



Conformado de un engranaje recto híbrido del tipo acero-acero mediante “Tailored Forming”

Federico Tomás Albitre

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
2023

Conformado de un engranaje recto híbrido del tipo acero-acero mediante “Tailored Forming”

Federico Tomás Albitre

Proyecto Final de Ingeniería Mecánica presentado como requisito parcial para optar al
título de:

Ingeniero/a Mecánico/a

Director/a:

Dr. Ing. Gastón Bourges

Ing. Pedro Sismondi – Ing. Guillermo Rodríguez – Ing. Juan Sismondi

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina

2023

Dedicatoria

A mi familia, especialmente a mis padres y a mi hermano por el apoyo incondicional recibido durante el transcurso de esta carrera. Sin el esfuerzo de ellos no hubiera sido posible llegar a este tan ansiado final de carrera.

También a mi novia, quién me acompañó en todo este camino y me dio apoyo en los momentos más difíciles como así también en cada paso que quise dar para crecer profesionalmente y personalmente.

Agradecimientos

Este Proyecto Final de Ingeniería Mecánica realizado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario es un esfuerzo y un trabajo en el cual, directa o indirectamente, participaron distintas personas opinando, corrigiendo, ayudando, enseñando y acompañando en las distintas fases del mismo. Este trabajo me ha permitido aprovechar la competencia, experiencia y conocimiento de muchas personas a las que deseo agradecer en este apartado. Sin ellas no hubiese sido posible.

En primer lugar, al Ingeniero M.Sc. Michael Till, investigador y docente de la Leibniz Universität Hannover que se desarrolla en el Instituto de Máquinas y Tecnologías de Conformado (IFUM por sus siglas en alemán de dicha universidad). Mi más amplio agradecimiento por tomarme para la realización de este trabajo y ofrecer su tutoría durante el desarrollo del proyecto, colaborando en todo momento y soportando muchas veces errores comunicacionales dado mi escaso nivel de alemán técnico.

Quisiera agradecer también a la Dra. Ing. Ana Velia Druker quién es docente de la EIM y quién me brindo soporte al postularme a la beca DAAD KOSPIE ALEARG 2022/2023 para realizar este proyecto durante mi intercambio académico en Alemania. Le agradezco por sus competencias y conocimientos de Ciencia de Materiales que me ayudaron a hacer un pre-proyecto bajo su colaboración, el cual me ayudó a obtener la beca en mención. Además, le agradezco su soporte y preocupación durante mi estancia en Alemania.

No puedo olvidarme del grupo de Docentes de la EIM que tuve durante toda la carrera, los que me brindaron todos los conocimientos y me formaron como profesional, para encarar mi vida y mi futuro en esta profesión que tanto uno ama. Agradezco a los docentes de Proyecto Final, por la claridad y facilidad de plantear los objetivos que buscan en nuestros proyectos, y por la consideración tenida al tratarse de un proyecto realizado en el exterior, valorando no solo los conocimientos aplicados y obtenidos sino también la experiencia social e intercultural desarrollada a lo largo de este proyecto.

Me gustaría agradecer al Ministerio de Educación de la República Argentina y al Servicio de Intercambio Académico Alemán (DAAD por sus siglas en alemán) por permitirme

realizar un intercambio académico de 1 año en Alemania a través de la beca DAAD KOSPIE ALEARG 2022/2023, donde pude desarrollarme profesionalmente pero a su vez personalmente.

Por último, agradecer inmensamente a mi familia y amigos, quienes estuvieron conmigo durante todo este proceso, apoyándome y motivándome a alcanzar este ansiado momento, el entregar este proyecto y cerrar una gran etapa de mi vida.

A todos ustedes, mi mayor reconocimiento y gratitud.

Resumen

El sistema de materiales híbridos permite fabricar componentes optimizados para la aplicación deseada y ajustados a los requisitos, con un elevado potencial de construcción ligera y una mayor eficiencia en la utilización de materiales. La producción de componentes híbridos está sujeta a retos particulares, en particular en lo que se refiere a la modificación y mejora específicas de la zona de unión (soldadura en caso de metales) para obtener las propiedades mecánicas deseadas sin generar puntos de concentración de tensiones o zonas en las que exista discontinuidad dentro de los materiales que puedan afectar a la futura fiabilidad de la pieza.

La calidad de la unión de los componentes de tipo multimaterial o híbridos viene determinada esencialmente por las propiedades locales de la zona de unión. El tipo de unión, así como las propiedades mecánicas y microestructurales, determinan la resistencia global de la unión y la calidad de un componente híbrido.

En el siguiente trabajo se analiza la calidad de la unión de un engranaje recto soldado por deposición y posteriormente forjado, fabricado con una combinación de acero/acero mediante investigaciones metalográficas y mediciones de micro dureza. Antes del análisis anteriormente mencionado, el engranaje recto se conforma primero mediante forja en matriz cerrada. Posteriormente, las zonas de unión del componente se analizan mediante imágenes de microscopio óptico. Esto permite una caracterización completa de la calidad de la unión del componente examinado.

Palabras clave:

sistema de materiales híbridos, calidad de la unión, forjado híbrido, soldado por deposición, forja, examen metalográfico

Abstract

The hybrid material system allows the production of application-optimized and requirement-justified components with a high potential of lightweight construction and an increased material utilization efficiency. The production of hybrid components is subject to particular challenges, in particular with regard to the targeted modification and improvement of the joining zone in order to obtain the desired mechanical properties without generating points of stresses concentrations or zones where there is discontinuity within the materials that could affect the future reliability of the piece.

The bond quality of multi-material components is essentially determined by the local properties of the joining zone. The bond type as well as the mechanical and microstructural properties determine the global bond strength and quality of a hybrid component.

In the following work, the bond quality of a deposition welded and forged spur gear made of steel/steel combination is analysed by metallographic investigations and microhardness measurements. Before the bond quality analysis, the spur gear is first formed by closed die forging. Subsequently, the joining zones of the component are analyzed by light microscope image. This allows a comprehensive characterization of the bond quality of the examined component.

Keywords:

hybrid material system, bond quality, tailored forging, deposition welding, die forging, metallographic investigations

Contenido

Agradecimientos	4
Resumen.....	6
Abstract	7
Contenido	8
1. Introducción	9
2. Estado del arte	11
2.1. Fundamentos de la tecnología de conformado	11
2.1.1. Conformado en serie	13
2.1.2. Forjado	14
2.1.3. Forja en matriz cerrada	16
2.1.4. “Tailored Forming”	22
2.2. Desgaste	26
2.2.1. Clasificación del desgaste	27
2.2.2. Tipos de desgastes en engranajes	28
2.3. Características de los engranajes rectos	34
2.3.1. Fuerzas y tensiones en un engranaje recto	35
2.3.2. Tratamiento térmico de los engranajes	37
3. Objetivo y Enfoque.....	42
4. Desarrollo e investigaciones experimentales	43
4.1. Conformado de un engranaje recto híbrido	45
4.1.1. Calentamiento de la materia prima	45
4.1.2. Forjado del engranaje recto	47
4.1.3. Tratamiento térmico del engranaje recto	50
4.1.4. Desarrollo del proceso.....	50
4.1.5. Mecanizado final del engranaje recto	58
4.1.6. Investigaciones metalográficas.....	59
5. Resumen y conclusiones	78
Bibliografía	83

1. Introducción

El progreso técnico provoca un aumento constante de los requisitos industriales de un material y empuja a los monomateriales convencionales cada vez más lejos de sus límites tecnológicos. En este contexto, el uso de sistemas de materiales híbridos ofrece una oportunidad prometedora para producir componentes optimizados para la aplicación y basados en los requisitos. El uso de componentes multimaterial permite reducir el peso del mismo y aumentar así el potencial de construcción ligera. Por otra parte, es posible aumentar la eficiencia en la utilización de materiales mediante el uso selectivo de los mismos en función de las propiedades mecánicas requeridas en una zona específica de la pieza.

Con la ayuda de procesos de conformado es posible producir piezas híbridas con geometrías complejas casi listas para montar, así como con excelentes propiedades mecánicas y tecnológicas con sólo unos pocos pasos de procesamiento. El Centro de Investigación Colaborativa 1153 (*"Sonderforschungsbereich"* en alemán) de la Universidad Leibniz de Hannover (*"Leibniz Universität Hannover"* en alemán) contribuye a ello desarrollando e investigando cadenas de procesos innovadoras para la producción de componentes híbridos de alto rendimiento.

El conformado representa el segundo paso en la cadena del proceso de conformado híbrido, como se muestra en la Figura 1.1. Los productos semiacabados previamente unidos se conforman mediante procesos como el laminado, la extrusión, la forja por estampación y, al final de la cadena de procesos, se llevan a cabo operaciones finales como el mecanizado y el tratamiento térmico. El resultado son componentes de alto rendimiento con propiedades y funciones adaptadas localmente.

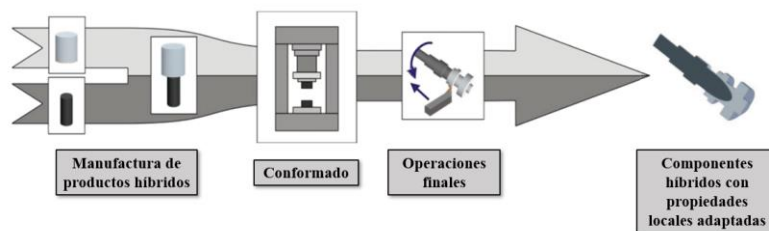


Figura 1.1: Cadena de procesos de la tecnología de conformado a medida “Tailored Forming” [2]

Un reto particular en la producción de componentes híbridos utilizando la tecnología de conformado es el ajuste específico de las propiedades locales en la zona de unión de los dos componentes, que en última instancia determinan la resistencia global de un componente híbrido. La creación y modificación del material compuesto ya tiene lugar durante el proceso de unión, así como durante el posterior conformado de la pieza híbrida.

En el marco de este trabajo, se investiga la calidad de unión de engranajes rectos híbridos de acero/acero (Figura 1.2) con diferentes combinaciones de materiales y procesos. La combinación de materias primas híbridas se creó en el primer paso de la cadena de proceso mediante diferentes procesos de soldadura. A continuación, la conformación de los productos semiacabados preformados tiene lugar mediante forja por caída.

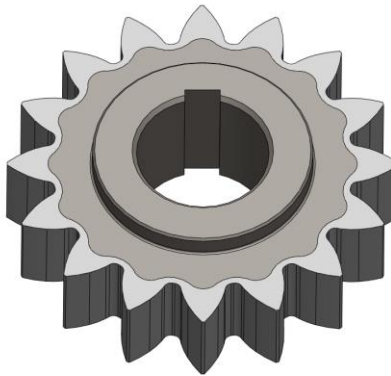


Figura 1.2: Engranaje recto híbrido

Para la prueba de calidad del componente, se analizan las propiedades microestructurales del engranaje recto híbrido con ayuda de imágenes de microscopía óptica y se realizan pruebas de micro dureza. El objetivo es, con la ayuda de los resultados de los exámenes antes mencionados, cuantificar la resistencia de la unión y la calidad del componente en función de las combinaciones de materiales y los parámetros del proceso y, de este modo, caracterizar exhaustivamente la calidad de la unión.

2. Estado del arte

2.1. Fundamentos de la tecnología de conformado

Los ingenieros de procesos preocupados por los costes y la calidad prestan especial atención a la proporción de procesos de conformado en la fabricación de componentes críticos. Los componentes fabricados mediante conformado se caracterizan por sus excelentes propiedades mecánicas y son especialmente adecuados para aplicaciones de gran resistencia, como engranajes, ejes de transmisión, álabes de turbina o componentes estructurales. La reducción de pasos en las cadenas de procesos y la sustitución de procesos o materiales con una mejora simultánea de las propiedades mecánicas de los componentes ilustran el potencial de la tecnología de conformado. Esto se traduce en oportunidades para acelerar o reducir significativamente los pasos de fabricación para el post proceso de los componentes.

En la norma DIN 8580, los procesos de fabricación se dividen en seis grupos principales en función de cómo se crea y/o modifica un cuerpo sólido. El conformado es el segundo grupo de esta clasificación y se define como "Fabricación mediante modificación plástica de una forma conservando su masa y cohesión material".

En la norma DIN8582 se realiza una clasificación más específica de los procesos de conformado en función del tipo de tensiones que se producen en el componente durante el conformado. Se distingue entre conformado por compresión, conformado por tracción, conformado por tracción-compresión, conformado por flexión y conformado por cizallamiento, véase la figura 2.1.

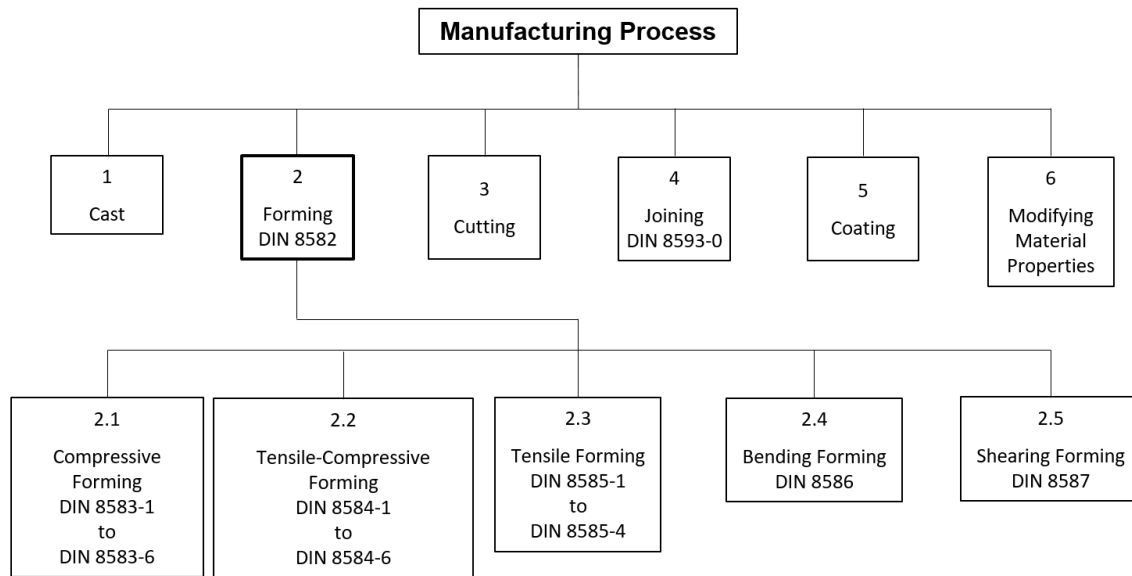


Figura 2.1: Clasificación de las tecnologías de conformado de acuerdo a la norma DIN 8580

En función del control de la geometría, existen las siguientes categorizaciones:

- **Conformado:** Modificación de una forma con geometría controlada. Ejemplos: embutición profunda, forja y extrusión.
- **Deformación:** Modificación de una forma sin geometría controlada. Ejemplos: choque de automóviles, forja a mano con un martillo y un yunque.

Además, en función del producto semiacabado utilizado (chapa, barra o bloque), existe una subdivisión en conformado de chapa (*sheet metal forming* en inglés) o conformado de productos volumétricos (*bulk metal forming* en inglés):

- **Conformado de chapa** (hasta aproximadamente 10 mm. de espesor de chapa): El espesor de la chapa es casi constante.
- **Conformado de productos volumétricos:** La forma se desplaza en las tres direcciones de coordenadas.

Los procesos de conformado también pueden clasificarse en función de la temperatura. Se distingue entre:

- **Conformado en frío:** Operaciones de conformado sin calentamiento a una temperatura de la pieza de aproximadamente 20°C. Debido a la limitada

capacidad de cambio de forma, se requieren elevadas fuerzas de conformado. Puede alcanzarse un alto nivel de precisión dimensional.

- *Conformado a media temperatura:* Operaciones de conformado después del calentamiento. Temperatura de la pieza para acero de 650°C a 900°C. Al reducir la formación de cascarilla y el alabeo, se puede conseguir una mayor precisión dimensional en comparación con el conformado en caliente. En comparación con el conformado en frío, se requieren menores fuerzas de conformado, pero en comparación con el conformado en caliente, las fuerzas son de 2 a 3 veces mayores.
- *Conformado en caliente:* Operaciones de conformado tras el calentamiento. Temperatura de la pieza para acero de 1000°C a 1250°C. Como resultado, la fuerza de conformado es de 8 a 10 veces menor que con el conformado en frío. Se pueden conseguir cambios de forma muy grandes debido a estar por encima de la temperatura de recristalización, sin embargo, la precisión dimensional se reduce debido a la contracción, la distorsión y la formación de cascarilla.

2.1.1. Conformado en serie

Los componentes conformados se utilizan siempre que se requieren construcciones que ahorren espacio y peso con elevadas exigencias en cuanto a la capacidad de carga estática y/o dinámica, al tiempo que se exige un alto grado de seguridad y fiabilidad. El desarrollo de una pieza se basa en especificaciones en las que se describen todos los requisitos que debe cumplir la misma en su uso posterior, como el espacio de instalación disponible, los puntos de fijación, las cargas colectivas que actúan sobre el componente, el peso, la vida útil prevista, las condiciones ambientales a las que estará expuesto el componente, etc. Además de estos criterios, que son importantes para el diseño de una pieza, también existen, por supuesto, requisitos de precio, cantidad, calidad y, cada vez más importantes, aspectos medioambientales. El potencial del proceso de conformado y su importancia económica pueden verse en la figura 2.2. Debido a la elevada utilización de material en el mismo, los costes de fabricación de las piezas son significativamente más bajos que en los procesos de corte. Por lo tanto, la necesidad relativa de energía para 1 kg de pieza acabada en la forja convencional es considerablemente menor en comparación con los procesos de corte. [14, 10].

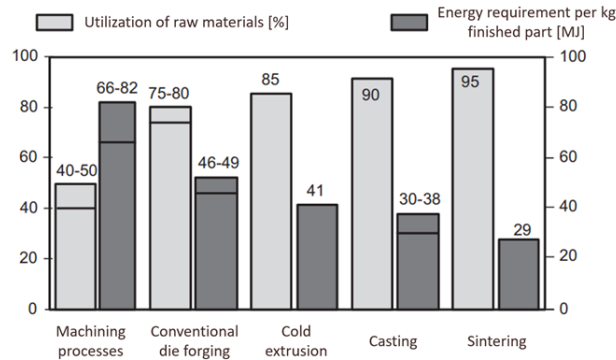


Figura 2.2: Energía relativa necesaria y utilización de materias primas de distintos procesos de fabricación, incluido el coste de producción del acero y el contenido energético de los residuos [10].

Los procesos de conformado de sólidos abarcan todos los grupos de la tecnología de conformado según la norma DIN 8582. Los procesos más importantes son el recalcado, la forja, el laminado, la extrusión, el doblado y el estirado. A continuación, se analiza con más detalle el proceso de forja y sus ventajas.

2.1.2. Forjado

La variedad de formas geométricas en forja es casi ilimitada, véase la figura 2.3. Abarca desde ejes y anillos simplemente simétricos en rotación hasta geometrías muy complicadas, como cigüeñales, piezas de ejes y transmisiones, piezas de motores, álabes de turbinas de gas y vapor, etc. El gran potencial de diseño de los componentes macizos conformados constituye también la base de la construcción estructural ligera, especialmente importante en las industrias del automóvil y la aviación.



Figura 2.3: Ejemplos de la diversidad de formas posibles en piezas forjadas [14]

A continuación, se describen las ventajas de las piezas forjadas:

- Resistencia superior a las cargas de impacto y fatiga.
- Microestructura refinada y mejor orientación de las fibras, lo que se traduce en una mayor Resistencia mecánica.
- Proceso adecuado para la producción en serie.
- Eliminación de los poros de fundición mediante la presión ejercida durante el laminado del producto semiacabado y durante la propia forja. Las piezas forjadas son, por lo tanto, más resistentes con menos peso.
- Buena reproducibilidad y fiabilidad una vez que el proceso se ha desarrollado y probado correctamente.
- Grado razonable de precisión.

Las razones por las que una pieza forjada tiene una resistencia superior a la fatiga y al impacto pueden verse en la figura 2.4. Al someter el material a la acción de fuerzas externas durante el proceso de forja, sus partículas se deslizan unas sobre otras, se desplazan y se comprimen, alineándose según un orden geométrico y disponiéndose en forma de fibras capaces de soportar mayores esfuerzos mecánicos.

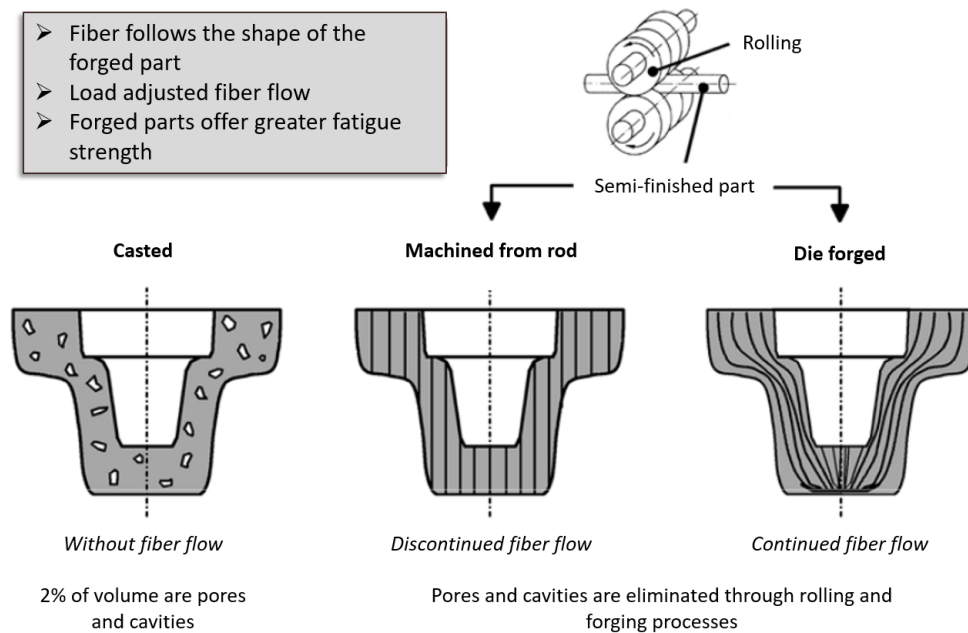


Figura 2.4: Comparación de la distribución de las fibras en la pieza fundida, la pieza maquinada y la pieza forjada [10]

La forja se divide en dos grandes grupos:

- *Forja en matriz abierta:* La pieza acabada se forja mediante un guiado adecuado de la misma (entre las matrices). Se utiliza para crear preformas y productos semiacabados, así como para la producción de piezas muy grandes. El conformado se realiza en condiciones de compresión.
- *Forja en matriz cerrada:* Según la norma DIN 8583-4, la forja en matriz cerrada es un proceso de conformado por compresión en el que la geometría de la pieza se crea mediante la impresión de la herramienta. La pieza está total o parcialmente rodeada por la herramienta. [15]

A efectos de este trabajo, a continuación, se profundiza en las técnicas y características de la forja en matriz cerrada.

2.1.3. Forja en matriz cerrada

En este proceso se modifica la forma de un sólido en condiciones de compresión uniaxial o multiaxial. Debido a la presión que actúa sobre la pieza, la herramienta fuerza un flujo de material en la misma dirección que el movimiento de la herramienta (recalcado), en la dirección opuesta al movimiento de la herramienta (llenado) o perpendicular al movimiento de la herramienta (extendido), como se muestra en la figura 2.5. Al menos dos de estas operaciones básicas aparecen en cada procedimiento de forja con matriz cerrada.

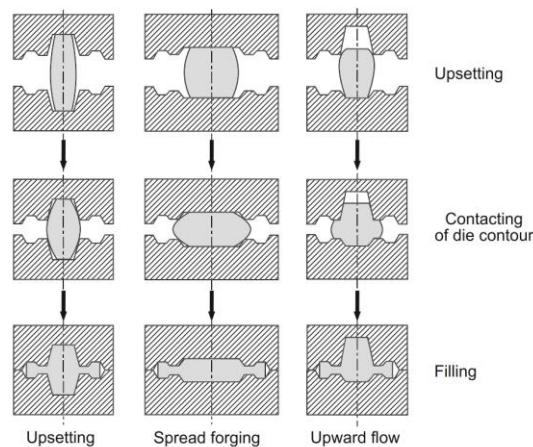


Figura 2.5: Operaciones básicas para el llenado de las matrices de forja [15]

Según la norma DIN 8583, la forja en matriz cerrada se divide a su vez en forja en matriz cerrada con rebaba y sin rebaba en función de la geometría de la herramienta, véase la figura 2.6.

- *Forja con matriz cerrada con rebaba:* Conformado en herramienta cerrada, flujo excesivo de material a través de una rebaba.
- *Forja con matriz cerrada sin rebaba:* Conformado en herramienta completamente cerrada, el material no puede fluir fuera de la matriz.

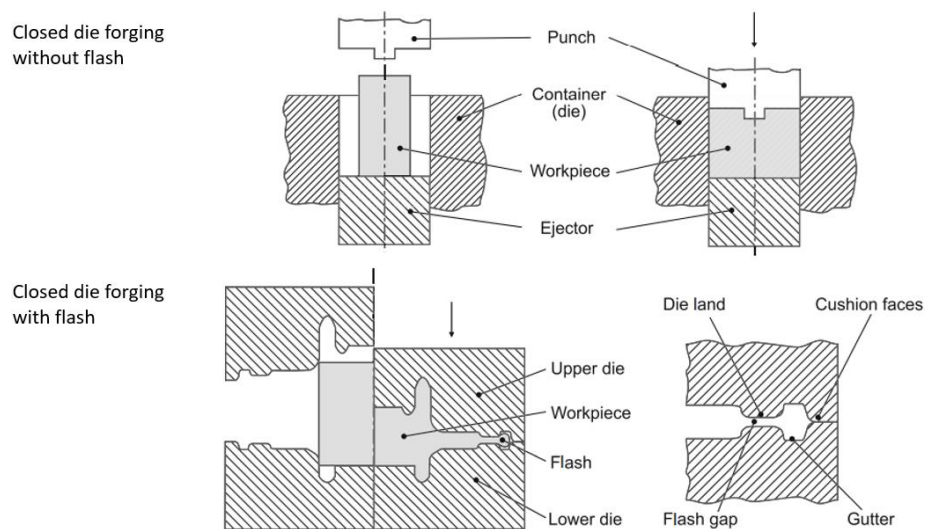


Figura 2.6: Forja con y sin rebaba [15]

Etapas del proceso

La cadena de procesos de la forja consta, en la mayoría de los casos, de varias etapas de forja de la pieza con diferentes matrices e incluso utilizando diferentes procesos, véase la figura 2.7. Empezando por la llamada pieza semiacabada o materia prima, la pieza se va forjando en varias etapas hasta conseguir la geometría deseada. El final de la forja puede hacerse con o sin rebaba creando la forma final de la pieza. Dentro de toda la cadena del proceso debe prestarse atención a una ejecución sin errores y económicamente adecuada. [10]

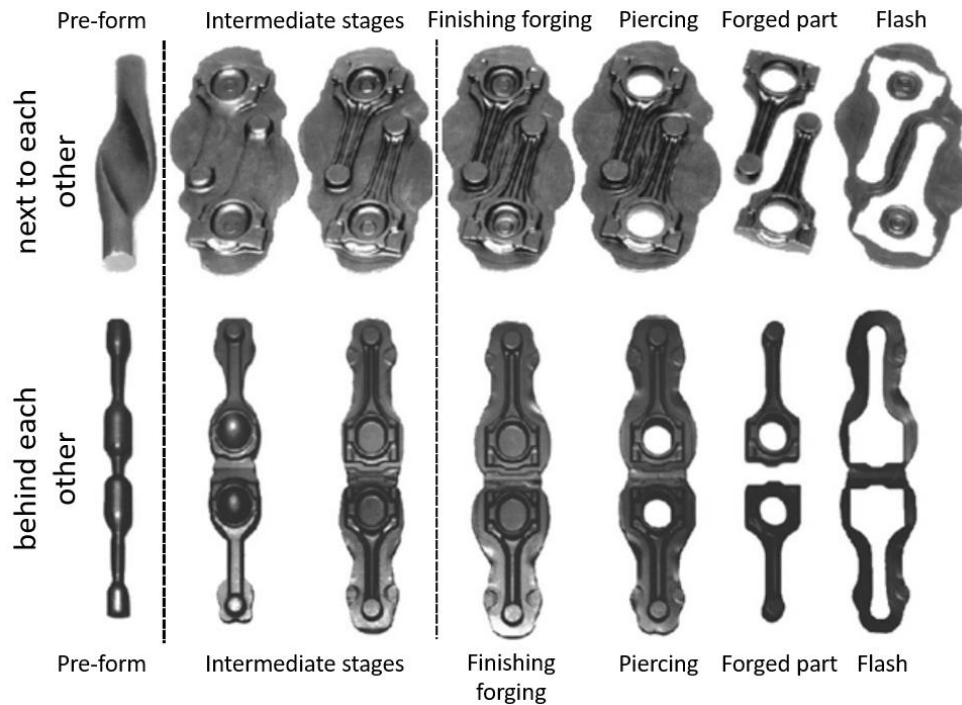


Figura 2.7: Diferentes secuencias de proceso para la fabricación de una biela con idéntica pieza final [10]

Forja en matriz cerrada con rebaba

Es el método de forja más utilizado en la industria. Para asegurar el llenado de la matriz, se utiliza intencionadamente un exceso de material en la pieza. Este material sobrante fluye entre las matrices de llenado hasta la zona de formación de la rebaba, como se muestra en la figura 2.6.

Sin embargo, las propiedades geométricas de la zona de la rebaba influyen no sólo en la cantidad de material sobrante, sino también, en particular, en las tensiones de la rebaba y, por lo tanto, tanto de la pieza como de la matriz. El conformado de la pieza está influido esencialmente por la fuerza normal en la salida de la rebaba y por la resistencia al conformado del material de la pieza. La fuerza normal en la salida de la rebaba debe ser lo suficientemente grande como para que sólo se desvíe una pequeña cantidad de material y la sobrepresión en la herramienta sea lo suficientemente grande como para llenar completamente la impresión de la matriz. La forma y las dimensiones de la rebaba están en consonancia con la forma y el tamaño de la forja. Si predomina el flujo ascendente del material debido a la geometría particular de la pieza, la ranura de la

rebaba debe diseñarse de forma que sea muy resistente a la salida del material. Por el contrario, si predominan las piezas de paredes finas sin ensanchamientos transversales en el borde exterior o un recalcado predominante, la resistencia en la ranura de rebaba debe ser menor. En la figura 2.7 puede verse un ejemplo de pieza forjada con rebaba. [15]

Los factores para aplicar principalmente la forja en matriz cerrada con rebaba, al contrario que la forja en matriz sin rebaba son:

- Fácil diseño de la cadena de proceso desde la materia prima hasta la pieza forjada acabada.
- Menor esfuerzo de producción de matrices para la secuencia completa de etapas, especialmente para geometrías complejas.
- Mayor sencillez y menor precisión requerida en el posicionamiento de las piezas semiacabadas previo a la forja
- Control del flujo de material utilizando, por ejemplo, un diseño asimétrico de la zona de rebaba

Forja en matriz cerrada sin rebaba (forja de precisión)

El forjado de precisión es un procedimiento especial en el que las piezas se fabrican sin rebaba en una matriz cerrada. Este proceso se caracteriza por una gran precisión y un buen contorno final. Las ventajas de la forja de precisión residen en la producción de grandes cantidades.

La forja de precisión puede utilizarse para aumentar la calidad hasta IT 8-9. En casos especiales, como en la forja de álabes de turbina, estos métodos de forja refinados pueden utilizarse incluso para cumplir requisitos de precisión correspondientes a IT 6. Además, las piezas forjadas de precisión suelen estar listas para su instalación. Esto se debe tanto a la mejora significativa de la calidad superficial como al aumento de la precisión dimensional y de forma. [15]

Para poder satisfacer las mayores exigencias dimensionales y de forma de las piezas forjadas de precisión, aumentan los requisitos del proceso y del sistema de herramientas.

La lista de requisitos que se muestra en la Figura 2.8 es decisiva para la calidad del proceso que se implementará posteriormente:

- Precisión en el diseño y la fabricación de herramientas
- Alta precisión del volumen y la geometría de la pieza bruta
- Control preciso de la temperatura
- Guiado de la herramienta, guiado preciso del punzón, baja inclinación y desplazamiento
- Precisión en el control del proceso
- Alta estabilidad del proceso
- Alta reproducibilidad de los parámetros del proceso de la máquina de conformado

1. Accurate tool design and manufacture – Shrinkage of the workpiece and provide elastic tool expansion – Calculation with FEM method – Correction with CAD/CAM system	4. Tool guidance, accurate punch guidance, low tilting and displacement – Increase in horizontal rigidity – Closed position control
3. Precise temperature control – $\Delta T < 5K$ – Temperature control	5. Accuracy in the control of the process – Reproducible properties – Constant process parameters
2. High accuracy of the volume and geometry of the raw part – $\Delta V < 0,5\%$ – Section length control – Feed device for cutting length adjustment – Raw part positioning	6. High stability of the process – Monitoring of process data – Monitoring of component qualities
	7. High reproducibility of the process parameters of the forming machine – Low guidance play of the forming machine – High insertion accuracy

Figura 2.8: Requerimientos de herramientas y de procesos en la forja de precisión [10]

El esfuerzo considerablemente mayor que supone la forja de precisión en comparación con la forja convencional debe sopesarse en relación con la secuencia total de fabricación de un componente. Si se omiten las operaciones de mecanizado que requieren mucho tiempo, la forja de precisión sigue siendo económicamente viable. Por ello, es una opción atractiva para la fabricación de piezas de engranajes dentados cuya producción por mecanizado puede ser muy costosa, véase la figura 2.9.

Sin embargo, también hay más razones para el uso de la forja de precisión en piezas dentadas. Los fabricantes de transmisiones exigen que sus engranajes presenten mayores prestaciones con un tamaño incluso reducido y menores emisiones de ruido. Para cumplir estas exigencias, el forjado ofrece claras ventajas sobre el mecanizado,

especialmente gracias a la orientación de las fibras resultante, que soporta las cargas y se adapta perfectamente al filete del diente. Este efecto puede traducirse en un aumento del 25-30% de la resistencia de la raíz del diente. [15]

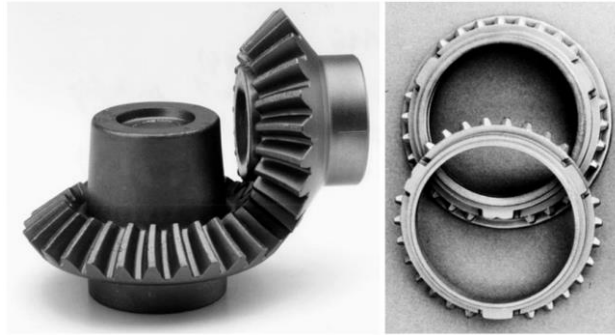


Figura 2.9: Ejemplos de engranajes fabricados por forja de precisión [15]

Otros ejemplos de piezas de engranajes forjados de precisión son los anillos sincronizadores y los cuerpos de embrague, véase la figura 2.9. Los anillos sincronizadores forjados de precisión para la sincronización interior y exterior son un ejemplo de la integración de múltiples funciones en un único componente con mayores pares transmitidos y el consiguiente aumento de la complejidad geométrica y la capacidad de carga. Otro campo de aplicación de la forja de precisión es la construcción aeronáutica. Muchas piezas aeronáuticas se forjan con precisión para minimizar las operaciones de mecanizado. [15]

La Figura 2.10 muestra los distintos métodos de forja de precisión en una matriz cerrada.

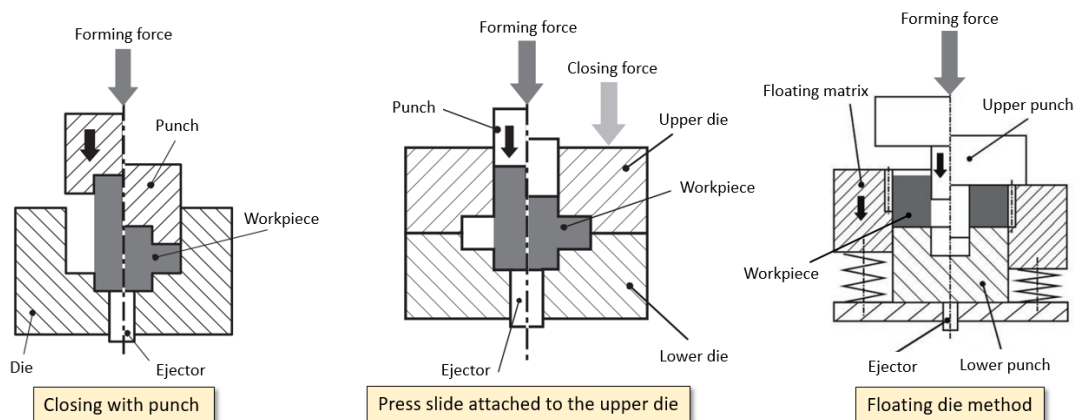


Figura 2.10: Métodos de forjado en la forja de precisión [10]

2.1.4. “Tailored Forming”

En los últimos años, los requisitos de los componentes técnicos no han dejado de aumentar. Esta evolución se ve intensificada por el deseo de productos de menor peso, menor tamaño y mayor funcionalidad, pero al mismo tiempo más resistentes a cargas específicas. Los componentes mono materiales fabricados según procesos establecidos alcanzan sus límites en cuanto a requisitos se refiere. Por ejemplo, apenas es posible combinar excelentes propiedades mecánicas con una construcción ligera utilizando mono materiales. Por lo tanto, sólo se puede conseguir un aumento significativo de la calidad de producción, el diseño ligero, la funcionalidad y la eficiencia combinando distintos materiales en un componente. Para lograr estos requisitos, un enfoque excelente es la cadena de procesos *Tailored Forming* para la producción de componentes sólidos híbridos que desarrolla el Centro de Investigación en Colaboración 1153 en Hannover, Alemania. (*Collaborative Research Center 1153* en inglés). [6]

La cadena de procesos *Tailored Forming* incluye la unión de materias primas a una pieza de trabajo bimetálica en el primer paso, seguida del conformado a la geometría final en el segundo paso. Así pues, la tecnología *Tailored Forming* se centra en el tratamiento específico de las uniones ya existentes mediante un proceso termo mecánico durante el conformado. Mediante este concepto, es posible mejorar la microestructura, las propiedades mecánicas y la calidad de la zona de unión. [4]

En la figura 2.11 se muestra la cadena esquemática del novedoso proceso desarrollado en el CRC 1153 utilizando un engranaje cónico híbrido como componente sólo a modo de ejemplo. En primer lugar, se unen los dos materiales diferentes. En el siguiente paso, se conforma el producto semiacabado híbrido. A continuación, se llevan a cabo las fases de tratamiento térmico y acabado. Por último, se investigan la vida útil y la calidad del componente. [6]

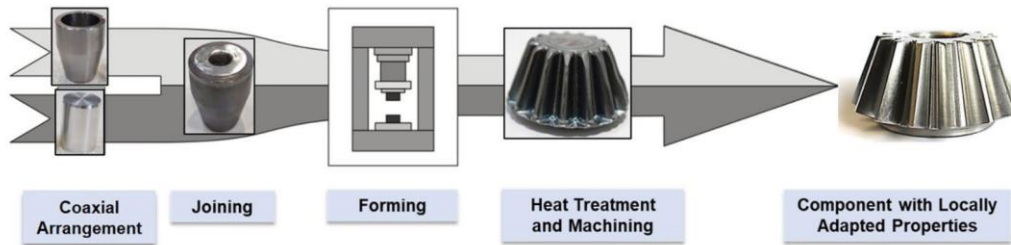


Figura 2.11: Ilustración esquemática de la cadena de procesos “Tailored Forming” usando el ejemplo de un engranaje híbrido cónico [7]

Las ventajas de combinar diferentes materiales en un componente son la posible reducción de peso o la reducción de elementos de aleación caros y limitados. Para ello, los materiales se disponen coaxialmente o en serie, empleando las combinaciones de materiales aluminio-acero, acero-acero y aluminio-titanio [6]. Mediante la combinación de un material base de baja aleación y un material de revestimiento de alta aleación, se puede conseguir una producción de componentes resistentes al desgaste que ahorre recursos. El uso de acero de alta aleación se limita a las zonas de la superficie sometidas a grandes esfuerzos, lo que permite reducir el uso de estos materiales como el cromo. El aluminio y el acero se utilizan como ejemplos de aplicación para combinaciones de materiales distintos que requieran una reducción de peso en la pieza final. [7]

En la figura 2.12 se muestran los distintos procesos que pueden utilizarse para obtener el producto semiacabado y las piezas acabadas.

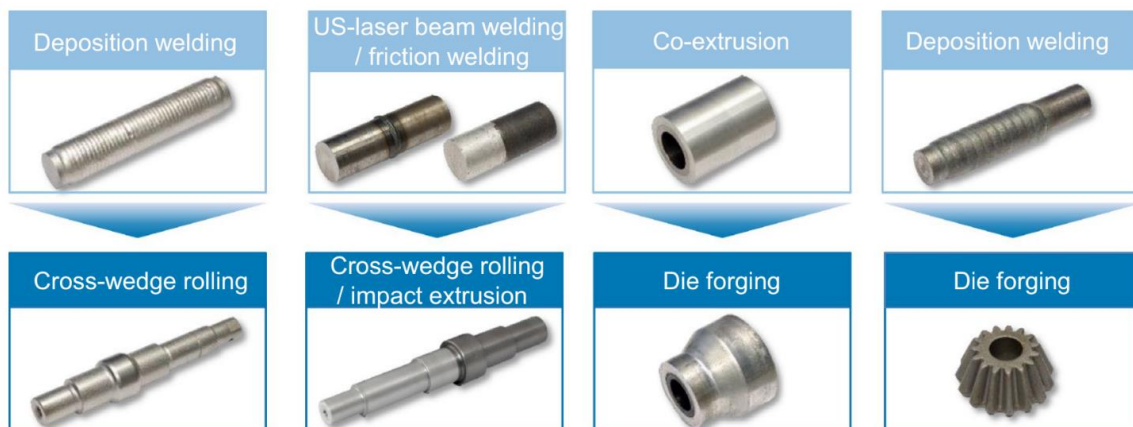


Figura 2.12: Diferentes procesos de unión y conformado para el proceso de “Tailored Forming” de piezas metálicas sólidas [6]

Para obtener una fase intermetálica adecuada entre los diferentes componentes de la pieza híbrida, hay que tener en cuenta algunas consideraciones durante el proceso de *Tailored Forming*.

En primer lugar, hay que realizar un proceso adecuado para obtener la pieza semiacabada. Por ejemplo, en caso de realizar una soldadura por deposición de un acero de alta aleación para un engranaje, el grosor de esta capa soldada debe cubrir todas las zonas sometidas a grandes esfuerzos del engranaje. Todos los procesos de deposición que utilizan soldadura suelen tener el problema de las zonas afectadas por el calor, que se crean cerca de los cordones de soldadura debido a las altas temperaturas del metal de soldadura líquido. El calor de la soldadura actúa como un breve tratamiento térmico en el componente e influye negativamente en la microestructura del material. Otro aspecto a tener en cuenta es el flujo de gas, ya que, si se ajusta demasiado alto, puede penetrar en la masa fundida y pueden quedar poros llenos de gas durante la solidificación. [4]

Sin embargo, tras un proceso de forja en caliente con un grado suficiente de estados de tensión de conformación y compresión, pueden eliminarse la mayoría de los defectos causados por el proceso de soldadura anterior (por ejemplo, poros, grietas y microestructura gruesa). Esto se debe a una deformación plástica altamente eficaz que contribuye a una recristalización dinámica intensiva y al cierre de los poros de la estructura de soldadura y de la zona afectada por el calor. [4]

Para ilustrar lo anterior, la Figura 2.13 muestra los cambios en la microestructura y la fase intermetálica de un 41Cr4 soldado por deposición sobre un acero de baja aleación C22.8 y cómo ha mejorado tras el conformado. Se puede observar cómo la microestructura perlítica de la capa soldada se transforma en una microestructura ferrítica/pearlítica debido a la recristalización. Además, el material del núcleo presenta los denominados patrones ferríticos Widmannstätten directamente en la capa de interfaz antes del conformado, inducidos por las altas velocidades de enfriamiento tras el proceso de soldadura. Sin embargo, esta microestructura también ha mejorado tras el conformado, mostrando una microestructura ferrítica/pearlítica, dando una transición homogénea entre un material y el otro. [4]

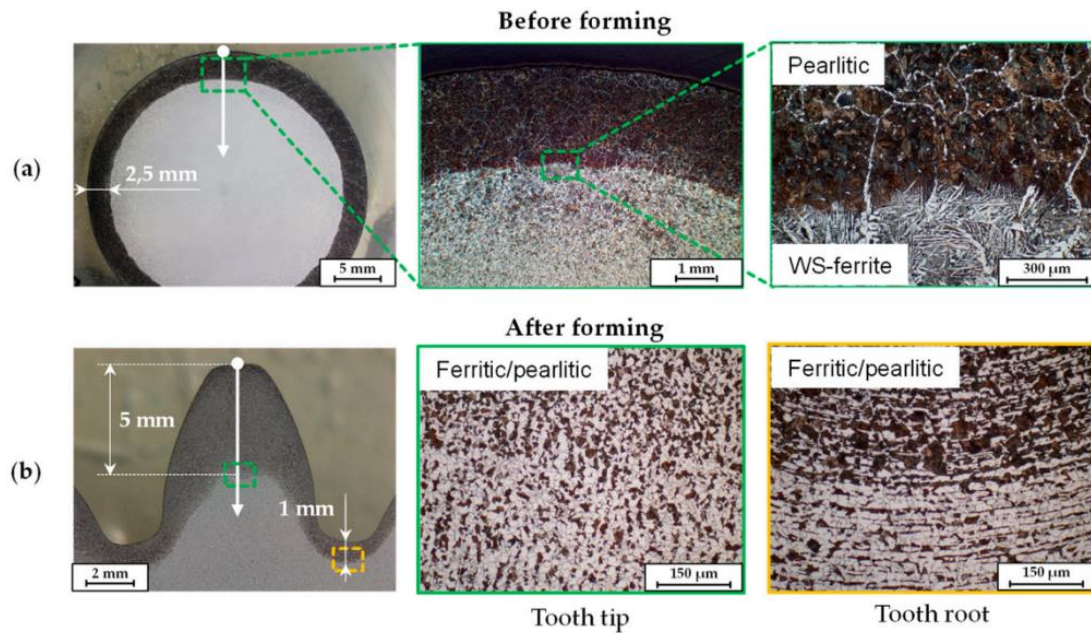


Figura 2.13: Macro- y micrografías de la zona de unión en una pieza soldada por deposición (a) y en un engranaje cónico forjado (b) [4]

Otro parámetro a tener en cuenta es la estrategia de calentamiento de la pieza antes del conformado. Hay que desarrollar estrategias de calentamiento adaptadas a las distintas combinaciones de materiales y geometrías de los productos semiacabados. Por ejemplo, en las piezas de acero-aluminio es necesario calentar intensamente sólo la parte de acero para alcanzar su límite elástico, pero la temperatura necesaria para alcanzar el límite elástico de la parte de aluminio es mucho menor. Un buen método para conseguirlo es el calentamiento por inducción, en el que el calor se induce mediante corrientes de Foucault, que se producen en el campo electromagnético alterno. La bobina de inducción puede colocarse localmente, si el calentamiento es necesario en determinadas regiones de las piezas para conseguir un gradiente de temperatura axial. Para conseguir una diferencia de temperatura radial en piezas híbridas dispuestas coaxialmente, se puede utilizar el efecto piel, que se produce a altas frecuencias de funcionamiento durante el calentamiento por inducción [5]. En el caso de piezas de acero-acero, puede utilizarse una estrategia de calentamiento más general, por ejemplo, en un horno debido a las temperaturas similares necesarias para alcanzar el límite elástico de ambos materiales.

Por último, para alcanzar las propiedades deseadas en la pieza, debe realizarse un tratamiento térmico específico. Por ejemplo, el calor residual de la pieza puede emplearse

para el tratamiento térmico integrado en el proceso. *Behrens et al.* desarrollaron un endurecimiento superficial integrado en el proceso mediante enfriamiento por pulverización de aire-agua para un engranaje cónico (véase la figura 2.14). Aplicando un breve enfriamiento intensivo, se formó una capa superficial martensítica; interrumpiendo el enfriamiento intensivo después de un tiempo determinado, se realizó un autotemplado posterior de esta capa superficial. Este auto temple de la capa superficial martensítica se produce cuando el calor residual del núcleo del engranaje cónico no totalmente templado fluye hacia la superficie. [3]

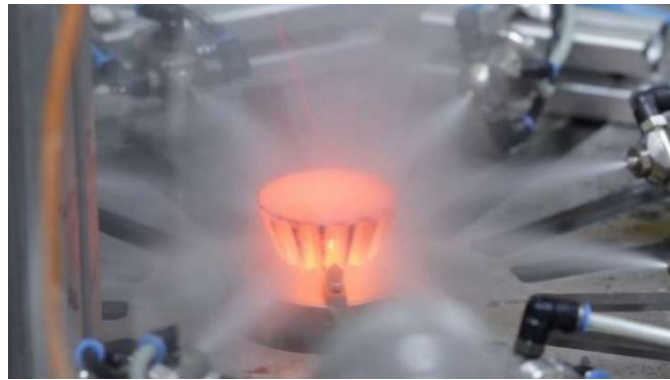


Figura 2.14: Temple de un engranaje cónico mediante rotación y spray de aire-agua [3]

2.2. Desgaste

El desgaste de los metales ocurre por el desplazamiento plástico del material superficial y subsuperficial, así como por el desprendimiento de partículas que forman residuos de desgaste. En los metales, este proceso puede ocurrir por contacto con otros metales, sólidos no metálicos, líquidos en movimiento, o partículas sólidas o gotas de líquido arrastradas por gases en movimiento. [9]

El desgaste implica el daño en una superficie sólida debido al movimiento relativo entre dicha superficie y una o más sustancias en contacto, y generalmente consiste en una pérdida progresiva de material de la superficie desgastada. Puede incluir oxidación, corrosión, fluencia, daño por fatiga, efectos de fricción, golpes de impacto, "pseudomachining" debido a superficies rugosas, y la acción de corte y deformación de partículas abrasivas. [9]

El desgaste puede provocar alteración de dimensiones críticas, aumento de la vibración, daño por fatiga, obstrucción de pasajes y contactos críticos debido a residuos, generación de partículas abrasivas, fuga de fluidos desde recintos, funcionamiento ineficiente y fallo del sistema. [9]

2.2.1. Clasificación del desgaste

Uno de los métodos más simples de clasificar el desgaste se basa en la presencia o ausencia de lubricantes efectivos, denominándolo desgaste lubricado y desgaste no lubricado. El desgaste también puede clasificarse por mecanismos. Por ejemplo, la siguiente clasificación de modos de desgaste se utilizó en la Tecnología de Fricción, Lubricación y Desgaste, Volumen 18 del Manual ASM [9]:

- *Desgaste por partículas o fluidos:*
 - Desgaste abrasivo
 - Desgaste de pulido
 - Erosión por partículas sólidas
 - Erosión por cavitación
 - Erosión por impacto de líquidos
 - Erosión por lodo
- *Desgaste por rodadura, deslizamiento o impacto:*
 - Desgaste por deslizamiento y adhesión
 - Desgaste fretting
 - Desgaste por contacto de rodadura
 - Desgaste por impacto
- *Desgaste asistido químicamente:*
 - Desgaste corrosivo
 - Desgaste oxidativo

Un tercer enfoque para la clasificación del desgaste enfatiza la naturaleza de los materiales en contacto y las condiciones experimentales, utilizando términos descriptivos

ampliamente entendidos y aceptados. A continuación, se presenta un ejemplo de este tipo de clasificación [9]:

- *Metal contra abrasivos no metálicos:*
 - Desgaste de escariado o trituración a alta tensión:
 - En húmedo, como en molinos de bolas y de barras
 - En seco, como en trituradoras de mandíbulas o de rodillos
 - Desgaste de raspadura o deslizamiento a baja tensión:
 - En húmedo, como en tornillos transportadores para arena húmeda
 - En seco, como contra arados o dispositivos para movimiento de tierra operando en suelo seco
 - Impacto de abrasivos sueltos (erosión):
 - En húmedo, como contra impulsores en bombas de lodo
 - En seco, como en el arenado
- *Metal contra metal:*
 - Desgaste por deslizamiento:
 - Lubricado, como en el casquillo de una biela o un eje en un cojinete
 - No lubricado, como en sujetadores, tuercas y pernos
 - Desgaste por rodadura:
 - Lubricado, como en rodamientos y engranajes
 - No lubricado, como en ruedas sobre rieles
- *Impacto de líquidos o vapor sobre metales:*
 - Vapor húmedo, como en turbinas
 - Gases de combustión, como en turbinas de gas
 - Agua, como en impulsores de bombas
 - Cavitaciones, como en líquidos turbulentos de alta velocidad en movimiento

2.2.2. Tipos de desgastes en engranajes

No todo el desgaste en los dientes de engranajes es perjudicial. A menudo, se necesita una pequeña cantidad para mejorar los flancos de los dientes, pero un desgaste excesivo es indeseable. La mayoría de los engranajes se fabrican con un estándar mínimo de

precisión aceptable y se espera que mejoren su conformidad superficial durante el funcionamiento. Cómo se logra este período de adaptación tiene una profunda influencia en el rendimiento posterior de un par de engranajes. [21]

Los tipos más comunes de desgaste que ocurren en un par de engranajes son el pitting, micro-pitting, adhesión, abrasión, pulido y scuffing.

La acción en el punto de contacto de los dientes del engranaje es la de dos superficies con curvatura externa. Si los materiales del engranaje fueran infinitamente rígidos, el contacto sería solo una línea, como se muestra en la Figura 2.15. En realidad, debido a la elasticidad de los materiales, el perfil del diente se deforma un poco y, como consecuencia, la fuerza transmitida actúa sobre un área rectangular pequeña. La tensión resultante se llama tensión de Hertz, ver Figura 2.16. [17]

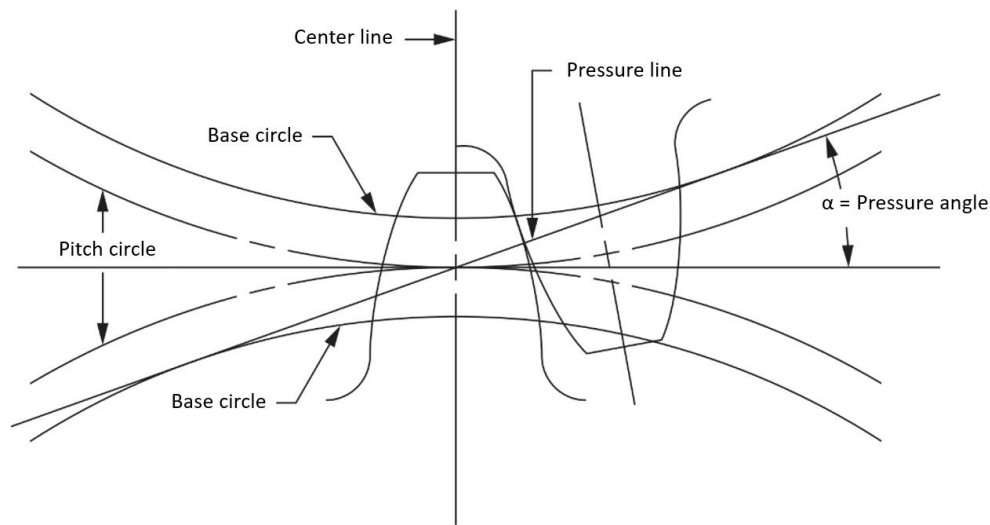


Figura 2.15: Ángulo de presión y línea de presión en un engranaje recto [17]

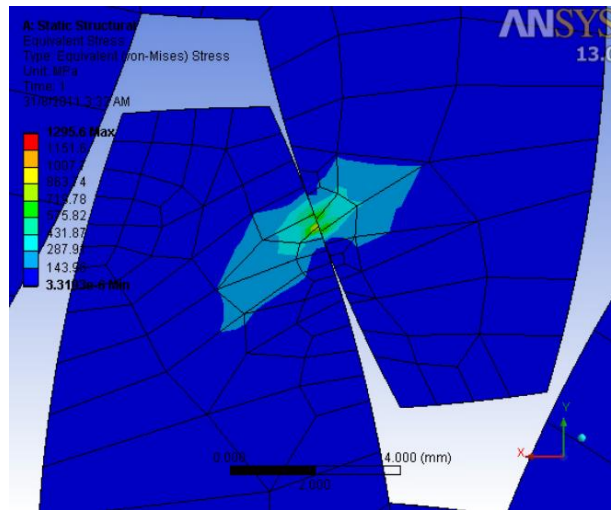


Figura 2.16: Tensión de Hertz mediante simulación FEM de los dos engranajes rectos en contacto [18]

Esta tensión genera fatiga en el diente conocida como Fatiga Hertziana. El pitting y el micropitting son dos modos de falla de los dientes de engranajes relacionados con la lubricación y causados por la Fatiga Hertziana.

Pitting

El pitting es un modo de falla común en los dientes de los engranajes debido a que están sometidos a altas tensiones de contacto Hertzianas y a numerosos ciclos de estrés.

El pitting es un fenómeno de fatiga que ocurre cuando una grieta de fatiga se inicia ya sea en la superficie del diente del engranaje o a una pequeña profundidad por debajo de la superficie. La grieta generalmente se propaga una corta distancia en dirección aproximadamente paralela a la superficie del diente antes de girar o ramificarse hacia la superficie. Cuando la grieta ha crecido lo suficiente como para separar un trozo de material de la superficie, se forma un pitting. Si varios pittings crecen juntos, el pitting más grande resultante a menudo se denomina "spal". Un ejemplo de pitting se muestra en la Figura 2.17. [13]



Figura 2.17: Daño provocado por pitting en el diente de un engranaje [19]

El pitting puede iniciarse en la superficie o en un defecto subsuperficial, como una inclusión no metálica. Con los dientes de engranajes, los pits son más frecuentemente del tipo iniciado en la superficie porque el espesor del film de lubricante suele ser bajo, lo que resulta en un contacto relativamente alto entre metales. La interacción entre asperezas o contactos en los defectos crea grietas iniciadas en la superficie en lugar de grietas iniciadas en la subsuperficie. Para engranajes de alta velocidad con acabados de superficie suaves, el espesor del film es mayor y el pitting iniciado en la subsuperficie, en lugar del iniciado en la superficie, puede predominar. En estos casos, el pitting generalmente comienza en una inclusión subsuperficial, que actúa como un punto de concentración de tensiones. [13]

Micropitting

En superficies de dientes de engranajes relativamente blandas, como las de engranajes de templado completo, la fatiga hertziana forma grandes pittings con dimensiones del orden de milímetros. Con engranajes endurecidos superficialmente (por ejemplo, cementados, nitrurados, endurecidos por inducción y endurecidos por llama), el pitting puede ocurrir en una escala mucho más pequeña, típicamente solo con una profundidad de alrededor de 10 μm . A simple vista, las áreas donde ha ocurrido el micropitting aparecen con un aspecto de "frosted" (congelado) y "frosting" es un término popular para referirse al micropitting. Con la microscopía electrónica de barrido (SEM), es evidente que

el micropitting procede por el mismo proceso de fatiga que el pitting clásico, excepto que los pits son extremadamente pequeños. Un ejemplo de micropitting se muestra en la Figura 2.18. [13]



Figura 2.18: Daño por micropitting en el diente de un engranaje [19]

Adhesión

El desgaste adhesivo se clasifica como "leve" si está confinado a las capas de óxido de las superficies de los dientes del engranaje. Sin embargo, si la capa de óxido se rompe y se expone el metal desnudo, generalmente ocurre una transición al desgaste adhesivo severo, conocido como "scuffing" (engranamiento brusco).

Cuando se operan por primera vez las unidades de engranajes nuevos, el contacto entre los dientes del engranaje no es óptimo debido a las imprecisiones inevitables de fabricación. Si las condiciones tribológicas son favorables, se produce desgaste adhesivo leve durante el período de adaptación ("running-in") y generalmente disminuye con el tiempo, lo que resulta en una vida útil satisfactoria para los engranajes. El desgaste que ocurre durante el período de adaptación es beneficioso si suaviza las superficies de los dientes (aumentando así el espesor específico del film lubricante) y si aumenta el área de contacto eliminando pequeñas imperfecciones mediante desgaste localizado. Para asegurar que la tasa de desgaste permanezca bajo control, los nuevos conjuntos de

engranajes deben ser sometidos a un período de adaptación siendo operados durante al menos las primeras diez horas a la mitad de la carga. [13]

Abrasión

El desgaste abrasivo en los dientes de engranajes generalmente es causado por la contaminación del lubricante con partículas duras y con bordes afilados. La contaminación ingresa a las cajas de engranajes de diversas formas, ya sea por estar incorporada desde la fabricación, generada internamente, ingresada a través de respiraderos y sellos, o agregada inadvertidamente durante el mantenimiento.

El desgaste abrasivo debido a contaminantes externos, como arena o partículas de desgaste interno, se conoce como abrasión de tres cuerpos y es un fenómeno común. La abrasión de dos cuerpos también ocurre cuando partículas duras o asperezas en un diente de engranaje desgastan la superficie del diente opuesto. [13]

Desgaste de pulido

Si los aditivos anti-enganche (EP) de alta presión presentes en el lubricante son demasiado químicamente reactivos, pueden causar pulido de las superficies de los dientes del engranaje hasta que alcancen un acabado brillante tipo espejo. Aunque los dientes del engranaje pulidos pueden verse bien, el desgaste de pulido es indeseable porque generalmente reduce la precisión de los engranajes al desgastar los perfiles de los dientes alejándolos de su forma ideal. [13]

Scuffing (“engranamiento brusco”)

El scuffing se define como un daño localizado causado por la soldadura de fase sólida entre superficies deslizantes. Se acompaña de la transferencia de metal de una superficie a otra debido a la soldadura y desgarro. Puede ocurrir en cualquier contacto de deslizamiento y rodadura donde la película de aceite no es lo suficientemente gruesa como para separar las superficies. Los síntomas del scuffing son superficies rugosas, opacas y desgarradas a nivel microscópico, como se muestra en la Figura 2.19. [13]

El scuffing es una falla severa que puede llevar a la fractura y el desgaste acelerado de los dientes de los engranajes y otros componentes en contacto. Es importante mantener una lubricación adecuada y controlar las condiciones de operación para evitar el scuffing y garantizar la vida útil y el rendimiento confiable de los sistemas de engranajes.

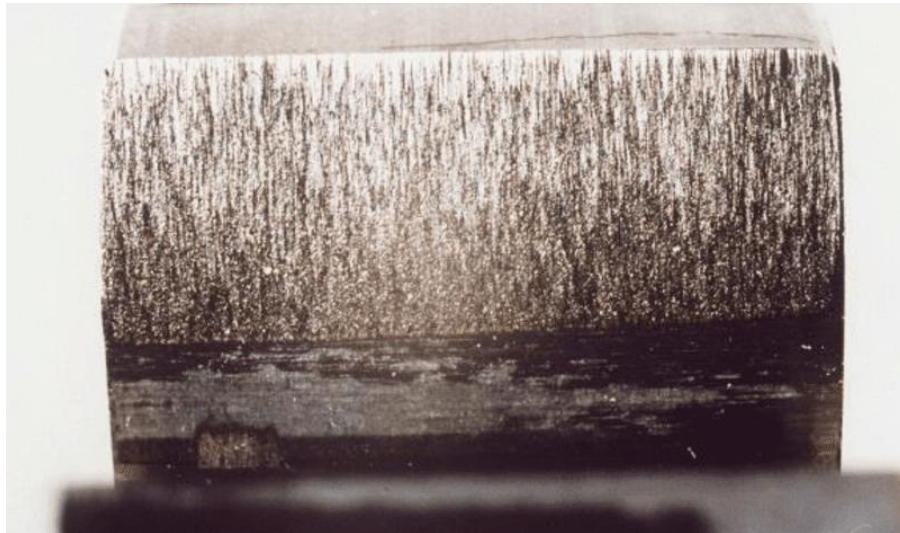


Figura 2.19: Scuffing que provoca soldaduras y deslizamientos de los flancos de dientes del engranaje [19].

El scuffing puede ocurrir en los dientes de engranajes cuando operan en el régimen de lubricación límite. Si la película de lubricante es insuficiente para evitar un contacto significativo entre metal y metal, las capas de óxido que normalmente protegen las superficies de los dientes del engranaje pueden romperse, y las superficies de metal desnudo pueden soldarse entre sí. El deslizamiento que ocurre entre los dientes del engranaje resulta en el desgarramiento de las uniones soldadas, transferencia de metal y daño catastrófico. [13]

2.3. Características de los engranajes rectos

Los engranajes rectos (*spur gears*) tienen dientes rectos paralelos al eje del árbol que los soporta. La forma curvada de las caras de los dientes de los engranajes rectos tiene una geometría especial llamada curva involuta. Con esta forma, es posible que dos engranajes trabajen juntos con una transmisión de potencia uniforme y positiva. [17]

La involuta es uno de los tipos de curvas geométricas llamadas curvas conjugadas. Cuando dos dientes con tales perfiles engranan y giran, hay una relación constante de velocidad angular entre ellos. Desde el momento del contacto inicial hasta el desenganche, la velocidad del engranaje conductor tiene una relación constante con la del engranaje conducido. La acción resultante en los dos engranajes es muy uniforme. Si no fuera así, habría algunas aceleraciones y desaceleraciones durante el engrane y el desengrane, lo que causaría vibraciones, ruido y peligrosas oscilaciones torsionales en el sistema. [17]

2.3.1. Fuerzas y tensiones en un engranaje recto

La transmisión de potencia en un sistema de engranajes se realiza de la siguiente manera: la potencia se envía desde un motor y es recibida por el eje de entrada, que gira a la velocidad del motor y, por lo tanto, recibe un par. [17]

El eje de entrada transmite la potencia desde el acoplamiento hasta el punto donde se monta el piñón. A través de la chaveta del eje, la potencia se transmite desde el eje al piñón. Los dientes del piñón impulsan los dientes del engranaje y, por lo tanto, transmiten la potencia al engranaje. Pero nuevamente, la transmisión de potencia implica en realidad la aplicación de un par durante la rotación a una velocidad determinada. El par torsional es el producto de la fuerza que actúa tangente al círculo primitivo multiplicada por el radio del engranaje. Como se muestra en la Figura 2.20, W_t es la fuerza que actúa tangente al círculo primitivo. Esta es la fuerza ejercida por los dientes del piñón sobre los dientes del engranaje. Pero si el engranaje gira a velocidad constante y transmite un valor uniforme de potencia, el sistema está en equilibrio. Por lo tanto, debe haber una fuerza tangencial igual y opuesta ejercida por los dientes del engranaje sobre los dientes del piñón. Esto es una aplicación del principio de acción y reacción. [17]

Además, debido a la forma involuta del diente, la fuerza total transmitida de un diente al diente correspondiente actúa de manera normal al perfil involuto. Esta acción se denota como W_n en la Figura 2.20. En realidad, la fuerza tangencial W_t es la componente horizontal de la fuerza total. [17]

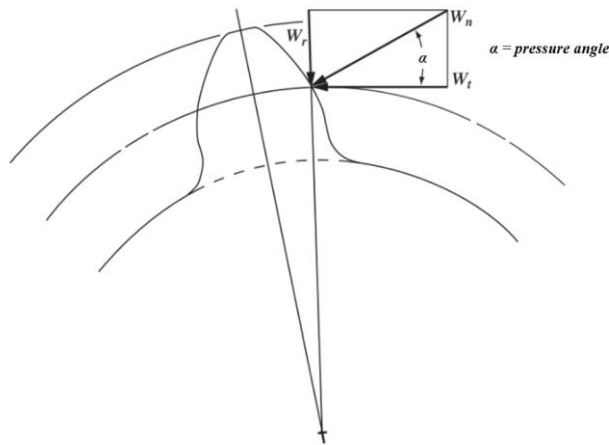


Figura 2.20: Fuerzas en un engranaje recto [17]

La fuerza tangencial W_t produce un momento flector en el diente del engranaje similar al de una viga en voladizo. Este esfuerzo de flexión resultante es máximo en la base del diente, en el chaflán que une el perfil involuto con la parte inferior del espacio del diente, como se muestra en la Figura 2.21. Este esfuerzo de flexión en el radio de la raíz del diente podría generar una falla por fatiga conocida como rotura de raíz, ver Figura 2.22 (izquierda). [17]

Debido a la fuerza normal que actúa sobre el diente y al hecho de que esta fuerza actúa sobre un área pequeña debido a la elasticidad de los materiales, se produce un esfuerzo de contacto hertziano, como se muestra en la Figura 2.21. Esto podría producir pitting en el flanco del diente o el fallo del engranaje por un modo de falla conocido como fractura del flanco, ver Figura 2.22 (derecha). [17]

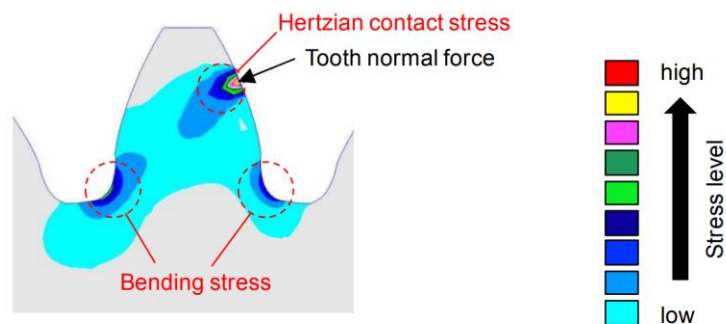


Figura 0.21: Distribución esquemática de las tensiones dentro del diente de un engranaje indicando las áreas con mayor sollicitación [20]

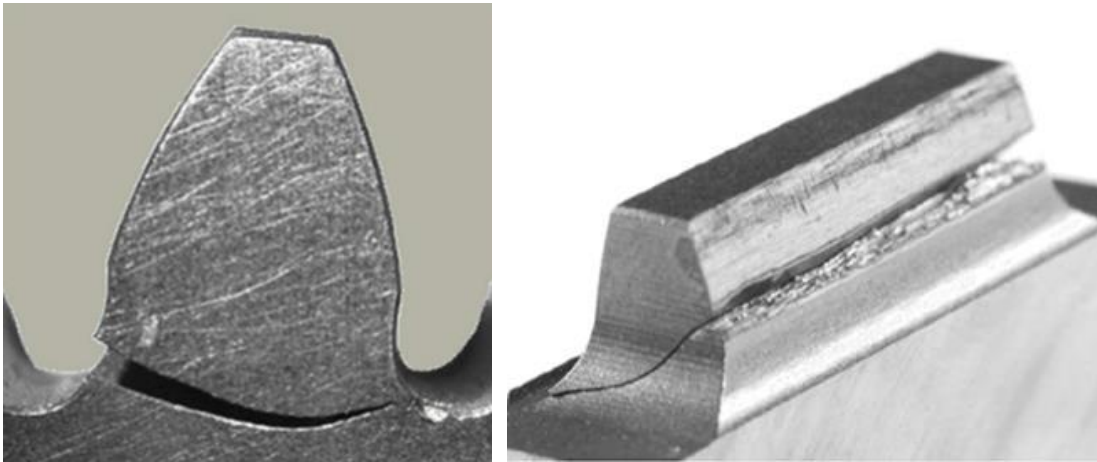


Figura 2.22: Rotura de raíz (izquierda) y rotura de flanco (derecha) [8]

2.3.2. Tratamiento térmico de los engranajes

El tratamiento térmico y el temple son, sin duda, las operaciones más críticas en la fabricación de engranajes. Son estos procesos los que proporcionan al engranaje las propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste adecuadas para soportar altas tensiones de contacto y tener una alta durabilidad.

Temple

El temple es el enfriamiento rápido desde una temperatura elevada adecuada. Esto generalmente se logra mediante la inmersión en agua, aceite, solución de polímero o sal, aunque a veces se utiliza aire forzado. Como resultado del temple, las piezas de producción deben desarrollar una microestructura aceptable tal como queda luego del temple, y en áreas críticas, propiedades mecánicas que cumplan con las especificaciones mínimas después de que las piezas son revenidas. [9]

La eficacia del temple depende de las características de enfriamiento del medio de temple en relación con la capacidad del acero para endurecerse. Por lo tanto, los resultados pueden variar al cambiar la composición del acero o las agitaciones, la temperatura y el tipo de medio de temple. [9]

Generalmente se consideran tres etapas de eliminación de calor durante el temple en líquidos, denominadas etapas A, B y C, como se muestra en la Figura 2.23.

- **Etapas A:** La primera etapa de enfriamiento se caracteriza por una envoltura de vapor del medio de temple alrededor de la pieza. La envoltura de vapor se desarrolla y se mantiene mientras el suministro de calor desde el interior de la pieza hacia la superficie excede la cantidad de calor necesaria para evaporar el medio de temple y mantener la fase de vapor. En esta etapa, la transferencia de calor es muy baja y ocurre principalmente por radiación a través de la envoltura de vapor. Esta etapa es responsable de muchas de las manchas superficiales que se encuentran durante el temple. Rociadores de alta presión, fuerte agitación y aditivos para mejorar la velocidad pueden eliminar esta etapa. [16].
- **Etapas B:** También llamada etapa de ebullición nucleada, es donde ocurren las tasas de enfriamiento más altas. Durante este período, el envoltorio de vapor colapsa y se alcanzan altas tasas de extracción que están asociadas con la ebullición nucleada del medio de temple en la superficie del metal. El calor se elimina rápidamente de la superficie a medida que el medio de temple líquido entra en contacto con la superficie del metal y se vaporiza. [9]
- **Etapas C:** Se llama etapa de enfriamiento líquido. Comienza cuando la temperatura de la superficie del metal se reduce por debajo del punto de ebullición del líquido de temple. Por debajo de esta temperatura, la ebullición se detiene y el enfriamiento se lleva a cabo por conducción y convección hacia el medio de temple. Las tasas de enfriamiento en la etapa C dependen de la viscosidad del medio de temple. [9]

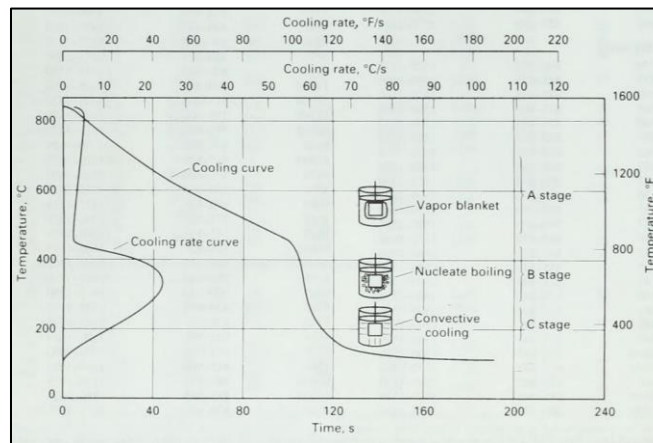


Figura 2.23: Curva de enfriamiento y curva de velocidad de enfriamiento en el centro de una pibeta de 25 mm de diámetro enfriada con agua a 95°C que fluye a 15 m/min [9].

La mayoría de los diferentes medios utilizados para el temple se nombran en la siguiente lista: agua, soluciones acuosas de salmuera, soluciones cáusticas acuosas, aceites, soluciones poliméricas acuosas, sales fundidas, metales fundidos, gases, lechos fluidizados, neblinas, rociadores y matrices secas. [9]

Como medio de temple, el agua pura se acerca a la máxima velocidad de enfriamiento alcanzable en un líquido. Otras ventajas son que es económica y rápidamente disponible, y se puede desechar fácilmente sin problemas de contaminación o riesgos para la salud. Una desventaja del agua pura como medio de temple es que su alta velocidad de enfriamiento persiste en todo el rango de temperaturas más bajo, lo que puede dar lugar a deformaciones o grietas. Otra desventaja de usar agua pura es que su etapa de envoltura de vapor puede prolongarse. Esta prolongación varía según el grado en que la complejidad de la pieza que se está templando favorece la retención de vapor y la temperatura del agua de temple, y da como resultado una dureza desigual. [9]

Los aceites de temple se pueden dividir en varios grupos distintos. Basados en su composición, efecto de temple y temperatura de uso, los aceites de temple se clasifican en convencionales, de enfriamiento rápido, de martemperizado o temple en caliente: [9]

- Los aceites de temple convencionales son aceites minerales, a veces contienen antioxidantes; sin embargo, no contienen aditivos que alteren sus efectos de temple.
- Los aceites de enfriamiento rápido son mezclas de aceite mineral que contienen aditivos patentados especialmente desarrollados que proporcionan efectos de enfriamiento más rápidos; además, pueden ser compuestos con antioxidantes, agentes humectantes y otros aditivos.
- Los aceites de martemperizado o temple en caliente son aceites minerales de tipo parafínico refinados con solvente de muy buena estabilidad térmica y oxidativa. Los aceites de martemperizado pueden contener antioxidantes para mejorar su estabilidad ante el envejecimiento. También están disponibles con efectos de temple comparativamente altos debido a la adición de mejoradores de velocidad muy efectivos.

El medio de temple ideal tendría un alto efecto de temple inicial durante los períodos de fase de vapor y ebullición, pero se enfriaría lentamente a través de la fase final de convección (fase de enfriamiento líquido). El agua fría, y especialmente las soluciones acuosas de sales inorgánicas, muestran las velocidades iniciales de temple más altas, pero también se enfrían muy rápidamente al final del proceso de temple; es decir, durante la fase de convección. Todos los aceites de temple tienen efectos de temple considerablemente más bajos que el agua o las soluciones acuosas de sales inorgánicas. Sin embargo, la extracción de calor es más uniforme y particularmente lenta al final del ciclo de enfriamiento; es decir, durante la fase de convección. Como resultado, los peligros de deformación o grietas se reducen de manera decisiva. [9]

Revenido

El revenido es un proceso en el cual el acero previamente endurecido o normalizado se calienta a una temperatura por debajo del rango de transformación y luego se enfría a una velocidad adecuada, principalmente para aumentar la ductilidad y tenacidad. Los aceros pasan por este proceso mediante el recalentamiento después del endurecimiento para obtener valores específicos de propiedades mecánicas y para aliviar las tensiones del temple y asegurar la estabilidad dimensional. El revenido generalmente sigue al temple a partir de una temperatura superior a la temperatura crítica. [9]

Las principales variables del revenido son la temperatura de revenido, el tiempo de revenido y la velocidad de enfriamiento.

Se han establecido varias relaciones empíricas entre la resistencia a la tracción y la dureza de los aceros revenidos, de modo que la medición de la dureza se utiliza comúnmente para evaluar la respuesta de un acero al revenido. Como se muestra en la Figura 2.24, tanto la dureza a temperatura ambiente como la resistencia disminuyen a medida que se incrementa la temperatura de revenido. La ductilidad a temperaturas ambiente, medida ya sea por alargamiento o reducción en el área, aumenta con la temperatura de revenido. [9]

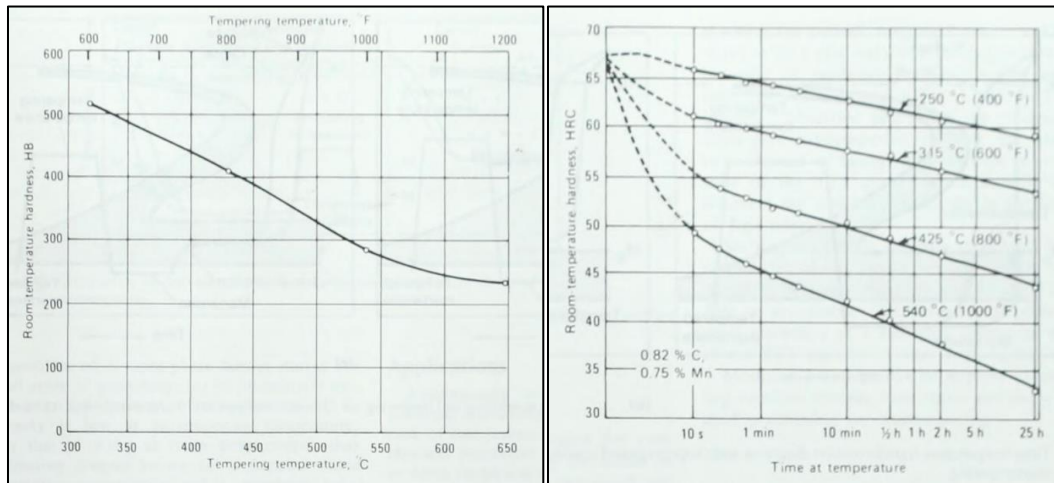


Figura 2.24: Efecto de la temperatura de revenido en la dureza a temperatura ambiente del acero AISI 1050 (izquierda) y efecto del tiempo a cuatro temperaturas de revenido diferentes en la dureza a temperatura ambiente del acero 0,82%C templado (derecha) [9].

La difusión del carbono y los elementos de aleación necesarios para la formación de carburos depende de la temperatura y el tiempo, por lo que el tiempo de revenido es un factor importante a tener en cuenta. Como se muestra en la Figura 2.24, se producen cambios rápidos en la dureza a temperatura ambiente al inicio del revenido en tiempos inferiores a 10 segundos. Cambios menos rápidos, pero aún significativos, en la dureza ocurren en tiempos de 1 a 2 horas. Para obtener resultados consistentes y reducir la dependencia de las variaciones en el tiempo, los componentes generalmente se revienen durante 1 a 2 horas. [9]

Otro factor que puede afectar las propiedades de un acero es la velocidad de enfriamiento desde la temperatura de revenido. Aunque las propiedades de tracción no se ven afectadas por la velocidad de enfriamiento, la tenacidad puede disminuir si el acero se enfría lentamente a través del rango de temperatura de 375 a 575 °C. También puede afectar alargamiento y reducción en el área. [9]

3. Objetivo y Enfoque

La calidad de la unión de componentes híbridos depende fundamentalmente de la calidad de la zona de unión local entre los dos materiales. El tipo de unión presente en la zona de unión, así como sus propiedades cualitativas y cuantitativas, determinan en gran medida la resistencia de la unión y, por lo tanto, la calidad global de la misma. Debido a esto, existe una estrecha relación entre las propiedades microestructurales y mecánico-tecnológicas de un componente híbrido, que será determinada en este trabajo.

En este estudio, se investigará la calidad de la unión de un engranaje híbrido mediante probetas metalográficas y mediciones de micro dureza. El análisis se realizará en un engranaje híbrido hecho de materiales de la misma especie, como dos aleaciones de acero. La estructura híbrida de los productos semiacabados se creó mediante dos procesos de soldadura: recubrimiento con alambre láser y recubrimiento con polvo de plasma. En ambos casos, el núcleo del producto semiacabado y, por lo tanto, del futuro engranaje, consiste en acero C22.8 (equivalente a un acero SAE 1022M). Para la capa de recubrimiento en el área de las futuras flancos de los dientes se utilizaron dos aleaciones de acero diferentes, X45CrSi9-3 (equivalente a SAE HNV3) y 100Cr6 (equivalente a AISI 52100).

Como parte de este trabajo, los engranajes se forman primero mediante forja en matriz cerrada. La herramienta necesaria para esto y los parámetros del proceso necesarios ya están disponibles, pero necesitan ser comprobados y ajustados si es necesario. Para investigar la unión, se toman muestras del engranaje forjado y de los productos semiacabados no formados, y se realizan investigaciones metalográficas para establecer una conexión entre las propiedades microestructurales y las futuras propiedades mecánicas deseadas, y así caracterizar integralmente la calidad de la unión. Al examinar los engranajes y los productos semiacabados, se puede analizar la influencia de los procesos de soldadura utilizados y los materiales utilizados en la formación de la zona de unión y, por lo tanto, en la resistencia de la unión y calidad de la unión, antes y después de la forja.

4. Desarrollo e investigaciones experimentales

El engranaje de dientes rectos desarrollado en este trabajo consiste en una combinación de acero/acero y, por lo tanto, representa una asociación entre materiales del mismo tipo. Este tipo de hibridación, como se explicó anteriormente, tiene como objetivo aumentar la eficiencia del material mediante la disposición de materiales en el componente que cumple con los requisitos, como se muestra en la Figura 4.1.

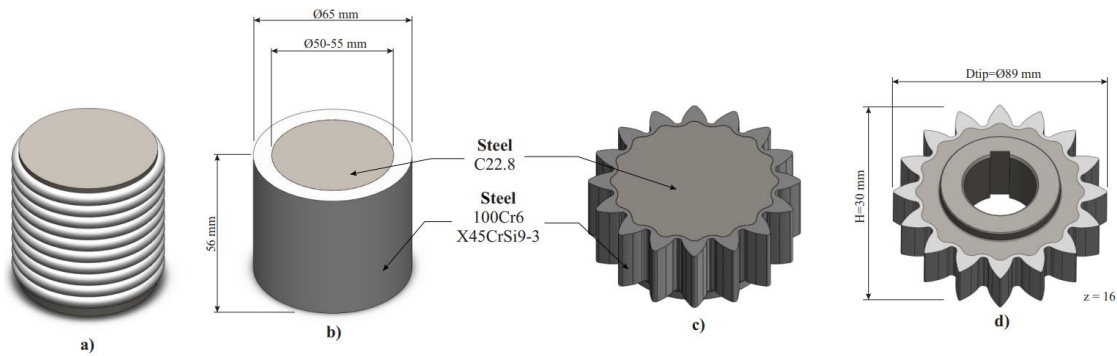


Figura 4.1: Engranaje recto híbrido. a) Producto parcialmente semiacabado b) Producto parcialmente semiacabado mecanizado c) Engranaje recto forjado d) Engranaje recto forjado mecanizado

Durante su funcionamiento, un engranaje de dientes rectos tiene una distribución de carga diferente. En las superficies de contacto entre los flancos y raíces de los dientes que se entrelazan, las cargas son mucho más altas que en el interior del engranaje, donde solo se presenta una carga estructural. Esto requiere una alta resistencia al desgaste en la capa superficial del engranaje. Por otro lado, en el interior se necesita una aleación de acero con alta tenacidad, ductilidad y resistencia a la fractura. Al aplicar un revestimiento resistente al desgaste en un núcleo de acero de bajo costo, se pueden cumplir óptimamente los requisitos con respecto a las tensiones a las que está sometido el engranaje.

El proceso completo para fabricar un engranaje híbrido de dientes rectos consta de cuatro etapas, como se muestra en la Figura 4.2. En la primera etapa, los dos componentes de acero se unen mediante soldadura láser o de plasma. Luego, la pieza semiacabada se calienta en un horno para la posterior forja en matriz cerrada del componente. Después

de eso, el engranaje forjado se somete a tratamiento térmico y maquinado para obtener las propiedades mecánicas y tolerancias requeridas.

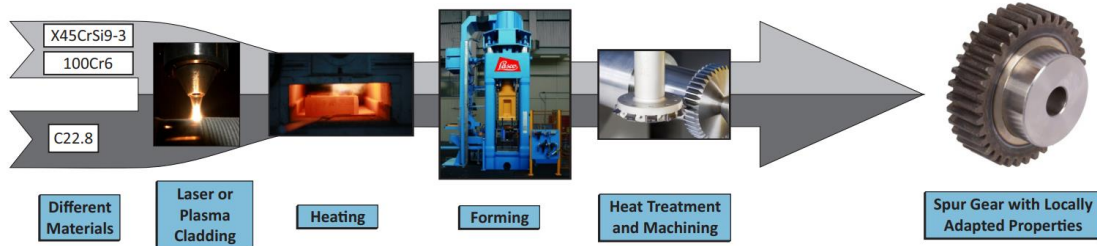


Figura 4.2: Cadena de procesos para fabricar un engranaje recto híbrido

Para la primera etapa en la cadena de procesos, los productos semiacabados son diseñados con una disposición coaxial de materiales que corresponde a la carga colectiva de un engranaje de dientes rectos. Para la producción de los productos semiacabados, se recubren cilindros en blanco hechos de C22.8 con una capa metálica de 100Cr6 mediante recubrimiento con polvo de plasma o una capa metálica de X45CrSi9-3 mediante recubrimiento con alambre láser. La Tabla 4.1 muestra las composiciones químicas de la aleación de acero utilizada.

Tabla 4.1: Composición química de los aceros utilizados para los engranajes rectos [11; 12; WPI22]

Steel	[Ma.-%]									
	C	Si	Mn	Cr	S	P	Mo	Ni	Cu	Others
C22.8	0,18-0,23	<0,4	0,3-0,9	0-0,3	0-0,015	0-0,025	0-0,08	0-0,3	0-0,3	(Ti)-(V)-(Nb)-(Al)
100Cr6	0,93-1,05	0,15-0,35	0,25-0,45	1,35-1,6	0-0,015	0-0,025	0-0,1	-	-	-
X45CrSi9-3	0,4-0,5	2,7-3,3	0-0,6	8-10	0-0,03	0-0,04	-	0-0,5	-	-

El posterior conformado de los productos semiacabados soldados se realiza mediante forja en matriz cerrada. Todo el proceso incluye el calentamiento de las piezas en bruto en un horno, el conformado y el posterior tratamiento térmico integrado en el proceso. El procesamiento posterior del engranaje de dientes rectos hacia su geometría final no se considera en este trabajo.

Después del conformado y tratamiento térmico del engranaje de dientes rectos, se investiga la calidad de la unión entre los dos materiales mediante el análisis metalográfico de la zona de unión con imágenes de microscopía óptica. Se identifica y analiza la microestructura en la zona de unión y se realizan mediciones de micro dureza en muestras de referencia. Los pasos del proceso de conformado para la producción de los engranajes de dientes rectos híbridos y la investigación final de la calidad de la unión son los temas principales de este trabajo y se discutirán más adelante.

4.1. Conformado de un engranaje recto híbrido

La fabricación de componentes híbridos forjados es bastante desafiante y, por lo tanto, el diseño del proceso correspondiente puede presentar varios problemas específicos. En este caso, la etapa de forjado no solo es responsable de un flujo de material sin fallos y un llenado preciso del molde, sino también de mejorar las propiedades mecánicas locales y la calidad de la zona de unión. El comportamiento de conformado óptimo se logra mediante el diseño preciso del sistema de herramientas de conformado, así como mediante el desarrollo de un concepto de calentamiento adecuado. [2]

Se utilizaron dos tipos de prensas para el conformado de diferentes piezas. Para las primeras pruebas, se utilizó la prensa hidráulica de Schirmer + Plate. Más adelante, el proceso se llevó a cabo en la prensa de tornillo SPR 500 de LASCO. Todo el grupo de forjado consta de la prensa, la herramienta de forja y un horno. El transporte de la pieza en caliente hacia la herramienta se realizó manualmente por empleados de IFUM y, en algunos casos, por mí mismo.

4.1.1. Calentamiento de la materia prima

En el caso de piezas híbridas de combinación de acero-acero, solo se esperan ligeras diferencias en las tensiones de fluencia a temperaturas de conformado similares (aproximadamente 1200 °C). Por lo tanto, los compuestos de acero-acero mostrarán un comportamiento de conformado aproximadamente igual durante el proceso de forjado, incluso si tienen un perfil de temperatura uniforme. La Figura 4.3 muestra un ejemplo de esto, donde se realizaron pruebas de compresión a temperaturas de conformado relacionadas con el proceso para los materiales C22.8 y 41Cr4 como parte de otras

investigaciones. En esta imagen es posible ver que una combinación de materiales acero-acero se comporta de manera similar a la misma temperatura, mostrando ligeras diferencias en las curvas de flujo de estos materiales incluso a diferentes tasas de deformación constantes [1]. Debido a este hecho, los productos semiacabados híbridos para el engranaje de dientes rectos se calentarán de manera homogénea a la temperatura de forjado convencional. Para este propósito, las piezas en bruto se calentaron en un horno eléctrico a una temperatura de 1200 °C, pero también se realizaron pruebas con 1280 °C. Con el fin de lograr una distribución homogénea de temperatura en la pieza en bruto, se mantuvieron las mismas en el horno durante 30 minutos. El horno utilizado fue un horno de cámara Nabertherm N 41/H, como se muestra en la Figura 4.4. Las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 4.2.

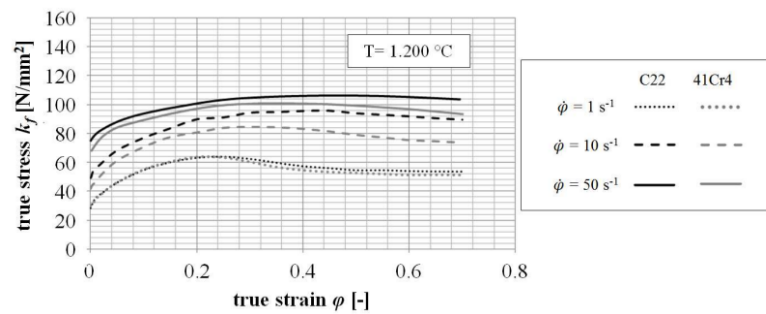


Figura 4.3: Curvas de flujo de acero C22.8 (1.0402) y 41Cr4 (1.7035) determinadas por medio de ensayos de compresión en probetas cilíndricas a 1200 °C [1]



Figura 4.4: Horno de cámara usado para calentar las materias primas

Tabla 4.2: Características del horno utilizado para el calentamiento de las materias primas

<i>Technical specifications of Chamber Furnace Nabertherm N 41/H</i>	
Tmax	1280 °C
Process flush rate	10 – 15 l/min
Connected load	15 kW
Voltage	400 V
Heating time	105 min

La temperatura elegida fue de 1200 °C porque, en los aceros, en el rango de 1100 °C a 1200 °C, la resistencia de fluencia se reduce, la conformabilidad del acero aumenta y se logra un llenado adecuado del molde y el refinamiento de la microestructura (por ejemplo, mediante recristalización dinámica) en un solo paso de conformado. [4]

Debido al riesgo de daño no deseado en el troquel debido a la dura capa de óxido, las piezas en bruto se colocaron en un recipiente con carbón de recocido durante el proceso de calentamiento para contrarrestar la formación de la capa de óxido.

4.1.2. Forjado del engranaje recto

Como se explicó anteriormente, algunas muestras del engranaje híbrido se formaron en la prensa hidráulica Schirmer + Plate y otras en la prensa de tornillo LASCO SPR 500. Las características de ambas prensas se muestran en la Tabla 4.3 y en la Tabla 4.4.

Tabla 4.3: Características de la prensa de tornillo LASCO SPR 500

<i>Technical specifications of screw press LASCO SPR 500</i>		
	Nominal pressing force	5000 kN
	Die-to- blow force	10000 kN
	Gross energy	40 KJ
	Ram stroke	420 mm
	Spindle diameter	240 mm
	Ram surface (W x D)	750 x 800 mm
	Spindle speed	max. 740 mm/sec
	Hydraulic ejector force	200 kN

El sistema de herramientas utilizado fue desarrollado de manera modular y consta de una matriz inferior con la forma del engranaje; un punzón de presión, que trae la forma superior del engranaje con un agujero para igualar la diferencia de volúmenes entre la pieza en bruto y la matriz cerrada; y una placa flotante de cierre, que encierra el punzón de presión y es soportada por resortes en la prensa. El sistema de herramientas se muestra en la Figura 4.5.

El desplazamiento del material provoca el llenado de la matriz con los perfiles de los dientes dispuestos en la matriz inferior. Debido a esto, se pueden utilizar secciones de barras cilíndricas como piezas en bruto. No hay movimiento relativo entre la placa de cierre y el punzón de presión hasta que la placa de cierre está en contacto con la matriz inferior. Luego, los resortes que se encuentran entre la placa de cierre y el soporte del punzón generan la fuerza de cierre necesaria para crear una matriz cerrada. El conformado comienza tan pronto como el punzón de presión golpea la pieza en bruto.

Tabla 4.4: Características de la prensa hidráulica Schirmer + Plate

Technical specifications of hydraulic press Schirmer + Plate		
	Press force	max. 12500 kN
	Retraction force	max. 1100 kN
	Press speed at 12500 kN	max. 8,6 mm/s
	Press speed at 4670 kN	max. 26 mm/s
	Press speed at 1000 kN	max. 150 mm/s
	Stroke	500 mm
	Hydraulic ejector force	2000 kN
	Ram surface (W x D)	1250 x 1250 mm

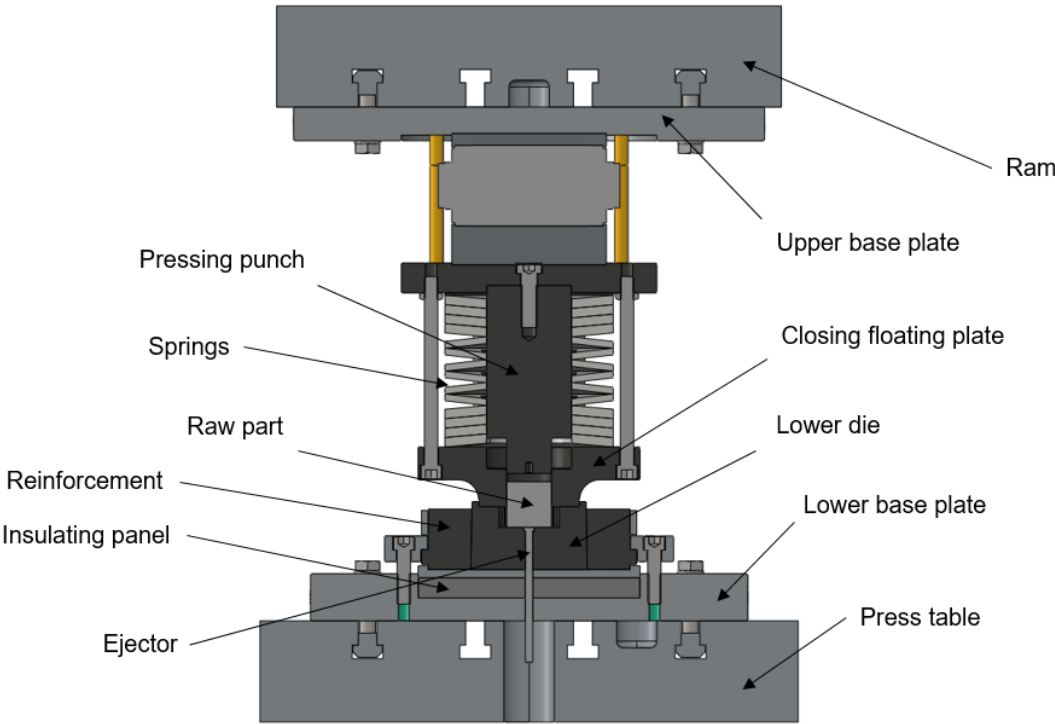


Figura 4.5: Estructura del sistema de herramientas usado para el proceso de forjado.

4.1.3. Tratamiento térmico del engranaje recto

Al finalizar el proceso de forjado, los engranajes fueron sometidos a un tratamiento térmico para templar la capa superficial de los dientes, obteniendo de esta manera las propiedades mecánicas deseadas para la pieza.

El tratamiento térmico se llevó a cabo inmediatamente después del forjado de la pieza, utilizando el calor residual para templar la capa superficial en cubos de agua. El primer paso es una breve fase de templado con un alto efecto de enfriamiento para crear una capa martensítica dura en la zona del engranaje. Con el fin de reducir la duración de la Etapa A en el templado (la capa de vapor que rodea la pieza), se realizó una agitación intensa de la pieza dentro del cubo de agua. El calor residual restante después de esta etapa de templado se utilizó para revenir la pieza en aire convencional hasta alcanzar la temperatura ambiente. Todo este proceso se llevó a cabo de forma manual.

4.1.4. Desarrollo del proceso

Durante el proceso de forjado, se desarrollaron 6 engranajes rectos de material híbrido. Antes de eso, se formaron algunas piezas de material único C22.8 para alcanzar y comprobar los parámetros correctos del proceso de formado y la herramienta. En la Figura 4.6 se muestra el sistema de herramientas montado en la prensa hidráulica Schirmer + Plate, donde se desarrollaron las primeras muestras.

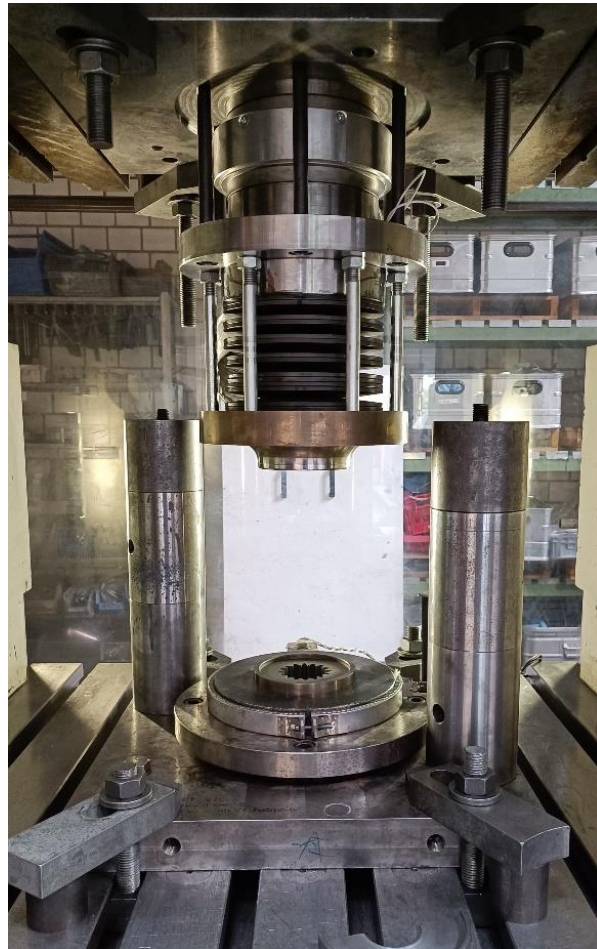


Figura 4.6: Sistema de herramientas montado en la prensa hidráulica Schirmer + Plate

En la Tabla 4.5 se muestran los parámetros y características del proceso de cada engranaje recto que fueron formados durante el desarrollo de este trabajo. Con el fin de caracterizar la calidad de la unión más adelante, es importante relacionar todos los datos observados en esta tabla.

Tabla 4.5: Parámetros de proceso para cada engranaje recto

Probe Nr.:	Cladded material	Cladded layer	Volume of raw part	Press	Heating	Temperature of the raw part	Heating duration	Forming force	Cooling
D694	X45CrSi9-3	7,5 mm	18,44 cm ³	Schirmer + Plate	Oven	1200 °C	30 min	2000 kN	Water
D701	X45CrSi9-3	7,5 mm	18,09 cm ³	Schirmer + Plate	Oven	1200 °C	30 min	2000 kN	Water
D704	X45CrSi9-3	5 mm	18,33 cm ³	Lasco	Oven	1280 °C	30 min	2000 kN	Water
D706	X45CrSi9-3	5 mm	18,3 cm ³	Lasco	Oven	1200 °C	30 min	2000 kN	Water
D714	X45CrSi9-3	5 mm	18,26 cm ³	Schirmer + Plate	Oven	1200 °C	30 min	2000 kN	Water
DO732	100Cr6	5 mm	18,62 cm ³	Schirmer + Plate	Oven	1200 °C	30 min	2000 kN	Water

Durante el proceso de formado, se instaló una cámara para registrar el desarrollo del mismo y se muestran algunas imágenes del proceso en la Figura 4.7. Es importante destacar que las imágenes presentadas a continuación se refieren a las piezas formadas en la prensa de tornillo Lasco.

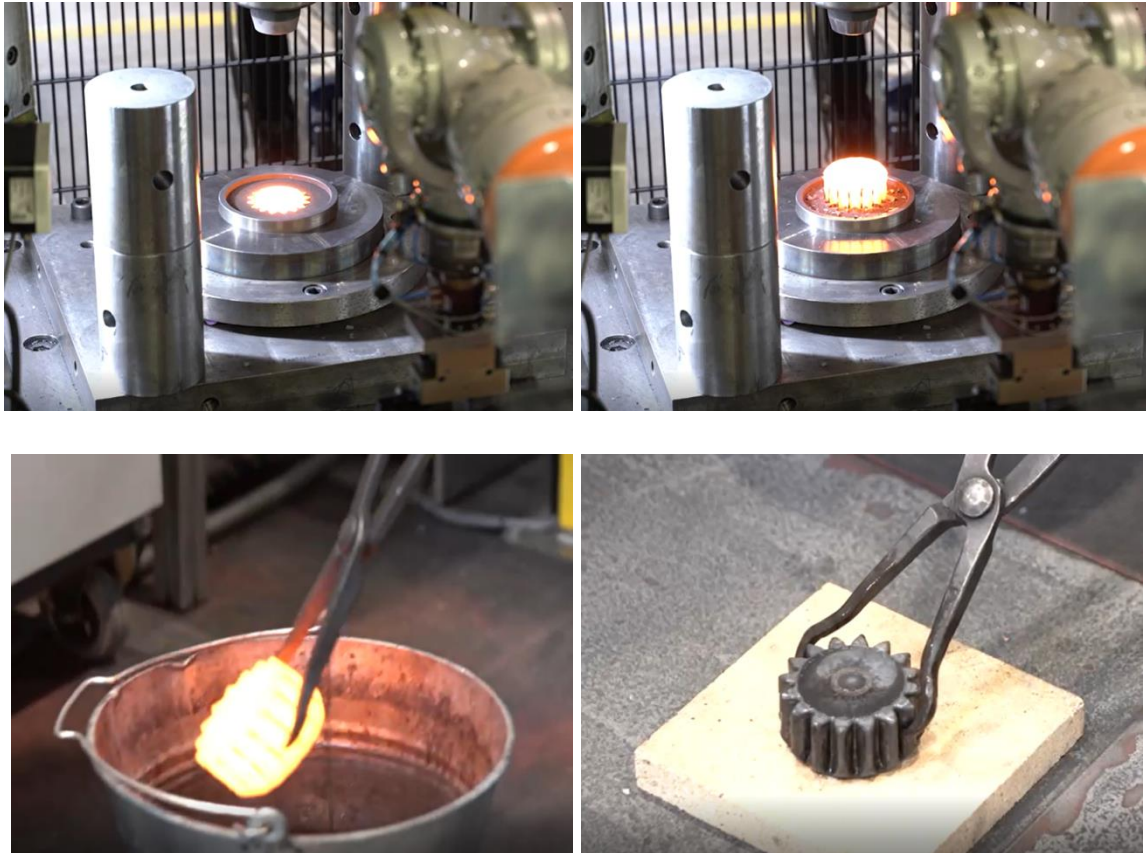


Figura 4.7: Proceso de forjado y tratamiento térmico en agua del engranaje recto.

Después del proceso de formado, las piezas fueron cortadas y arenadas para observar la disposición final entre los dos materiales.

En la Figura 4.8 se muestra un engranaje de material único C22.8 (pieza Ref. 1) para obtener los parámetros correctos del proceso de formado. Se observa una geometría correctamente formada, asegurando de esta manera que los engranajes híbridos subsiguientes serán forjados correctamente.



Figura 4.8: Probeta Ref. 1 de material único C22.8

En la Figura 4.9, se muestra un engranaje híbrido de la combinación X45CrSi9-3 y C22.8 (pieza D714) directamente en su estado después de ser formado y tratado térmicamente. Como se mencionó anteriormente, con los parámetros obtenidos en el forjado de las piezas de material único se pudo observar una geometría perfectamente formada. Solo en el radio del extremo del diente se pudo observar la textura de los cordones de soldadura del producto semiacabado, como se muestra en la Figura 4.10. Esto indica que la pieza no está completamente formada en esta pequeña zona, pero no es un problema importante ya que esta parte de la pieza se eliminará en el mecanizado final.



Figura 4.9: Engranaje recto híbrido D714 luego del conformado y el tratamiento térmico.

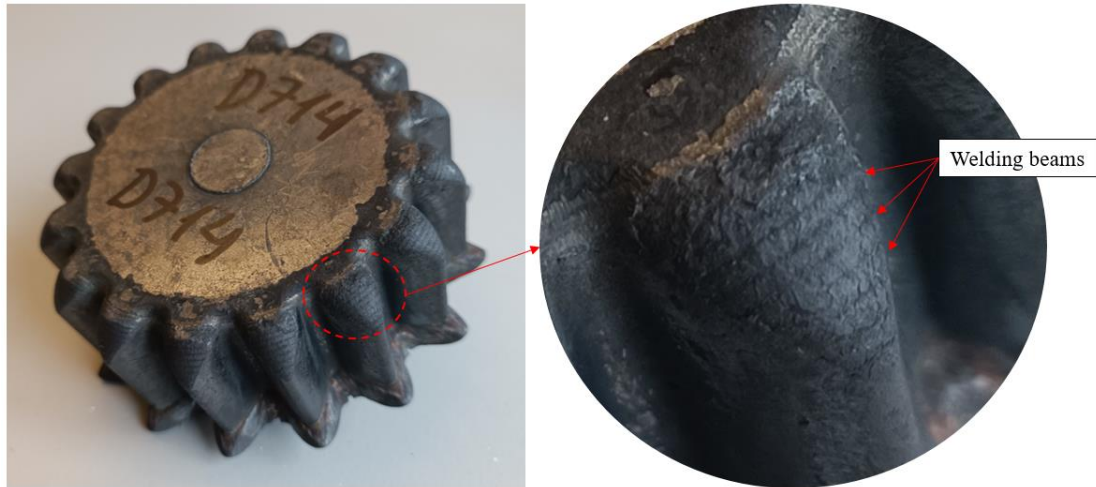


Figura 4.10: Cordones de soldadura visibles luego del conformado en el radio de la matriz de forja

En la Figura 4.11, se muestran las partes cortadas de la pieza D694. Como se puede observar en la imagen, se aprecia un arreglo y formación perfecta de la pieza, mostrando un perfil completo del diente del material revestido X45CrSi9-3. Además, es posible ver en el núcleo del engranaje la orientación de las fibras generada por el proceso de forjado, lo que brinda mejores propiedades mecánicas y resistencia a la pieza. En la Figura 4.12, en la sección longitudinal a lo largo de la dirección de deformación, se puede observar una forma ondulada de la zona de interfaz, resultante del proceso de soldadura. Más adelante en este trabajo, se discutiría un análisis metalográfico de la zona de interfaz de esta pieza.



Figura 4.11: Piezas cortadas del engranaje recto híbrido D694.

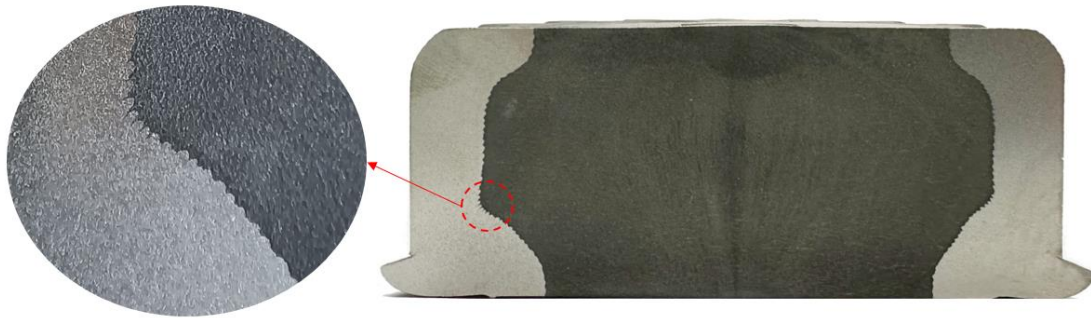


Figura 4.12: Forma ondulada en la zona de unión entre los dos materiales debido al proceso de soldadura.

En la Figura 4.13, se muestran las piezas cortadas del engranaje híbrido D704. En este caso, el ancho de la capa revestida es de 5 mm en lugar de 7,5 mm como se muestra en la parte anterior. Además, en esta pieza se realizó un aumento en la temperatura de la materia prima, elevándola de 1200 °C a 1280 °C, lo que generó una disminución en el límite de fluencia del acero y un aumento en la conformabilidad del material. Debido a ello, se puede observar que se logra un seguimiento de la forma externa perfecta de la capa revestida en comparación con la pieza D694. Además, al tener una capa más delgada de material revestido, se logra un aumento en la eficiencia del material. Sin embargo, se deben realizar pruebas de resistencia en la raíz del diente y de vida útil de la pieza para confirmar el posible uso de este grosor.

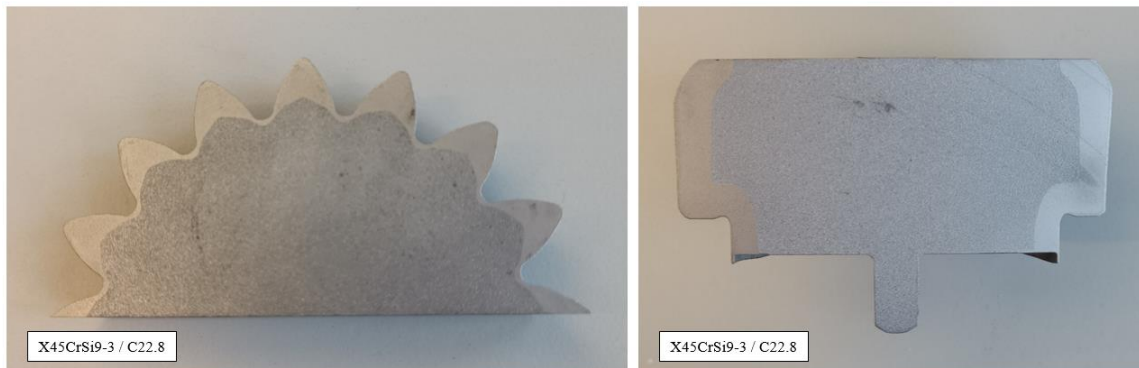


Figura 4.13: Piezas cortadas del engranaje híbrido D704

Finalmente, en la Figura 4.14, se muestran las piezas cortadas de la rueda dentada híbrida DO732 de la combinación de materiales 100Cr6 y C22.8. Como se puede observar, la geometría de la pieza se formó perfectamente, pero se pueden apreciar

algunas grietas en la zona de interfase y en la capa revestida. Un análisis de las causas de esto se realizará más adelante en este trabajo.

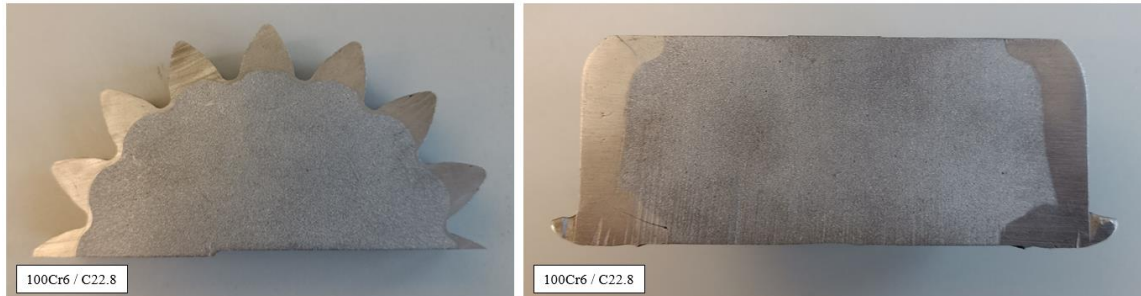


Figura 4.14: Piezas cortadas del engranaje recto híbrido DO732

Problemas encontrados

Durante la forja de los engranajes en la prensa de husillo Lasco, en el primer intento de forjar la pieza D706, se encontró que la pieza no estaba completamente formada, como se muestra en la Figura 4.15. Se puede observar que los dientes no están completamente formados y también se observan las líneas de soldadura del proceso de soldadura a lo largo de toda la dirección longitudinal de los dientes. Debido a esto, se decidió aumentar la energía en la prensa, así como elevar la temperatura de la pieza en bruto de 1200 °C a 1280 °C. Al elevar la temperatura en este rango, se logra una gran reducción en el esfuerzo de cedencia y aumenta la formabilidad del acero de las piezas. Debido a ello, la formación de la muestra D704 se realizó perfectamente, como se muestra en la Figura 4.13, pero el aumento de la energía de la prensa hizo que las matrices fueran presionados con más fuerza, lo que generó un aumento en las tensiones entre la matriz inferior y la placa de cierre flotante, provocando la falla de ambas piezas, como se muestra en la Figura 4.16.



Figura 4.15: Engranaje recto híbrido D706 conformado incorrectamente

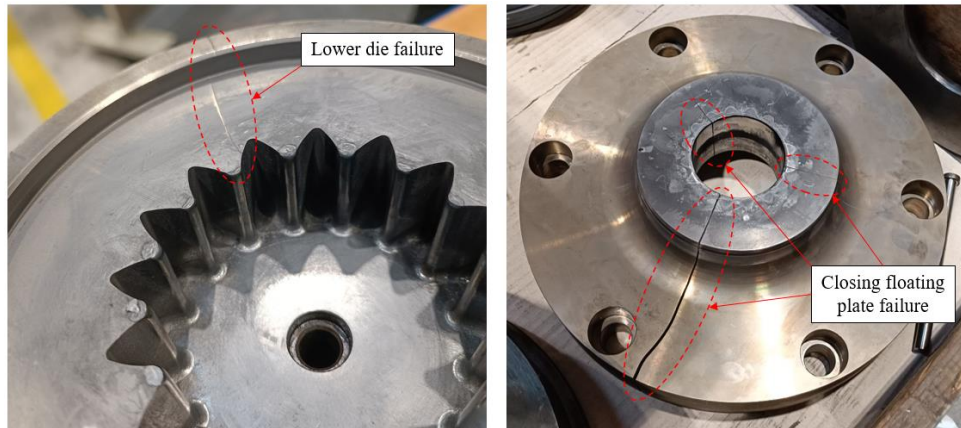


Figura 4.16: Fallas en la matriz inferior y en el plato flotante de cierre del sistema de herramientas.

La mejor aproximación en este caso para mejorar la formabilidad de la pieza habría sido aumentar la energía de la prensa en un intento y, si eso no funcionaba correctamente, aumentar la temperatura de la pieza en bruto manteniendo la energía de la prensa en los valores iniciales.

4.1.5. Mecanizado final del engranaje recto

En la Figura 4.17 se muestra un engranaje de mono material C22.8 después de las operaciones finales para obtener la geometría deseada. En este caso, como solo era una muestra para demostración, la geometría final de la rueda dentada se obtuvo mediante Electroerosión por Hilo (EDM). Desafortunadamente, no fue posible realizar pruebas

mecánicas de durabilidad y resistencia de los engranajes híbridos durante el tiempo de desarrollo de este proyecto, pero es necesario llevarlas a cabo para obtener una correcta caracterización de las propiedades de este tipo de piezas.



Figura 4.17: Geometría final del engranaje recto luego del proceso de Electroerosión por Hilo (EDM)

4.1.6. Investigaciones metalográficas

El examen metalográfico se utiliza para analizar la zona de unión de los engranajes con respecto a la microestructura y la dureza estructural. También se realiza un análisis metalográfico de los productos semiacabados para observar las modificaciones en la estructura debido al proceso de forjado y al tratamiento térmico.

Las muestras de los productos semiacabados obtenidos para realizar el análisis metalográfico se tomaron de las piezas en bruto D700 con una capa recubierta de 7,5 mm y D710 con una capa recubierta de 5 mm.

En la Figura 4.18 se muestra la posición de las probetas de los productos semiacabados para llevar a cabo el análisis metalográfico.

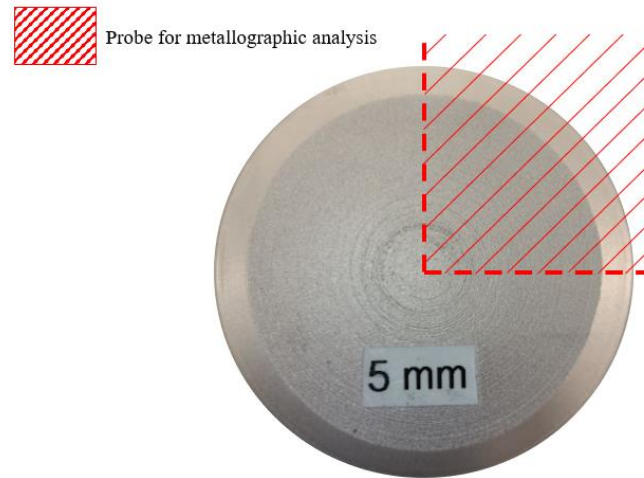


Figura 4.18: Ejemplo de los productos semi-acabados usados para análisis metalográfico

Las muestras de los engranajes obtenidas para realizar el análisis metalográfico se tomaron de las piezas D694 (con una capa recubierta de 7,5 mm.), D704 (con una capa recubierta de 5 mm.) y DO732. Esto se hizo con el fin de analizar la influencia del ancho de la capa recubierta en las propiedades finales de la rueda dentada.

En la Figura 4.19 se muestra la posición de las muestras para llevar a cabo el análisis metalográfico.

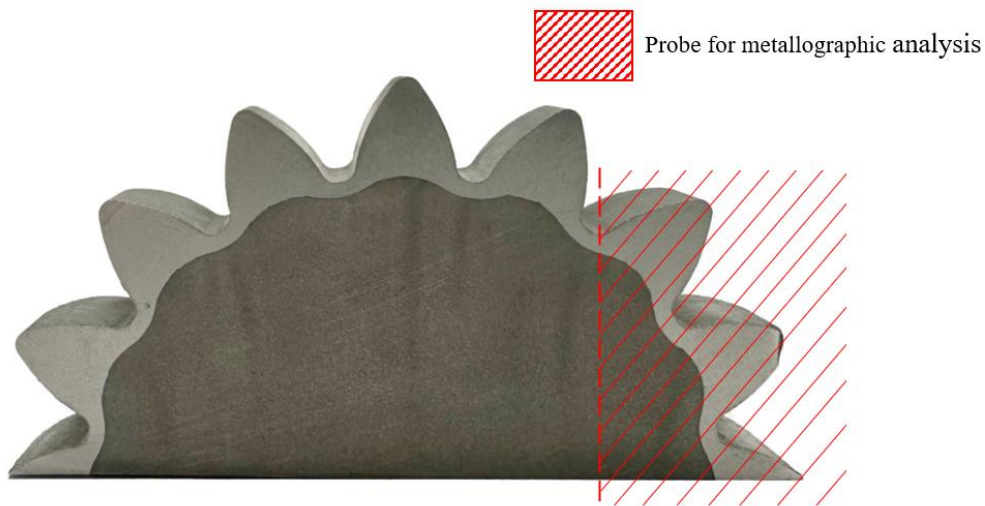


Figura 4.19: Ejemplo de los engranajes rectos y de la zona usada para el análisis metalográfico

Estas muestras fueron cortadas mediante corte húmedo a una velocidad de avance lenta para evitar cualquier tipo de tratamiento mecánico y, por lo tanto, cualquier tipo de cambio estructural. Luego, fueron preparadas de acuerdo con los procedimientos requeridos para ser analizadas por microscopio óptico.

Como parte de las investigaciones metalográficas, se realizaron mediciones de micro dureza en el engranaje y también en la pieza semiacabada para caracterizar aún más la zona de unión. Los valores de dureza Vickers se determinaron en la dirección radial desde el borde de la muestra hasta el centro de la misma en las muestras de las piezas semiacabadas, como se muestra en la Figura 4.20 (izquierda). Además, también se analizó una muestra de una pieza semiacabada a lo largo del eje, como se muestra en la Figura 4.20 (derecha). En el caso de las muestras de la rueda dentada, se determinaron los valores de dureza en la dirección radial desde el borde de la muestra hasta el centro de la misma en la punta y la raíz del diente, como se muestra en la Figura 4.21. La carga de prueba utilizada fue de 0,980 N, que corresponde al método de prueba HV 0.1 que se empleó.

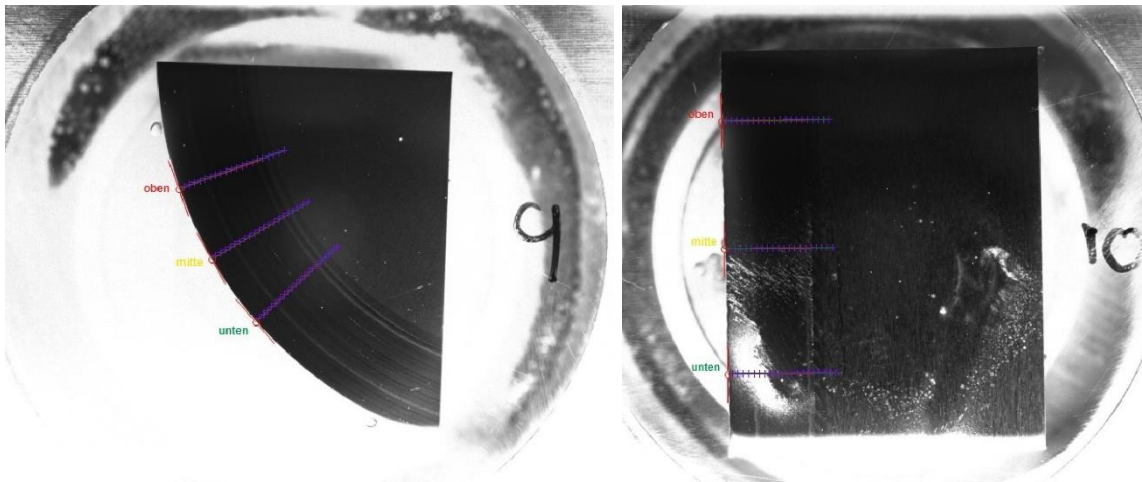


Figura 4.20: Direcciones sobre las que se realizaron mediciones de dureza en los productos semiacabados.

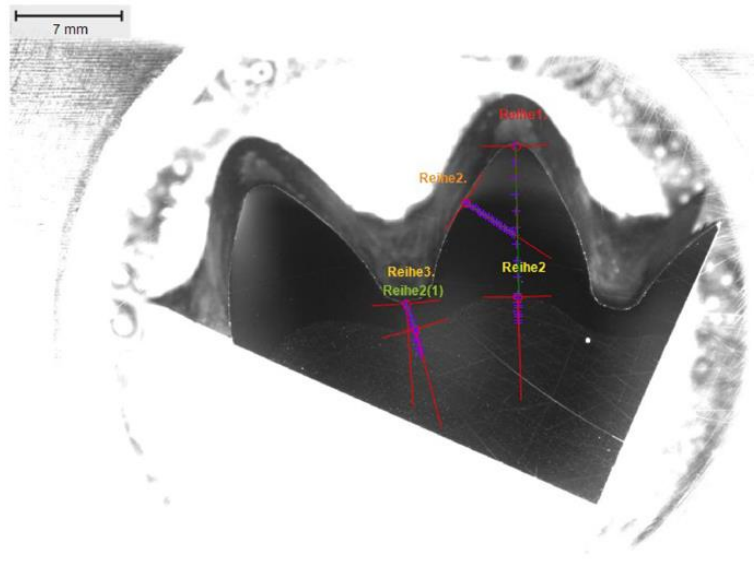


Figura 4.21: Direcciones sobre las que se realizaron mediciones de dureza para cada probeta de los engranajes.

Análisis de los productos semiacabados

Lo primero que se debe destacar es que la soldadura de relleno pudo producir exitosamente una unión de material completamente uniforme y libre de defectos en la combinación de materiales con X45CrSi9-3. No se observan grietas ni cavidades visibles que puedan ocurrir en las uniones soldadas, como se muestra en la Figura 4.22.

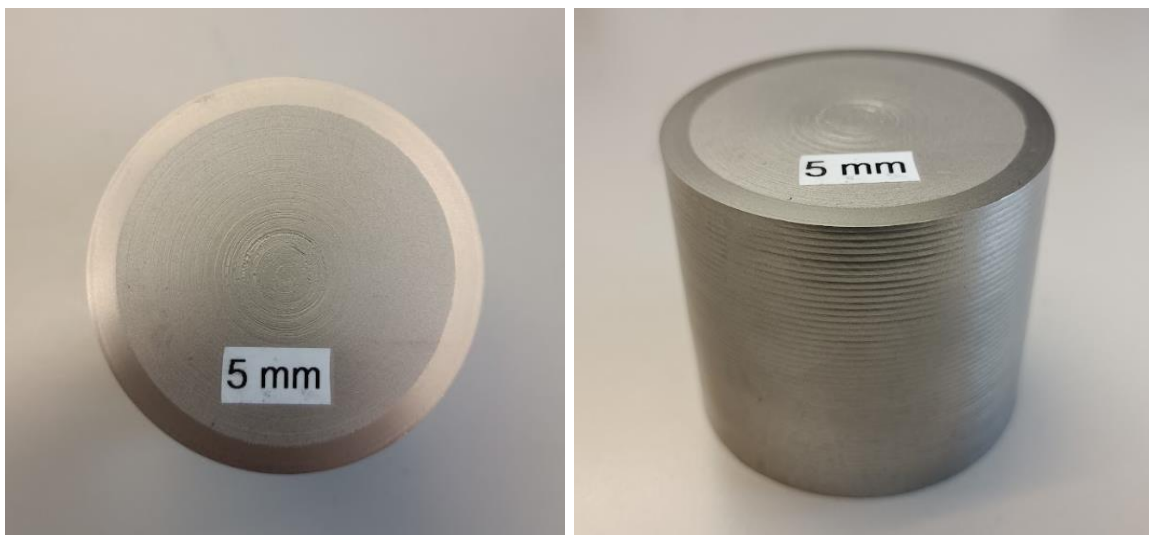


Figura 4.22: Producto semi-acabado de la combinación X45CrSi9-3/C22.8

Por otro lado, no se pudo obtener una unión correcta y adecuada con la combinación de materiales 100Cr6/C22.8. Como se muestra en la Figura 4.23, se pueden observar algunas grietas y cavidades en una inspección visual normal. Por lo tanto, es necesario modificar los parámetros del proceso de soldadura por plasma utilizado para la deposición de este material para futuras pruebas.



Figura 4.23: Fracturas y cavidades observadas en el producto semi-acabado de la combinación 100Cr6/C22.8

Además, al cortar las muestras de las piezas semiacabadas de la combinación de materiales 100Cr6/C22.8, se descubrió que no se observaba una unión completa entre los dos materiales, como se muestra en la Figura 4.24. La capa de recubrimiento se mantenía en su lugar debido a la forma cilíndrica y a la contracción causada por las tensiones térmicas. Debido a este problema al momento de cortar las muestras para el análisis metalográfico de estas piezas semiacabadas, no fue posible realizar la metalografía de las mismas.

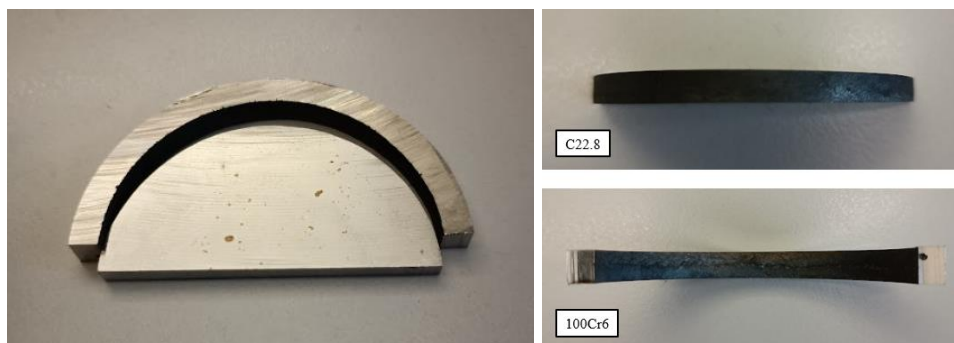


Figura 0.24: Separación de la capa soldada de 100Cr6 del material base al momento de cortar las probetas para el análisis metalográfico.

En la Figura 4.25, se muestran las metalografías de la pieza semiacabada D700 con una capa de recubrimiento de 7,5 mm. En este caso, la muestra fue atacada con ácido nítrico al dos por ciento. Es posible observar en la capa de recubrimiento un crecimiento dendrítico columnar desde el metal base hasta una matriz completa de martensita. Con este reactivo, no es posible ver con buena resolución la estructura completa de la capa de recubrimiento. En la zona afectada por el calor, es posible ver martensita con bajo porcentaje de carbono y perlita debido a las altas velocidades de enfriamiento del proceso de soldadura en esta zona, como se muestra en la Figura 4.26. En la metalografía con una resolución de 200 μm , también es posible observar el refinamiento de grano generado en la zona afectada por el calor debido al proceso de soldadura.

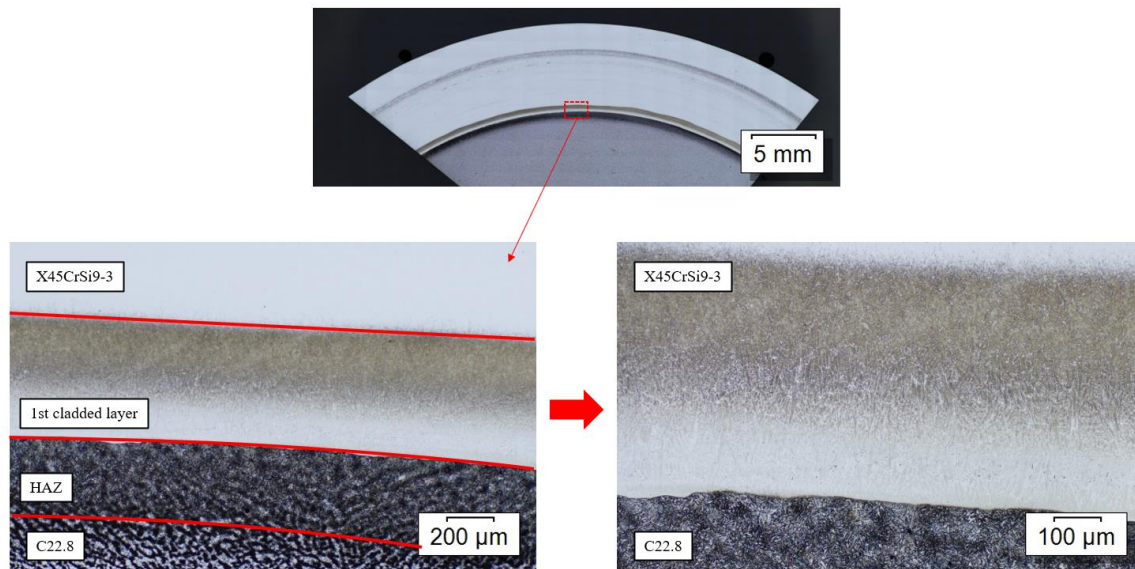


Figura 4.25: Metalografía del producto semi-acabado D700 de la combinación de materiales X45CrSi9-3/C22.8 y 7,5 mm. de capa de soldadura.

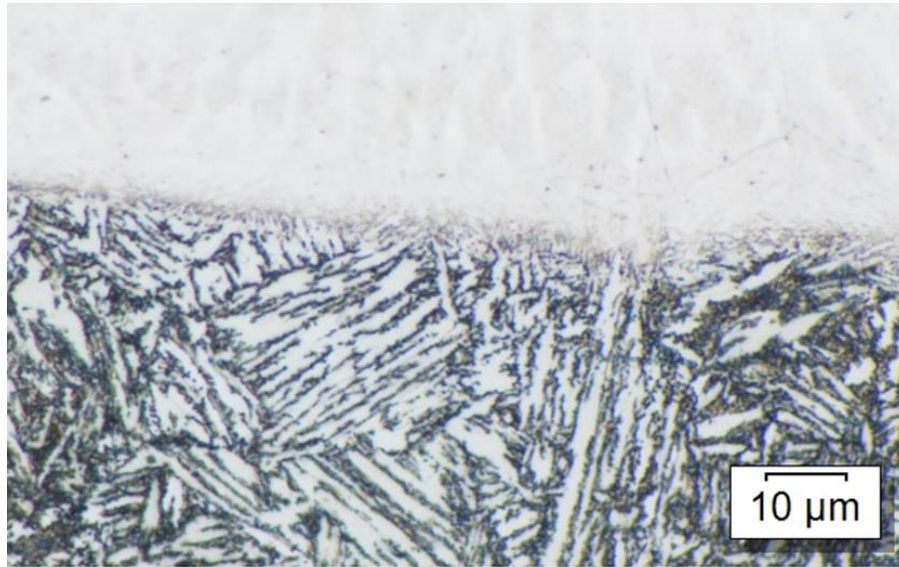


Figura 4.26: Metalografía de la ZAC del producto semi-acabado D700

Al atacar la muestra con el reactivo V2A, es posible observar mejor la estructura de la capa de recubrimiento del material X45CrSi9-3. Como se muestra en la Figura 4.27, es posible ver en la capa de recubrimiento una matriz martensítica con pocos carburos de cromo y un crecimiento dendrítico columnar debido al proceso de soldadura. También se puede observar en el borde externo de la capa soldada una mayor densidad de carburos de cromo.

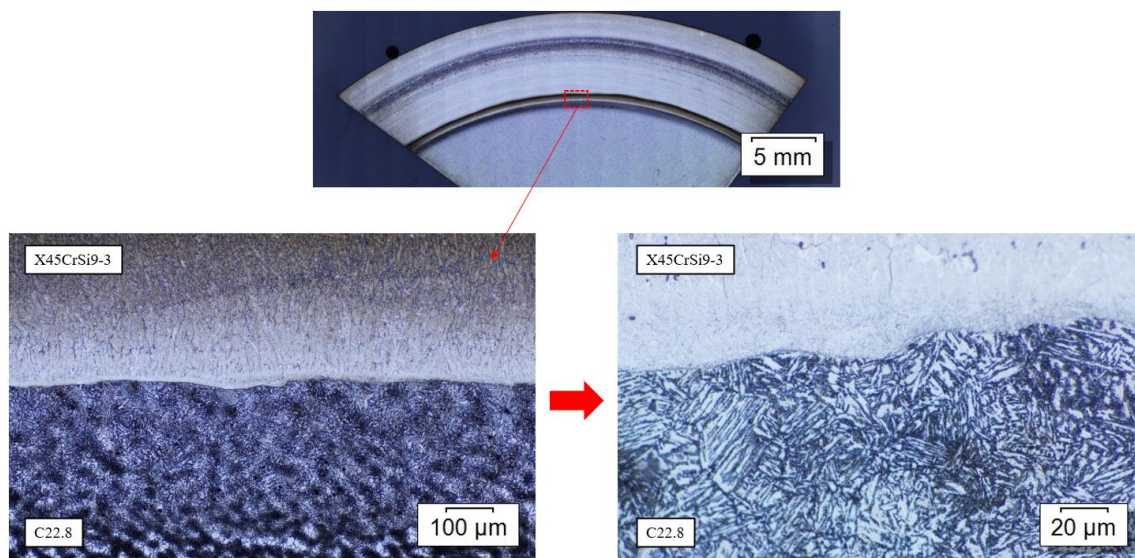


Figura 4.27: Metalografía del producto semi-acabado D700 atacado con reactivo V2A

En la capa de recubrimiento, los valores de dureza se encuentran entre 221-747 HV 0.1. El amplio rango se debe a la distribución no homogénea de los carburos de cromo. En el material del núcleo, los valores de dureza están entre 88,5-220 HV 0.1. Nuevamente, el amplio rango se debe a las diferentes estructuras observadas en la zona afectada por el calor y el refinamiento del grano. Los valores de dureza se muestran en la Figura 4.28. Estos son los valores a lo largo de solo una de las direcciones de medición. Los valores en las otras direcciones no difieren mucho.

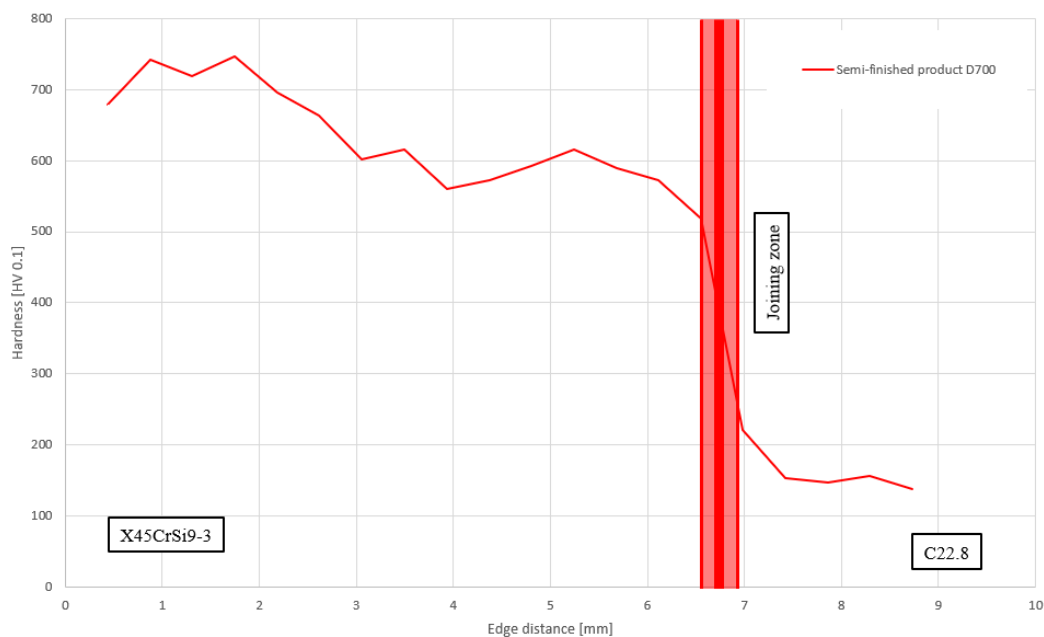


Figura 4.28: Curvas de valores de dureza del producto semi-acabado D700

En la Figura 4.29 y Figura 4.30, se observa una metalografía de la muestra a lo largo del eje del producto semiacabado D700. En este caso, no se observan diferencias importantes en cuanto a la estructura. En la zona afectada por el calor, es posible ver martensita de bajo contenido de carbono junto con perlita debido a las altas velocidades de enfriamiento del proceso de soldadura. En la capa de recubrimiento, es posible ver un crecimiento dendrítico columnar de martensita con bajos carburos de cromo cerca de la zona de unión. En el borde exterior de las diferentes capas de soldadura, es posible observar una mayor cantidad de carburos de cromo. Lo que resulta interesante de ver aquí es la forma ondulada generada por el proceso de soldadura de la capa de recubrimiento.

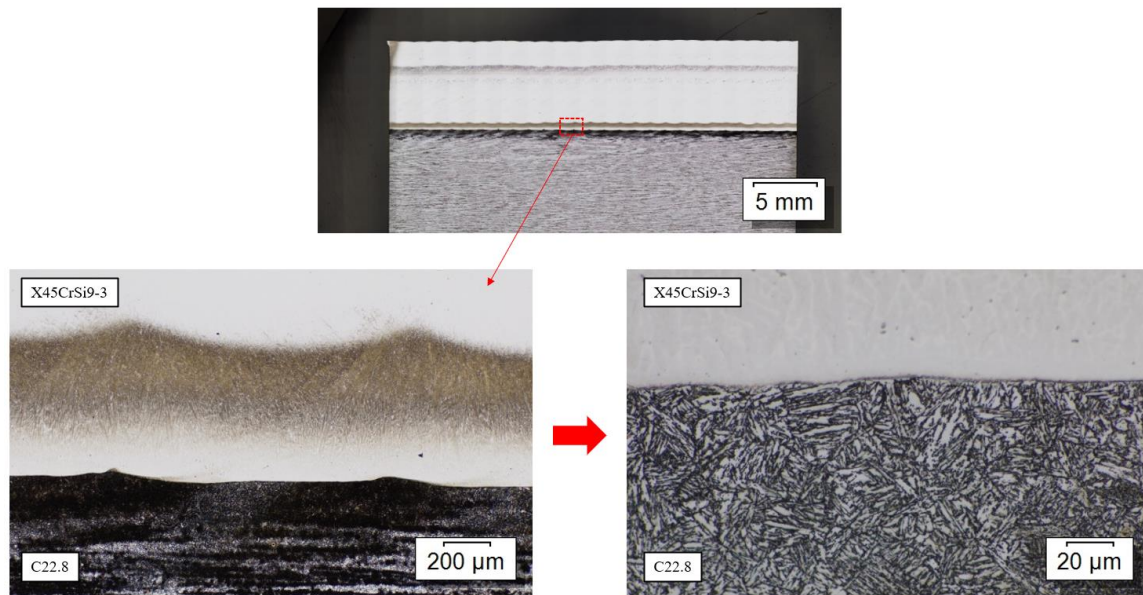


Figura 4.29: Metalografía del producto semi-acabado D700 a lo largo de su eje

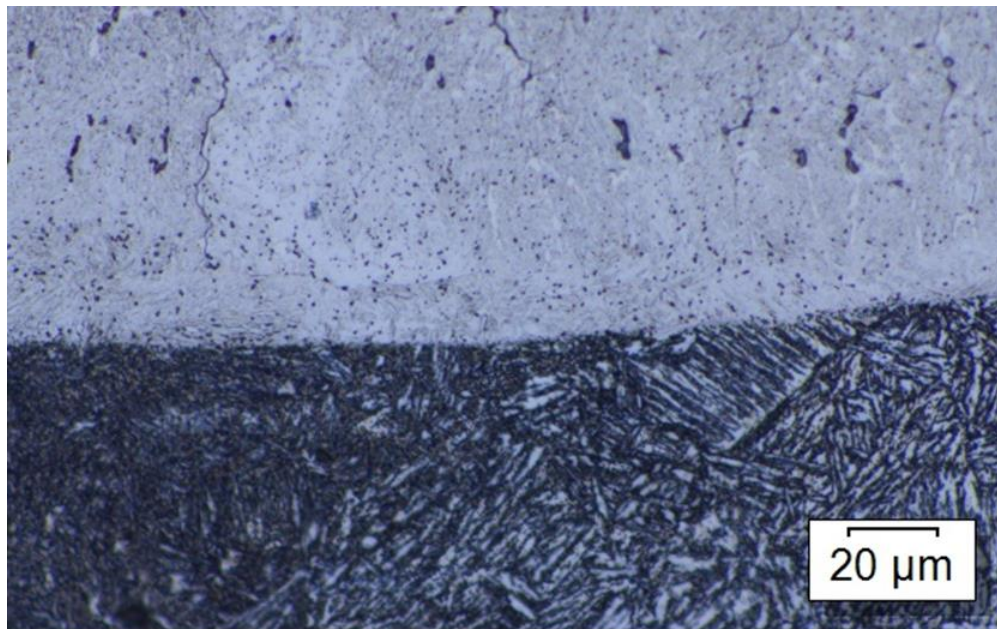


Figura 4.30: Metalografía del producto semi-acabado D700 a lo largo de su eje atacado con reactivo V2A para ver los carburos de cromo.

Los valores de dureza para esta muestra se encuentran entre 328-711 HV 0.1 para la capa de recubrimiento y entre 135-232 HV 0.1, mostrando no grandes diferencias entre los valores de las mediciones perpendiculares al eje de la muestra. La curva de los valores de dureza se muestra en la Figura 4.31.

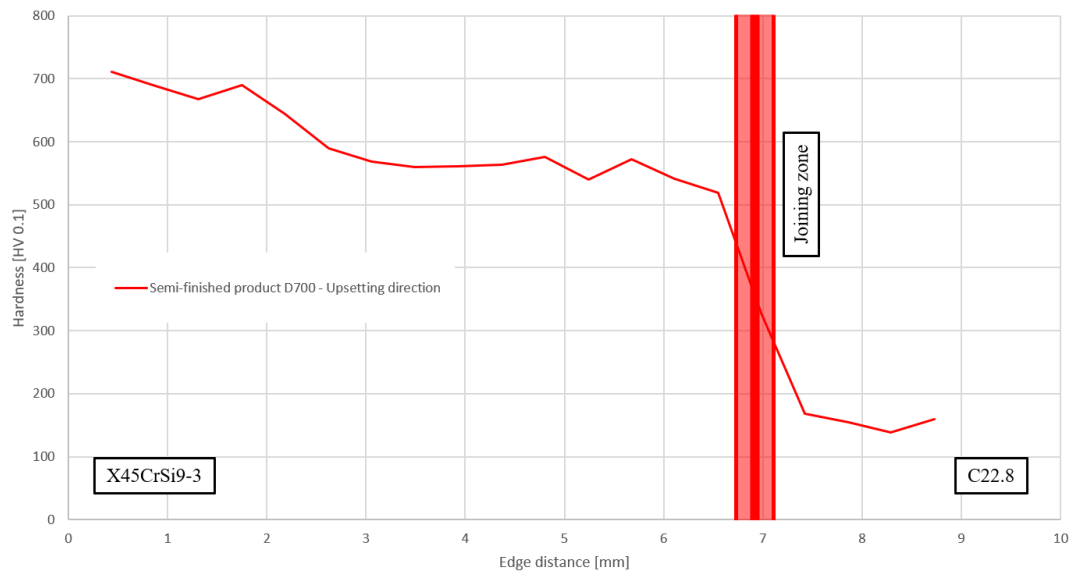


Figura 4.31: Curva de valores de dureza del producto semi-acabado D700 a lo largo de la dirección perpendicular a su eje.

No se observan diferencias en la microestructura entre la muestra con una capa de 7,5 mm de recubrimiento y la muestra con una capa de 5 mm de recubrimiento, tanto en la zona de unión como en la interfase entre las diferentes capas soldadas. Es por eso que en la Figura 4.32, solo se muestra la metalografía entre las capas soldadas del producto semiacabado D710. Es posible observar nuevamente el crecimiento dendrítico columnar con pequeños carburos de cromo. También es interesante observar en el borde exterior de la capa soldada, que los carburos se disolvieron por completo y el cromo pasó a solución sólida. Es por eso que no es posible observarlos cuando se ataca la pieza con ácido nítrico al dos por ciento, pero sí es posible observarlos cuando se ataca con el agente V2A. Además, algunos carburos de cromo son visibles en el límite de los granos.

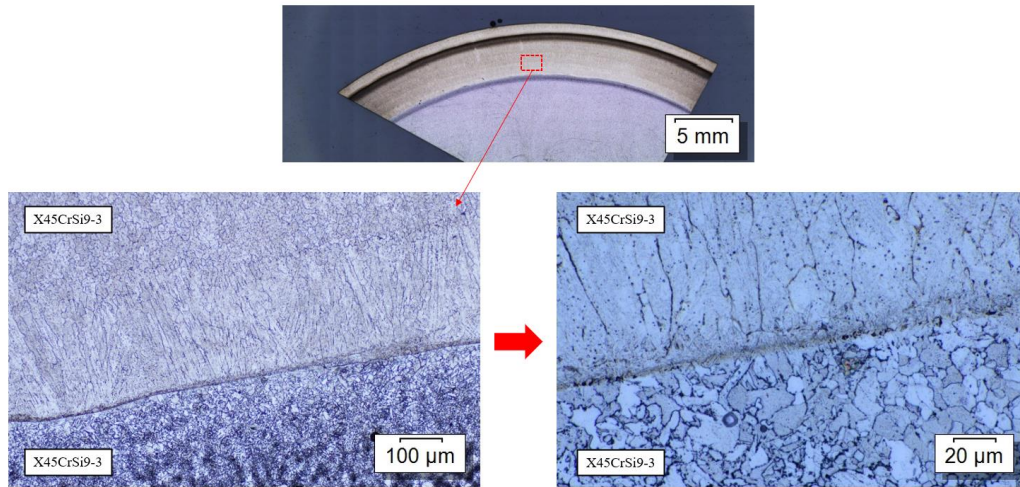


Figura 4.32: Metalografía del producto semi-acabado D710 atacado con reactivo V2A entre dos capas soldadas.

Los valores de dureza para la muestra D710 son entre 567-684 HV 0.1 para la capa recubierta y entre 134-199 HV 0.1 para el material del núcleo.

Análisis de los engranajes rectos tratados térmicamente

En cada caso, la muestra fue atacada con ácido nítrico al dos por ciento.

En la Figura 4.33 se muestran las metalografías de la pieza D694 de la combinación de materiales X45CrSi9-3/C22.8. En este caso, el ancho de la capa recubierta es de 7,5 mm. Es posible observar en la zona de transición un cambio abrupto de material y una zona de unión no uniforme. Sin embargo, se puede ver y confirmar una correcta unión entre los dos materiales, creando una pieza única. En el núcleo, es posible observar una fase ferrítica/perlítica típica de un acero C22.8 con valores de dureza entre 232-322 HV 0.1. Es posible notar un porcentaje muy bajo de ferrita Widmanstätten debido a las altas tasas de enfriamiento del templeado en agua. También se puede observar un pequeño porcentaje de martensita cerca de la zona de unión donde las tasas de enfriamiento son aún mayores.

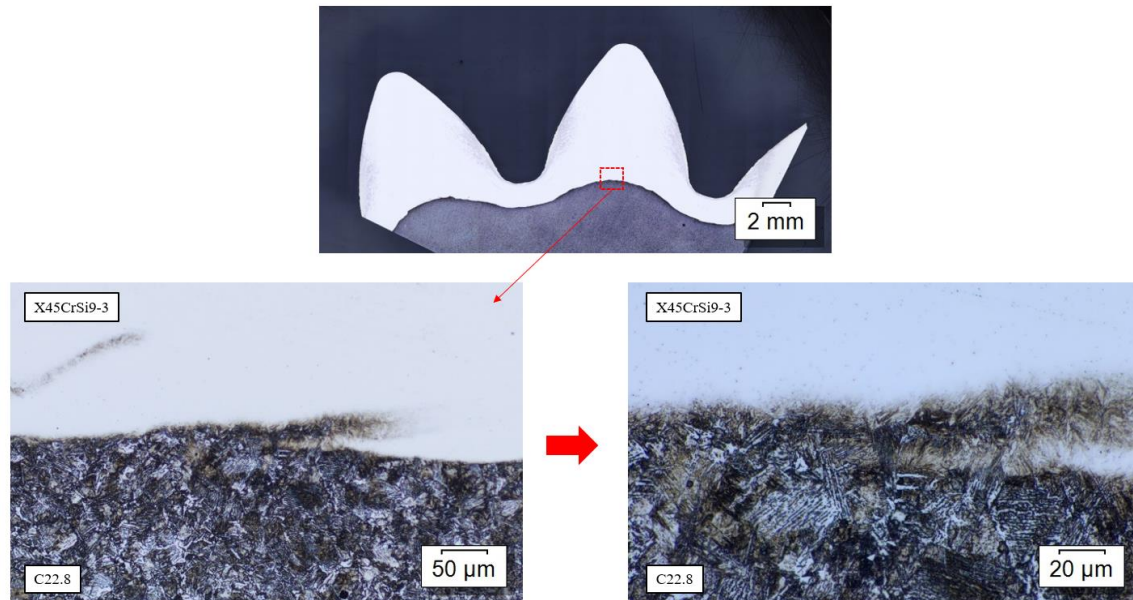


Figura 4.33: Metalografía de la base del diente del engranaje D694 de la combinación de materiales X45CrSi9-3/C22.8

En los flancos de los dientes, es posible ver una base martensítica y carburos de cromo en los límites del grano, típicos de un acero aleado como el X45CrSi9-3, como se muestra en la Figura 4.34. Esto también se nota en los valores de dureza obtenidos en esta área, que se encuentran entre 705-870 HV 0.1.

En la Figura 4.34 es interesante observar la orientación de las fibras obtenida mediante el proceso de forja, lo cual aumenta la resistencia y la capacidad de resistir fuerzas de fatiga e impacto en la pieza, lo cual es realmente deseable en una pieza en funcionamiento como una rueda dentada.

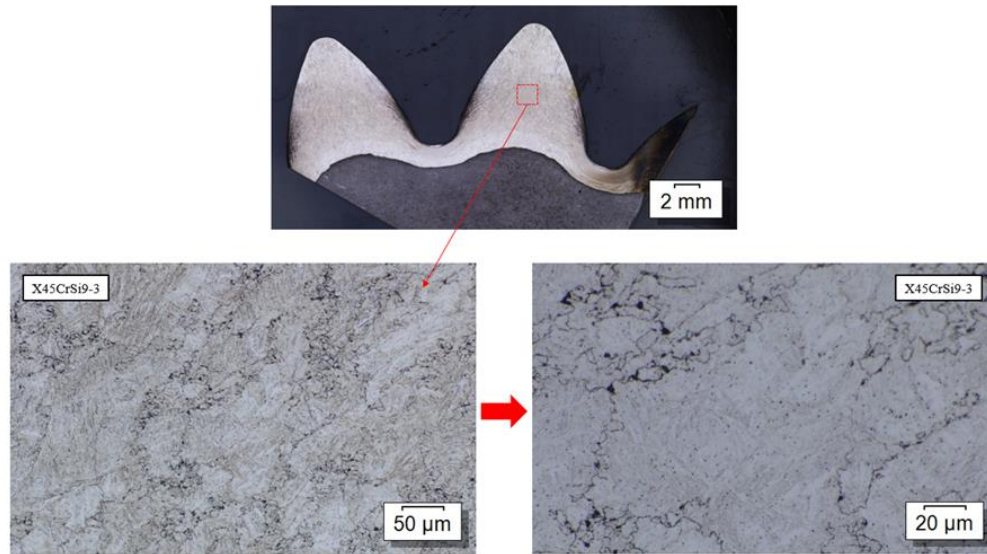


Figura 4.34: Metalografía del núcleo del flanco del diente del engranaje recto D694 de la combinación X45CrSi9-3/C22.8

No se observan diferencias significativas entre la microestructura en la punta del diente y en la raíz del diente con este ancho de capa recubierta.

Los valores de dureza obtenidos a través de las diferentes direcciones de la pieza, como se muestra en la Figura 4.21, se presentan en el siguiente diagrama, ver Figura 4.35. La dureza base medida para X45CrSi9-3 es de 705 HV 0.1 y para C22.8 es de 232 HV 0.1.

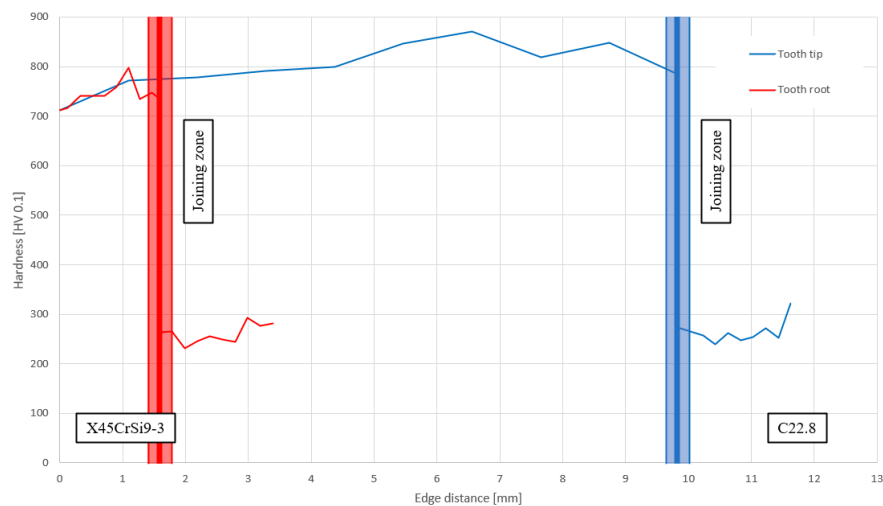


Figura 4.35: Curva de valores de dureza del engranaje recto tratado térmicamente D694 a lo largo del diente y de la raíz del diente.

Para hacer una comparación entre la capa recubierta de 7,5 mm. y la capa recubierta de 5 mm., se realizó un análisis metalográfico en la pieza D704 de la misma combinación de materiales que se analizó anteriormente.

Al analizar la raíz del diente, nuevamente es posible ver una transición de material abrupta en la zona de unión, como se muestra en la Figura 4.36. Se puede observar una matriz ferrítica/perlítica con un porcentaje de ferrita Widmanstätten en el límite del grano. Al igual que en el otro caso, esto se debe a las altas velocidades de enfriamiento del temple en agua. Además, es posible observar un pequeño porcentaje de martensita en la zona de unión entre ambos materiales. Por lo tanto, no se identificaron diferencias importantes entre la microestructura de la raíz del diente con una capa recubierta de 5 mm. y una capa recubierta de 7,5 mm. Esto se debe a que las velocidades de enfriamiento son similares en ambos casos en esta zona debido a la evaporación del agua en el valle de la raíz.

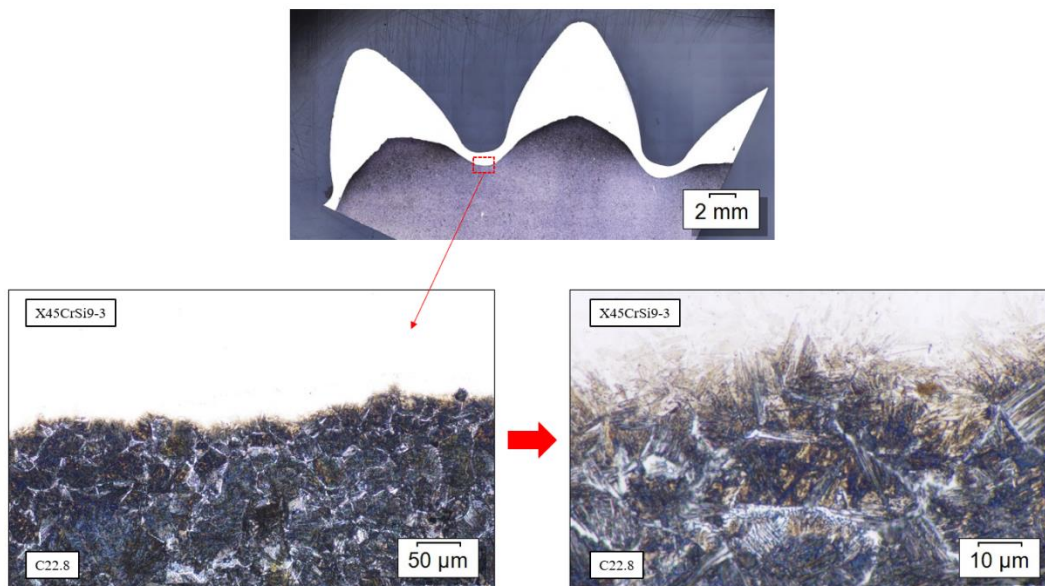


Figura 4.36: Metalografía de la raíz del diente del engranaje D704 de la combinación X45CrSi9-3/C22.8

Al analizar el diente, es posible observar algunas diferencias y resultados interesantes. Como se muestra en la Figura 4.37, debido a velocidades de enfriamiento aún más altas debido a una distancia más corta al borde que en la pieza D694, es posible ver una base martensítica con ferrita Widmanstätten en los límites de los granos en el material del núcleo. Además, también se pueden observar algunas colonias de perlita en el borde de

esta ferrita Widmanstätten. Esto también se refleja en los valores de dureza obtenidos en esta zona, que se encuentran entre 327-391 HV 0.1, generando un aumento del 21-40% en relación con la pieza D694 con una capa recubierta de 7,5 mm. En términos de transición de material, este es un enfoque mejor que en el otro caso, ya que se puede generar una matriz más homogénea entre ambos materiales, como se muestra en la Figura 4.38.

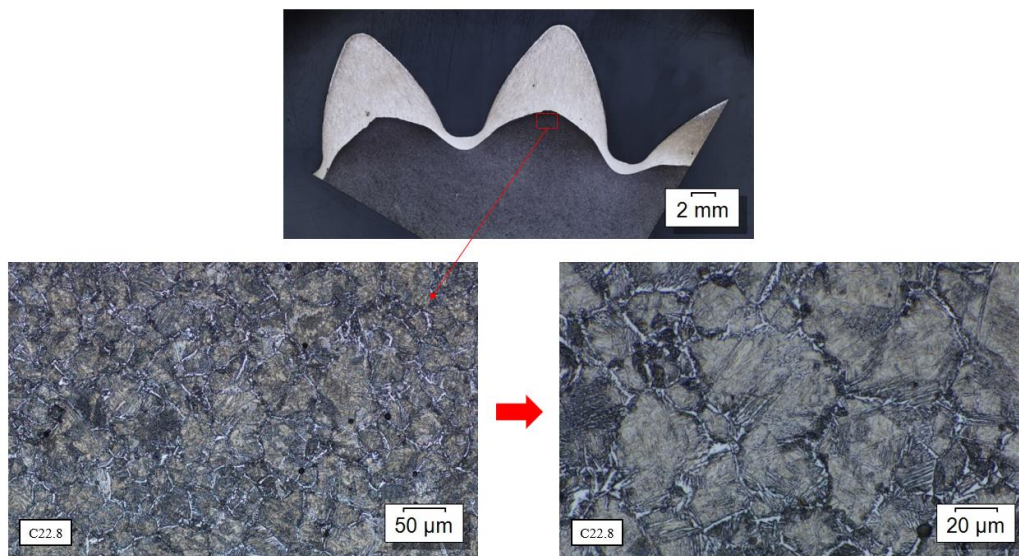


Figura 4.37: Metalografía de la base del diente del engranaje D704 de la combinación de materiales X45CrSi9-3/C22.8

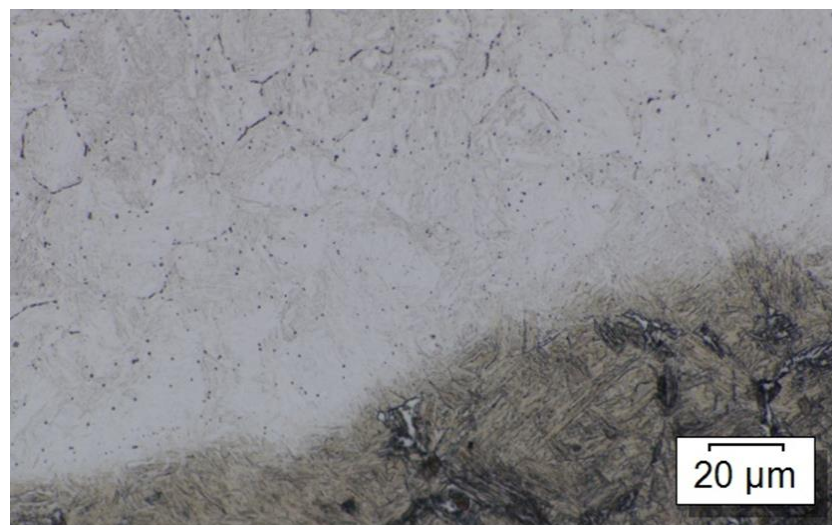


Figura 4.38: Transición entre los materiales en la base del diente del engranaje D704.

La microestructura en los flancos de los dientes permanece igual. Es posible observar una base martensítica con carburos de cromo en el borde de los granos, como se muestra en la Figura 4.39.

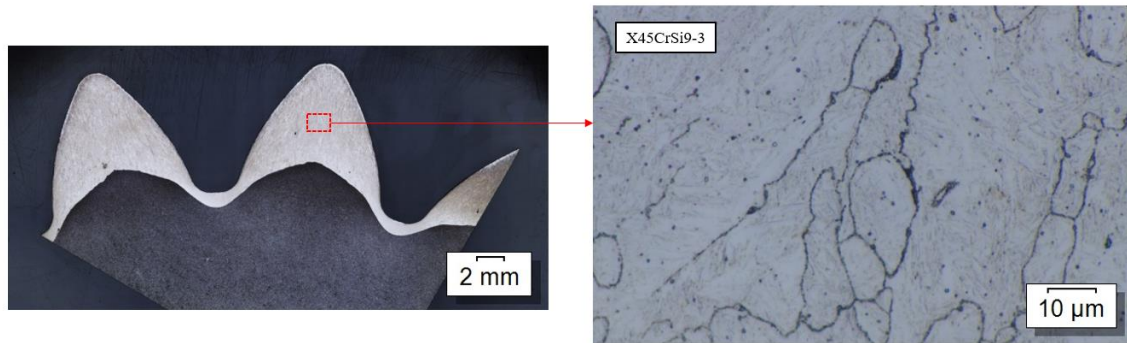


Figura 4.39: Metalografía del núcleo del diente del engranaje D704 de la combinación de materiales X45CrSi9-3/C22.8

Los valores de dureza obtenidos a través de las diferentes direcciones de la pieza, como se muestra en la Figura 4.21, se presentan en el siguiente diagrama, ver Figura 4.40. La medición de dureza base para X45CrSi9-3 es de 597 HV 0.1 y para C22.8 es de 241 HV 0.1.

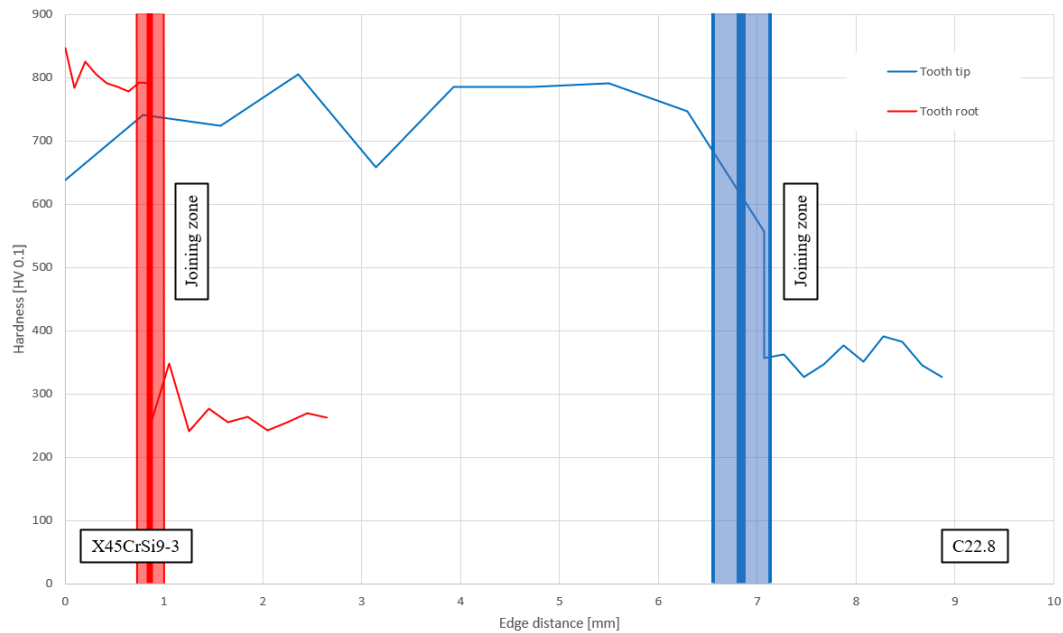


Figura 4.40: Curva de valores de dureza del engranaje tratado térmicamente D704 a lo largo del diente y de la raíz del diente.

Ahora se analizará la pieza DO732 de la combinación de materiales 100Cr6/C22.8. Como se puede observar en la Figura 4.41, las grandes grietas y poros que se vieron en las piezas semiacabadas no pudieron cerrarse mediante la forja. Además, es posible que estas grietas hayan aumentado debido al templado en agua. Sin embargo, se puede establecer que, aunque no fue posible cerrar todos los poros y grietas del proceso de soldadura, sí fue posible crear una unión y una unión entre ambos materiales. Esto no fue posible antes mediante el proceso de soldadura, como se mostró anteriormente en la Figura 4.24.

En cuanto a la microestructura, en la raíz del diente se puede ver una matriz ferrítica/perlítica completa con un gran refinamiento del grano en la zona de unión en el lado del núcleo con valores de dureza entre 219-312 HV 0.1. El grano más fino en la zona de unión se debe a este proceso de unión que se creó durante el proceso de forja debido a una fuerte recrystalización del grano. También es posible ver algunas inclusiones de sulfuro en el lado del núcleo a lo largo de esta zona de unión, como se muestra en la Figura 4.41.

En el lado de la capa de recubrimiento, es posible ver una matriz completamente martensítica con valores de dureza entre 785-878 HV 0.1, mostrando un ligero aumento en los valores de dureza en comparación con la capa de X45CrSi9-3.

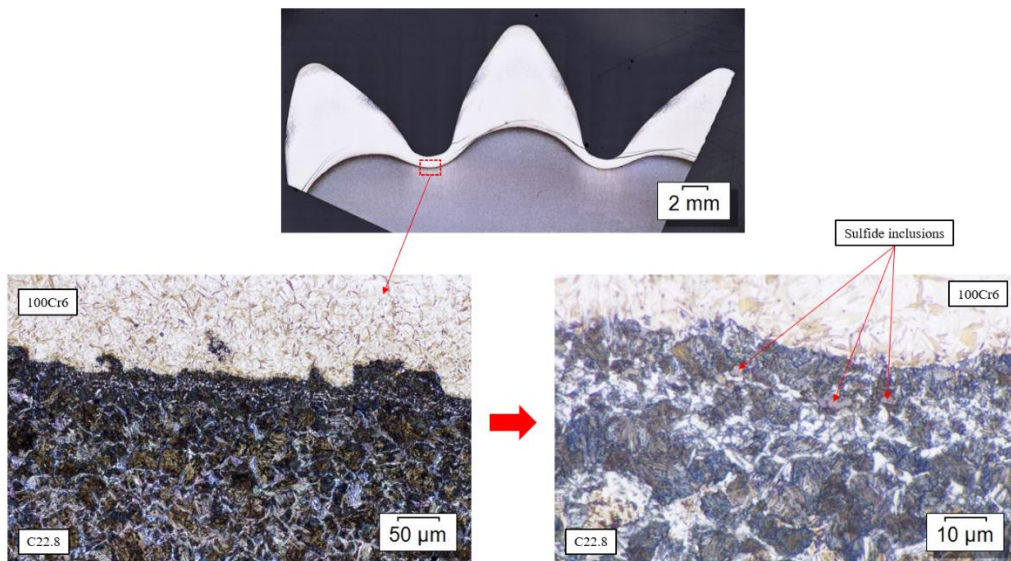


Figura 4.41: Metalografía de la raíz del diente del engranaje DO732 de la combinación 100Cr6/C22.8

Al analizar la zona de unión en el diente, como se muestra en la Figura 4.42, es posible ver granos martensíticos con perlita y ferrita en los límites del grano debido a las mayores tasas de enfriamiento con valores de dureza entre 183-370 HV 0.1. Además, en esta zona se puede observar el menor tamaño del grano en la zona de unión nuevamente debido al proceso de unión en el paso de forja. Se observa una transición abrupta completa de material, lo cual no es realmente deseable para este tipo de pieza.

En el lado de la capa recubierta, se puede notar lo mismo que en la raíz del diente. Los valores de dureza en esta zona están entre 735-902 HV 0.1.

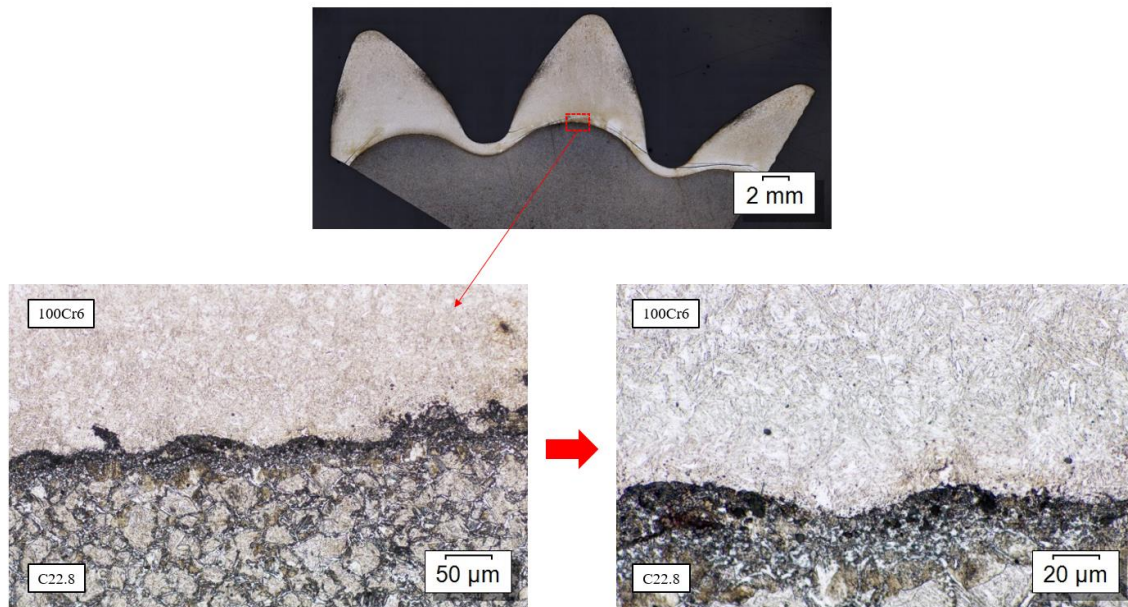


Figura 4.42: Metalografía de la base del diente del engranaje DO732 de la combinación 100Cr6/C22.8

En los flancos del diente, es posible ver una matriz martensítica con carburos de cromo en los límites del grano y también pequeños carburos de cromo esferoidizados, como se muestra en la Figura 4.43. Los valores de dureza en esta zona están entre 772-910 HV 0.1, lo que muestra un aumento entre 4,5% y 9% en relación con el acero X45CrSi9-3.

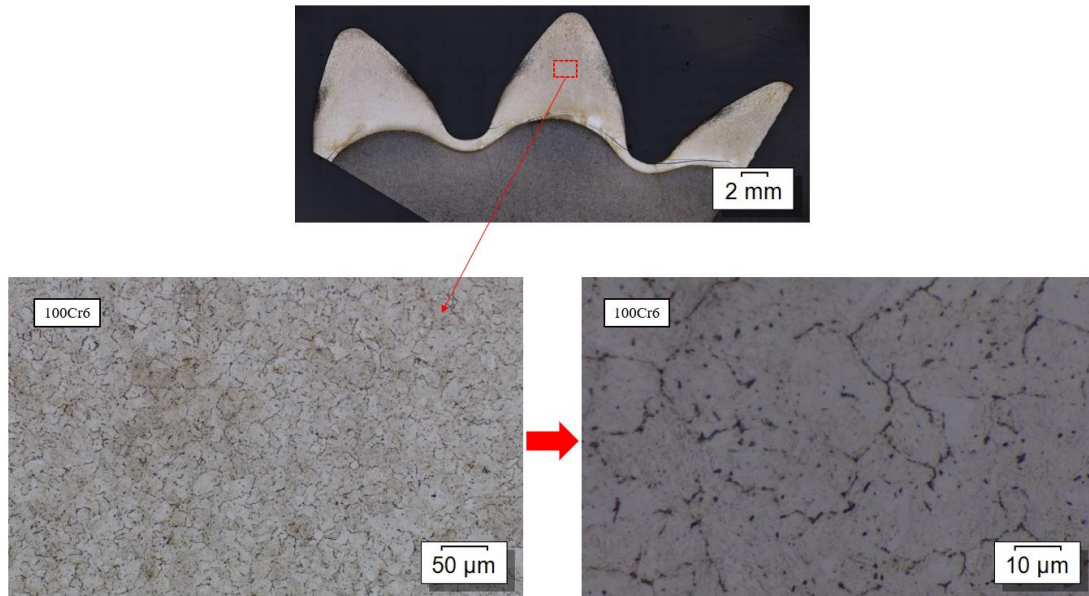


Figura 4.43: Metalografía del núcleo del diente del engranaje DO732 de la combinación de materiales 100Cr6/C22.8

Los valores de dureza obtenidos a través de las diferentes direcciones de la pieza, como se muestra en la Figura 4.21, se muestran en el siguiente diagrama, ver Figura 4.44. La medición de dureza base para 100Cr6 es 735 HV 0.1 y para C22.8 es 183 HV 0.1.

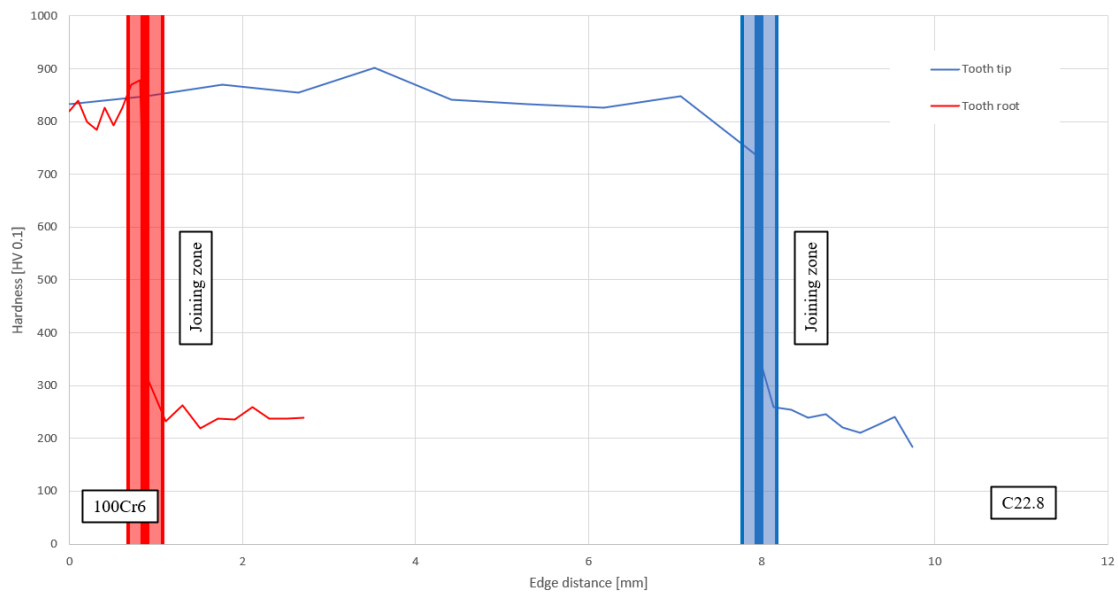


Figura 4.44: Curva de valores de dureza del engranaje DO732 tratado térmicamente a lo largo del diente y de la raíz del diente.

5. Resumen y conclusiones

En este trabajo, se examinó la calidad de unión de un engranaje híbrido con diferentes combinaciones de materiales, como X45CrSi9-3 con C22.8 en el núcleo y 100Cr6 con C22.8 en el núcleo. La resistencia global de unión de este tipo de componentes depende fundamentalmente de las propiedades locales en la zona de unión entre ambos materiales.

La investigación del engranaje incluyó el análisis de muestras de los productos semiacabados y también de los engranajes terminados tratados térmicamente, con el fin de analizar las diferencias en la microestructura lograda mediante la forja. Además, se analizaron muestras con 7,5 mm de capa de soldadura y muestras con 5 mm de capa de soldadura para observar las diferencias entre ambas anchuras de capa.

El análisis microestructural de los productos semiacabados de la combinación de materiales X45CrSi9-3/C22.8 mostró que, independientemente de la anchura de la capa de recubrimiento, se pudo producir un compuesto material unido sin defectos mediante la soldadura de alambre láser. Por otro lado, en los productos semiacabados de la combinación de materiales 100Cr6/C22.8, no fue posible lograr un compuesto material unido sin defectos mediante el recubrimiento en polvo. Fue posible observar poros, cavidades y grietas con una simple inspección visual y, además, al cortar las muestras para el análisis metalográfico, se observó una unión incompleta que impidió el análisis metalográfico de estas muestras.

Además, se logró una distribución del material de recargue en la punta y en la raíz del diente que cumple con los requisitos en cuanto a las diferentes cargas mecánicas mediante la forja. Mediante el conformado, fue posible eliminar los efectos negativos del proceso de soldadura, como el crecimiento dendrítico columnar, el tamaño no homogéneo del grano en la zona afectada por el calor, la distribución no homogénea de los carburos de cromo, poros, cavidades, etc., y homogeneizar la zona de unión mediante la recristalización estructural dinámica. Esto también quedó claro durante la consideración y análisis detallados de los componentes estructurales y los perfiles de dureza. Además, específicamente con la combinación de materiales 100Cr6/C22.8, donde los productos

semiacabados no se soldaron completamente, fue posible crear una unión entre ambos materiales. Por otro lado, en esta zona se observó un tamaño de grano no homogéneo e inclusiones de sulfuro, que no son óptimas.

En el caso de los productos semiacabados de la combinación de materiales X45CrSi9-3/C22.8, es posible observar una transición de material abrupta en la zona de unión, con una solidificación de martensita de bajo porcentaje de carbono con perlita más profunda en el núcleo. Una transición de material abrupta con un crecimiento dendrítico columnar de granos de martensita con baja densidad de carburos de cromo es observable, con una mayor densidad de carburos de cromo en el borde de la capa soldada respectiva. La microestructura se refinó y homogeneizó significativamente mediante la forja. En la capa soldada, se logró una distribución homogénea de los carburos de cromo en la matriz martensítica, lo que no era posible ver antes del proceso de soldadura. Además, en la zona de unión, se eliminó completamente la zona afectada por el calor y se observó una matriz martensítica más homogénea con poca cantidad de ferrita Widmanstätten en el límite de los granos. Sin embargo, esta ferrita de Widmanstätten no es deseable en este tipo de piezas, por lo que un tratamiento térmico más controlado podría ser beneficioso. Además, en los engranajes con una capa de soldadura de 5 mm, se logró una mejor transición entre ambos materiales, mejorando también las propiedades mecánicas de la pieza al tener una mejor interfase entre ambos materiales.

En cuanto a la dureza, se determinó que esta aumentó de 632 HV 0,1 (valor medio de los productos semiacabados) a 766 HV 0,1 (valor medio de los engranajes, independientemente de la anchura de la capa de soldadura) en la capa de recargue, mostrando un aumento de aproximadamente el 21%. Con esto, es posible obtener una pieza que tiene una resistencia al desgaste realmente buena, lo que es crítico para un engranaje en la zona del diente. Además, como se muestra en las curvas de valores de dureza, se logró una mejor y más uniforme distribución de los valores de dureza mediante la forja en comparación con los productos semiacabados. En el núcleo, los valores de dureza aumentaron de 177 HV 0,1 (valor medio de los productos semiacabados) a 287 HV 0,1 (valor medio del núcleo de los engranajes), mostrando un aumento de aproximadamente el 62%. Esto se debe al refinamiento del grano y la matriz martensítica

lograda mediante el enfriamiento en agua, lo que proporciona mejores propiedades mecánicas generales a la pieza.

En el caso de los productos semiacabados de la combinación de materiales 100Cr6/C22.8, no fue posible observar las mejoras o diferencias entre las piezas en bruto y las piezas forjadas debido a la unión incorrecta entre ambos materiales. Sin embargo, fue posible observar que se pudo crear una unión completa mediante la forja. Esto es una ventaja de este proceso, pero también fue posible observar que la unión no era buena y homogénea. Cerca de la zona de unión, se observó un refinamiento del grano en el material del núcleo debido a este proceso de unión mediante la forja. Este proceso de soldadura tiene lugar y la recrystalización de los granos mediante la temperatura y la deformación mecánica no tiene lugar, por lo que se observa un refinamiento del grano y una microestructura no homogénea en esta zona. Además, debido a esta soldadura incorrecta de los productos semiacabados que no se soldaron completamente, se crearon capas de óxido entre ambos materiales que producen inclusiones de sulfuro en la zona de unión después del conformado. Esto no es deseable porque estas inclusiones de sulfuro debilitan la pieza, ya que son frágiles y concentran tensiones cerca de ellas.

En cuanto a la microestructura, se observó en los flancos de los dientes una matriz de martensita templada con carburos de cromo en los límites del grano y también algunos carburos de cromo esferoidizados, lo que proporciona a la pieza mayores valores de dureza y resistencia al desgaste. En el núcleo del diente, se observó una matriz martensítica con perlita en los límites del grano, mientras que en la raíz del diente, se observó una matriz de ferrita/perlita con poca martensita. En cuanto a la dureza, no es posible hacer una comparación entre los productos semiacabados y los engranajes forjados. Sin embargo, al comienzo del proyecto, se realizaron algunas mediciones a mano con un probador de dureza portátil, como se muestra en la Figura 5.1.



Figura 5.1: Mediciones de dureza al inicio del proyecto

Con estas mediciones, es posible establecer que la dureza ha aumentado de 449 HV (valor medio de los productos semiacabados) a 833 HV (valor medio de las ruedas dentadas forjadas), mostrando un aumento de aproximadamente el 86%. Con estos valores de dureza, se logra una resistencia al desgaste realmente buena en los flancos de los dientes, lo cual es perfecto para esta pieza. En el núcleo, los valores de dureza aumentaron de 141 HV (valor medio de los productos semiacabados) a 250 HV (valor medio de las ruedas dentadas forjadas), mostrando un aumento de aproximadamente el 77%.

En resumen, se puede afirmar que la forja mejoró significativamente la microestructura en la zona de unión y también en la capa recubierta debido al proceso de recristalización. Además, en cada combinación de materiales fue posible obtener un gran aumento en las mediciones de dureza mediante el endurecimiento en agua, produciendo principalmente martensita con perlita en el núcleo y martensita con carburos de cromo en la capa recubierta. Con esto, se logra la utilización eficiente del material deseada, generando una pieza con alta resistencia al desgaste y propiedades mecánicas en la zona del diente, y con propiedades mecánicas menores en el núcleo donde no son necesarias.

Además, fue posible observar en la combinación de materiales X45CrSi9-3/C22.8, que con una capa recubierta de 5 mm se logró una mejor transición de material en comparación con la capa recubierta de 7,5 mm. De hecho, en el instituto se están investigando desarrollos con capas recubiertas más delgadas.

También es posible afirmar que las capas recubiertas con 100Cr6 mostraron valores de dureza más altos y una mejor microestructura que las capas recubiertas con X45CrSi9-3, lo que conduce a una mejor resistencia al desgaste y, por lo tanto, mejores propiedades para ser utilizadas como capa recubierta. Con este material, se superó el objetivo de 63 HRc que se estableció al comienzo del proyecto (833 HV es aproximadamente 64 HRc). Debido a esto, es necesario mejorar el proceso de soldadura mediante recubrimiento de polvo de plasma para obtener productos semiacabados de mejor calidad sin poros ni cavidades y con una unión soldada uniforme entre ambos materiales, similar a la lograda mediante la soldadura por arco láser entre X45CrSi9-3 y C22.8.

A pesar de que en el desarrollo de este proyecto el enfoque se centró en obtener una buena geometría de la rueda dentada y una buena distribución de material con las propiedades deseadas, también se podría desarrollar un tratamiento térmico más controlado para tener un mejor control sobre la microestructura de la pieza y evitar grietas. Sin embargo, el análisis metalográfico mostró la microestructura y los valores de dureza deseados con el enfoque utilizado.

Finalmente, también se pueden investigar otros métodos para determinar la resistencia y calidad de la unión. Es posible obtener algunas muestras de la zona de unión para realizar pruebas de tracción y observar la resistencia de esta zona de la pieza. Además, sería excelente realizar pruebas de fatiga y desgaste para ver si la pieza logra una durabilidad similar a la de una pieza creada con un solo material pero que es mucho más costosa.

Bibliografía

[1] BEHRENS, B.-A.; BOUGUECHA, A.; BONK, C.; BOHNAGE, M.; CHUGREEVA, A.; MATTHIAS, T.: FE-Based Design of a Forging Tool System for a Hybrid Bevel Gear. En: Key Engineering Materials Vol. 742, Trans Tech Publications, 2017.

[2] BEHRENS, B.-A.; BOUGUECHA, A.; FRISCHKORN, C.; HUSKIC, A.; CHUGREEVA, A.: Process Routes for Die Forging of Hybrid Bevel Gears and Bearing Bushings. En: AIP Conference Proceedings 1896, 190014, 2017.

[3] BEHRENS, B.-A.; CHUGREEVA, A.; DIEFENBACH, J.; KAHRA, C.; HERBST, S.; NÜRNBERGER, F.; MAIER, H. J.: Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Hybrid Bevel Gears Manufactured by Tailored Forming. Metals (10) 10, 2020, 1365

[4] BEHRENS, B.-A.; CHUGREEVA, A.; MILDEBRATH, M.; DIEFENBACH, J.; BARROI, A.; LAMMERS, M.; HERMSDORF, J.; HASSEL, T.; OVERMEYER, L.: Manufacturing of High-Performance Bi-Metal Bevel Gears by Combined Deposition Welding and Forging. Metals 8, 2018, 898

[5] BEHRENS, B.-A.; INCE, C.-V.; CHUGREEVA, A.; BÖHM, C.; ALDAKHEEL, F.; UHE, J.; WRIGGERS, P.; RAATZ, A.: A design concept of active cooling for tailored forming workpieces during induction heating. Prod. Eng. Res. Devel., 15, 2021, S. 177-186

[6] BEHRENS, B.-A.; UHE, J.: Introduction to Tailored Forming, Production Engineering Research Development

[7] BEHRENS, B.-A.; UHE, J.; ROSS, I.; PEDDINGHAUS, J.; URSINUS, J.; MATTHIAS, T.; BÄHRISCH, S.: Tailored Forming of hybrid bulk metal components. Int. J. Mater. Form., (42) 15, 2022

[8] BOIADJIEV, I.; WITZIG, J.; TOBIE, T.; STAHL, K.: Tooth Flank Fracture - Basic Principles and Calculation Model for a Sub-Surface-Initiated Fatigue Failure Mode of Case-Hardened Gears. GEARTECHNOLOGY, 2015.

[9] DAVIS, J.R.: Metals Handbook: desk edition, Second Edition. ASM International, 1998.

- [10] DOEGE, E.; BEHRENS, B.-A.: Handbuch Umformtechnik. Springer, 2017.
- [11] DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE: WERKSTOFFDATENBLATT, 100Cr6. Datenblatt, 2015.
- [12] DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE: WERKSTOFFDATENBLATT, X45CrSi9-3. Datenblatt, 2016.
- [13] ERRICHELLO, R.: Friction, Lubrication, and Wear of Gears. GEARTECH, 1992.
- [14] HERBERTZ, R.; HERMANN, H.; LABS, R.: Massivumformung kurz und bündig. Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen Dorothea Bachmann Osenberg, 2013.
- [15] KLOCKE, F.: Manufacturing Processes 4, Forming. Springer, 2012.
- [16] MACKENZIE, D. S.: The Heat Treatment and Quenching of Gears. Houghton International, Inc., Valley Forge PA, 2005.
- [17] MOTT, R. L.: Diseño de Elementos de Máquinas, Cuarta Edición. Pearson Education, 2016.
- [18] OOI, J.B.; WANG, X.; TAN, C.S.; HO, J.-H.; LIM, Y. P.: Modal and stress analysis of gear train design in portal axle using finite element modeling and simulation. En: Journal of Mechanical Science and Technology 26 (2) (2012) 575-589, 2012.
- [19] SUN, W.; LANCASTER, A.; GIUSCA, C.: Surface Texture Measurements of Gear Surfaces Using Stylus Instruments. National Physical Laboratory, 2017.
- [20] TOBIE, T.; HIPPENSTIEL, F.; MOHRBACHER, H.: Optimizing Gear Performance by Alloy Modification of Carburizing Steels. Metals 7, 2017, 415.
- [21] WATSON, H. J.: Wear of Gears. En: Tribology, Volume 2, Issue 4, Pages 212-216, 1969.
- [22] M. WOITE GmbH: Werkstoffdatenblatt, 1.0460. Website. <https://woite-edelstahl.info/10460de.html>. Version: 2022