangente al blank.

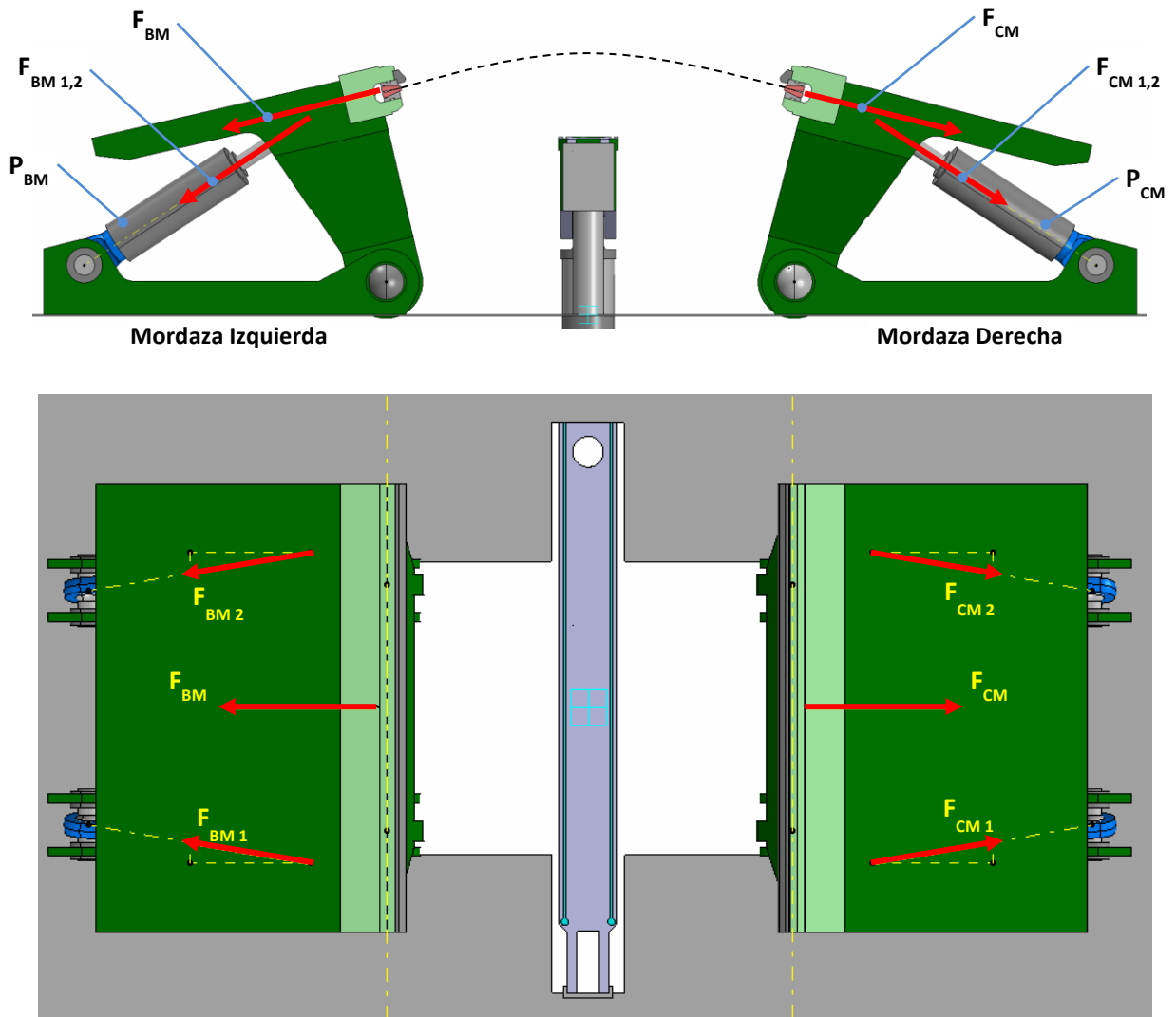


Figura 66: Prensa. Fuerzas de tracción sobre el blank.

Los resultados obtenidos en cada caso son:

1ra Aprox.	$F_{1ra} = 181,7 \text{ Tnf}$
2da Aprox.	$F_{2da} = 210,7 \text{ Tnf}$
Relevada	$F_{3ra} = 208 \text{ Tnf}$
Estimada (FEM)	$F_{4ta} = 230 \text{ Tnf}$

Tabla 7: Fuerza de tracción necesaria. Comparación de resultados.

Como se observa en la Tabla 7, la estimación de la fuerza necesaria para el estirado calculada a partir de la primera aproximación resultaría en una fuerza insuficiente para el conformado al compararla con la fuerza relevada. Esto se debe a que no considera efectos de interacción entre superficies, configuraciones geométricas ni cantidad de deformación plástica acumulada en la pieza a conformar. Por su parte la segunda aproximación es más cercana al valor relevado, siendo mayor debido al hecho de que se calculó para una condición T3 del material, mientras que el material conformado se encontraba en estado AQ/W que tiene tensiones límites menores que la condición T3. Finalmente, la estimación de la fuerza necesaria, realizada a partir de la simulación por elementos finitos, es mayor que la relevada porque en el cálculo de los momentos de reacción sobre los ejes de rotación de las mordazas tiene en cuenta el efecto que produce la fuerza vertical sobre el molde. La diferencia entre la fuerza obtenida con el método de elementos finitos y la relevada es del orden del 10%.

Se puede concluir entonces que el modelo propuesto en este trabajo para analizar el proceso de conformado por estirado de grandes recubrimientos con líneas de forma suave, es decir con grandes radios de curvatura, permite obtener resultados con un razonable grado de aproximación de lo que se esperaría durante el conformado.

6. CONCLUSIONES.

La diferencia de estado térmico entre el material simulado y el material verdaderamente conformado demanda que todas las conclusiones obtenidas en este trabajo sean consideradas cualitativa y no cuantitativamente.

1. La magnitud de las fuerzas de rozamiento que intervienen en el conformado por estirado simple dan como resultado una pieza conformada con distribución no homogénea de tensiones y deformaciones, con poca precisión dimensional por efecto del springback y de pobres propiedades mecánicas debido al insuficiente endurecimiento por deformación plástica en frío. El conformado por estirado simple no es una técnica apropiada para conformar recubrimientos de grandes dimensiones con curvaturas suaves.
2. Una excesiva velocidad de aplicación de la carga provoca que el material a conformar se comporte más rígidamente lo cual combinado con una pobre lubricación puede resultar en inestabilidades plásticas como las bandas de Lüders. La combinación del estado recocido del material junto con una elevada velocidad de conformación y el complejo estado tensional provocan que el material presente un comportamiento similar a la recuperación dinámica pero a temperatura ambiente. La pseudo-recuperación dinámica del material es fuertemente influenciada por el tipo de lubricante empleado, es decir, por las fuerzas de rozamiento. A mayor rozamiento la recuperación es más rápida, pero el material es más propenso a presentar el fenómeno del límite elástico aparente, y por supuesto, menor es la deformación plástica total acumulada en la pieza.
3. Trabajar al límite de las capacidades de la prensa tiene como consecuencia variaciones de presión en el sistema hidráulico que desencadenan vibraciones en las mordazas y la mesa, provocando reducciones combinadas del movimiento de éstos elementos. Estas reducciones traen aparejadas fluctuaciones en las curvas tensión-deformación pudiendo desencadenar inestabilidades plásticas a nivel intergranular como por ejemplo el efecto Portevin-Le Chatelier. Comportamiento que se ve agravado si además se trata de un material no endurecido previamente con agregado de magnesio. Evitar el retroceso en los movimientos de la mesa y las mordazas contribuye a aumentar significativamente la deformación plástica total acumulada en la pieza y consecuentemente su resistencia.

Mediante la aplicación práctica de las conclusiones obtenidas en este trabajo se logró conformar exitosamente el recubrimiento solicitado, sin presencia visible de bandas de Lüders ni otros defectos, reduciendo además la fuerza necesaria a un 80% de los valores utilizados en las primeras experiencias. Éstos resultados se muestran en las fotografías de la Figura 67 y convalidan las conclusiones hasta aquí obtenidas.



a)



b)



c)

Figura 67: Recubrimiento conformado.

A lo largo de la realización de este trabajo surgieron dos líneas principales para el desarrollo de futuros trabajos, una práctica y otra analítica.

En el campo práctico u operativo se plantea:

1. Caracterizar las propiedades de la aleación de aluminio AA2524 para su estado recocido O y para su estado inmediatamente posterior al tratamiento de solubilizado, AQ/W.
2. Desarrollar un sistema que permita evaluar directamente desde la prensa, la fuerza aplicada a la pieza.
3. Trabajar con la programación del modo automático de la prensa para reducir el efecto cabeceo en la rotación de las mordazas y la elevación del molde.
4. Desarrollar experiencias que conduzcan a obtener mejores condiciones de lubricación en las interfaces con movimientos relativos.

En el campo analítico o teórico, teniendo en cuenta que el comportamiento del material directamente asociado a su estado y composición no pueden ser modificados por ser exigencias del producto, se plantea continuar el estudio con:

1. Análisis profundo del estado tensional a que se encuentra sometida una pieza en el conformado por estirado, de manera de establecer una expresión analítica que permita estimar la fuerza necesaria para el conformado con relativamente poco trabajo.
2. Aplicación de los casos simulados a diversas configuraciones geométricas para extender y/o restringir el campo de aplicación de las conclusiones aquí obtenidas.
3. Desarrollar un modelo matemático que permita simular el proceso de conformado con tratamientos térmicos intermedios.

7. REFERENCIAS:

- [1] Improved tool development process for novel SCS technology for aluminum sheet metal. Apostolos Papaioanu, Ralf Schleich, Mathias Liewald. 2009.
- [2] ASTM E 8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric].
- [3] Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS)_01.
- [4] WebPlotDigitizer software (<http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/>).
- [5] Experimental and Numerical Study on Stretch Forming Process, Celal Onur Alkaş, March 2013.
- [6] Mechanical Metallurgy, George Ellwood Dieter, David Bacon, 1961.
- [7] The Portevin–Le Chatelier effect: A review of experimental findings, Ahmet Yilmaz, November 2011
- [8] Yield Point Phenomena in Metals and Alloys, E. O. Hall, 1970.
- [9] On Serrated Plastic Flow in an AA5052-H32 Sheet, Wei Tong, Nian Zhang, 2007.
- [10] Dynamic strain aging of austenitic stainless steels and Ni-Base alloys, Mykola Ivanchenko, 2010.
- [11] A model for yielding with special reference to the yield-point phenomena of iron and related bcc metals, Acta Metallurgica, Volume 10, Issue 8, August 1962, Pages 727–738, G.T Hahn.
- [12] TALAT Lecture 3701, Formability Characteristics of Aluminium Sheet, K. Siegert and S. Wagner, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 1994.
- [13] Metal-Forming Techniques, NASA SP-5017, page 20, 1965.
- [14] Mechanics of Sheet Metal Forming, Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu, Butterworth-Heinemann 2002.
- [15] In Process Control of Strain in a Stretch Forming Process, D. E. Hardt, W. A. Norfleet, V. M. Valentin and A. Parris, MIT, 2001.
- [16] EMPIRE MACHINE TOOLS, Metal Forming, Tools & Metrology Division, (http://worldindia.in/empire/sheet_metal_processing.html).
- [17] Metal Forming Handbook / SCHULER GmbH (c) Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1998.
- [18] Stretch Forming Analysis for Skin of Aircraft, Model B717-200.
- [19] Springback: improvement of its predictability. I. Burchitz. Netherlands Institute for Metals Research , March 2005.
- [20] Experimental and numerical analysis of forming limit diagram (FLD) and forming limit stress diagram (FLSD). Materials Sciences and Applications, 2011.
- [21] Stress Analysis on the Stretch Forming of the Aluminum Saddle-shaped Skins. Advanced Materials Research (Volumes 89-91). THERMEC 2009 Supplement.