



**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE FORJA EN LA FABRICACIÓN DE
TORNILLOS Y TUERCAS DE ACERO INOXIDABLE 304 EN SISPRO S.A.**

Juan Diego Peñaloza Posada

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero de Materiales

Asesores

Claudia Patricia Serna Giraldo, Doctor (PhD) en Ingeniería Mecánica

David Salamé Murillo, Ingeniero Mecánico.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería de Materiales
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Referencia

[1] J. D. Peñaloza Posada, “Análisis y evaluación del proceso de forja en la fabricación de pernos y tuercas en acero inoxidable 304”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.

Estilo IEEE (2020)



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Francisco Javier Herrera Builes

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todas las personas que me han apoyado a lo largo de mi formación académica, eso abarca desde mis primeros días hasta hoy. Va para todos aquellos que confiaron en mí, que vieron el potencial y el talento que al día de hoy florece, que hicieron parte de los momentos de aprendizaje y satisfacción, así como los momentos más tenues y difíciles, va para ellos, para mi mamá, mi papá, mi hermana, mi tía, mi tío, mi primo, mis amigos, mis amigas, para mis profesores y maestros y para todos aquellos quienes me aportaron algo para consolidar lo que se realiza aquí.

Pero en especial, dedico este trabajo a mi madre, quien más allá de la existencia me dio la formación, el desarrollo, me consolidó en la persona y el profesional que soy, porque un logro para mí es un logro para ella y sé que será incluso más feliz que yo, el día en el que me gradúe.

Por último, también se lo dedico a mi persona, a la fuerza interior que me mantuvo vivo para seguir estudiando, que ante tantas decisiones complejas por las que pasé, situaciones caóticas, indecisiones y futuros complejos, logré reponerme y terminar mis estudios, va para ese niño que de pequeño soñaba ser ingeniero y que lo terminó siendo.

Agradecimientos

Agradezco personalmente a todas las personas que me apoyaron durante este proceso, que de forma directa o indirecta me brindaron su ayuda en cada situación y en los momentos más difíciles. Esto va, evidentemente, desde mi mamá, quien es el motor completo de mi vida, ella es el apoyo más verdadero y más real, y quien más orgullo siente con esto. Continúa con Yeison Monsalve, mi amigo en los primeros semestres, Jose y Sebastián, quienes fueron mi grupo de trabajo, las personas más cercanas y con quienes viví mi etapa universitaria, con Isabel Uribe, una persona que siempre creyó en mí, que me depositó su confianza y siempre me admiró y al día de hoy es un ejemplo para mí. Adicionalmente, agradezco a Mario Alejandro Grisales, a Juan Felipe Quinto y a Felipe Arenas, por su apoyo en la última parte de mi trabajo y carrera, desde su colaboración directa en el proceso, hasta las charlas y horas de almuerzo.

Pasando a los profesores, hago mención especial a los docentes Ricardo Aristizábal, Marcelo Rojas, Fabio Vargas y Claudia Serna, quienes sus enseñanzas me salvaron e hicieron que me apropiara de esta carrera, marcando un antes y un después en mi etapa como ingeniero de materiales.

En SISPRO, agradezco principalmente a David Salamé, mi asesor externo, quien siempre me dio su apoyo y su más sincera ayuda, a Yhonny González por toda su colaboración en el proceso productivo, a Fredy y Juan Esteban por dar de su tiempo en la fabricación, a Brayan Torres y Biviana López, por los saludos y sonrisas que me daban aire en los momentos más necesarios.

Finalmente, hago mención especial a dos personas trascendentales en este proceso. En primer lugar, a James Colorado, quien fue la persona que más me ayudó, él más que nadie sabe por lo que pasé, y sacrificó su tiempo para que pudiera terminar. Por último, a Ana Sofía que fue mi apoyo mental y emocional durante todo el proceso, fue mi zona de calma, de tranquilidad, de paz, el lugar al que no llegaban los problemas y quién más me aportó en los momentos críticos

A todos ustedes, les agradezco de corazón.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
I. INTRODUCCIÓN	13
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
III. OBJETIVOS.....	15
IV. MARCO TEÓRICO.....	16
A. Forja	16
1. Forja en frío	17
2. Forja en caliente.....	18
3. Forja en dado abierto	20
4. Forja en dado cerrado.....	21
B. Mecanizado	21
1. Mecanizado por arranque de viruta	22
1.1 Torno	22
1.2 Fresadora	23
2. Roscado por laminación	23
C. Los aceros inoxidables	23
1. Aceros inoxidables austeníticos y sus tratamientos térmicos.....	24
1.1 Inestabilizadas	25
1.2 Estabilizadas.....	25
1.3 Bajo contenido de carbono.....	25
1.4 Corrosión intergranular	26
V. METODOLOGÍA	27
A. Diagnóstico.....	27

B.	Documentación bibliográfica	29
C.	Selección de muestras	29
D.	Generación de planos para la fabricación de tornillos, tuercas y moldes	30
1.	Tornillos.....	30
2.	Para el molde	31
E.	Fabricación de los productos en AISI 304	31
1.	Tornillos.....	31
2.	Tuercas.....	32
F.	Análisis metalográfico.....	33
G.	Resistencia química.....	34
H.	Balance de costos y producción	35
1.	Costos	35
2.	Producción.....	35
VI	RESULTADOS.....	36
A)	Microscopía óptica	36
1.	Tratamiento térmico empleado en SISPRO S.A.	36
1.1	Estado de entrega	36
1.2	Tornillos	36
1.3	Tuercas	41
2.	Tiempos de desmoldeo	42
2.1	20 segundos.....	42
2.2	40 segundos.....	43
2.3	60 segundos.....	45
B)	Polarización Potenciodinámica	46
1.	Estado de entrega.....	46

2. Con disolución de carburos	47
C) Relación de costos y producción	48
1. Costos	48
2. Producción	50
VII. REFERENCIAS	54

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Composición química de algunos aceros inoxidable austeníticos.	24
Tabla II. Composición química suministrada por el proveedor para el acero a trabajar.....	29
Tabla III. Condiciones de tiempo y tratamiento térmico en tornillos.	32
Tabla IV. Condiciones de tiempo y tratamiento térmico en tuercas.	33
Tabla V. Descripción de los productos fabricados.....	49
Tabla VI. Comparativa de costos con y sin la realización del tratamiento.	49
Tabla VII Turnos empleados para la producción con y sin tratamiento de disolución de carburos	50

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Proceso de forja.	17
Fig. 2. Fibras del acero	17
Fig. 3. Temperaturas del acero según la coloración.....	19
Fig. 4. Forja con dado abierto.	20
Fig. 5. Esquema real del proceso de forja en dado abierto.....	20
Fig. 6. Esquema del proceso de forja en dado cerrado.....	21
Fig. 7. Buril para torno	22
Fig. 8. Movimientos de una fresa.....	234
Fig 10. Corrosión intergranular por empobrecimiento del cromo.....	26
Fig. 11. Horno de forja, fresadora CNC y torno CNC.	28
Fig. 12. Montaje de forja y tornillo luego de la disolución.	32
Fig. 13. Montaje para la polarización.....	34
Fig. 14. AISI 304 en estado de entrega.	36
Fig. 15. Esquema de zonas de corte	37
Fig. 16. Sin disolución de carburos / Con disolución de carburos.....	37
Fig. 17. Tiempo de calentamiento promedio según diámetro de la materia prima.	39
Fig 18. Sin disolución / Con disolución en el espigo a 20x.	39
Fig. 19. Tuercas sin disolución / Con disolución a 10x.	41
Fig. 20. Cabeza a 20x y vástago a 50x.....	43
Fig. 21. Cabeza y vástago a 40s a 20x.	44
Fig. 22. Tiempo-Temperatura-Precipitación para M23C6 en AISI 304	44
Fig. 23. 40 segundos en el espigo a 50x.....	45
Fig. 24. Cabeza y espigo a 60 segundos en 20x.....	46
Fig. 25. Polarización Tafel para el acero en estado de entrega.	47
Fig. 26. Polarización Tafel para el acero con disolución de carburos en la cabeza.	48
Fig. 27. Tiempo de calentamiento promedio para el tratamiento térmico de disolución de carburos según el diámetro.	50

RESUMEN

El presente trabajo busca evaluar el proceso de forja en caliente realizado por la empresa SISPRO S.A. en piezas de acero inoxidable 304, estableciendo los parámetros y las condiciones de operación, garantizando la calidad de la microestructura que le ofrece sus propiedades resistencia a la corrosión. Para ello se fabrican muestras de tornillos y tuercas con el tratamiento térmico para mirar su impacto en la microestructura del mismo. Adicionalmente se fabrican tornillos con diferentes tiempos de desmoldeo para conocer el tiempo máximo en el que los precipitados de carburos son evidentes. Se generan curvas Tafel para comparar la resistencia a la corrosión entre el estado de entrega y el producto forjado. Los resultados muestran que no existen diferencias significativas en la reducción de carburos con el tratamiento térmico y el tiempo de desmoldeo máximo permitido fue de 20 segundos. La polarización Tafel no muestra diferencias significativas entre el estado de entrega y el producto forjado. Si el tratamiento térmico de disolución de carburos no se efectúa, puede obtener reducciones de casi 10% y 30% en los costos y tiempos de fabricación, respectivamente.

Palabras clave — Inoxidables austeníticos, disolución de carburos, corrosión intergranular, forja, precipitación de carburos.

ABSTRACT

The present work seeks to evaluate the hot forging process carried out by SISPRO S.A. in 304 stainless steel parts, establishing the parameters and operating conditions, guaranteeing the quality of the microstructure that offers its corrosion resistance properties. For this purpose, samples of bolts and nuts are manufactured with the heat treatment to observe its impact on the microstructure of the same. Additionally, bolts are manufactured with different demolding times to know the maximum time in which carbide precipitates are evident. Tafel curves are generated to compare the corrosion resistance between the delivered state and the forged product. The results show that there are no significant differences in carbide reduction with heat treatment and the maximum allowable demolding time was 20 seconds. Tafel polarization shows no significant difference between the delivered state and the forged product. If the carbide dissolution heat treatment is not performed, you can obtain reductions of almost 10% and 30% in manufacturing costs and times, respectively.

Keywords — Austenitic stainless steels, dissolution of carbides, intergranular corrosion, forging, carbide precipitation

I. INTRODUCCIÓN

Sistemas Integrales de Alta Producción SISPRO S.A. es una empresa metalmeccánica creada en el año 2006 que está ubicada en la ciudad de Medellín donde dirige sus operaciones hacia Colombia, Suramérica, Centroamérica, el Caribe y Estados Unidos. La empresa se dedica a la transformación de materias primas, específicamente de acero, cuenta con dos plantas, que están en función de sus principales líneas de énfasis, la primera dedicada a la tornillería especial forjada y la segunda a la formación de estructuras metálicas. En la tornillería especial forjada se fabrican todo tipo de pernos, tornillos, espárragos y también en la misma planta, se fabrican cadenas y productos bajo plano de referencias no comerciales y a solicitud del cliente. En la segunda se especializan en las transformaciones de láminas, perfiles, tuberías y montajes de soldadura.

La forja es una de las principales líneas de acción de la empresa, donde se trabajan aceros al carbono del tipo 1018, 1020, 1045, 4140, 4340, 8620, además de aceros inoxidable tipo 304, 310 y 316. De estos últimos, el acero inoxidable 304 el más usado y más demandado en la empresa. En el proceso de forja se somete al acero ciclos térmicos que si no son controlados adecuadamente pueden generar cambios negativos en el resultado final de producto, por ejemplo, con la formación de carburos o la pérdida de su propiedad de resistencia a la corrosión. Después del proceso de forja, las piezas se someten a un proceso adicional de calentamiento, que se definió como "disolución de carburos", el cual se implementó sin análisis previo de su efectividad. Se plantea en este proyecto evaluar el proceso de forja y su calentamiento posterior en las piezas fabricadas en acero inoxidable 304 para identificar como se está alterando el material y así mismo, se busca parametrizar algunas variables como la temperatura de forja y el tiempo de forjado en la calidad del producto final.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es bien sabido que los aceros inoxidable tienen un porcentaje de cromo superior al 12% para crear una capa pasiva que protege al material ferroso de la corrosión, pero a su vez, poseen una alta afinidad para la formación de carburos, como también los son elementos como Ti, Mo, V, Mn [1], donde la resistencia a la corrosión se puede ver disminuida por la afinidad de estos elementos con el carbono para formar carburos si no se tiene un control durante el calentamiento y enfriamiento. Es por esto, que en la empresa Sistemas Integrales de Alta Producción “SISPRO S.A.”, se viene realizando hace unos años un procedimiento al que llaman “disolución de carburos”, el cual consiste en calentar y enfriar rápidamente la pieza luego del proceso de forja, según una recomendación que alguna vez se le hizo a la empresa y donde se siguen algunos lineamientos de la norma ASTM A193 [2]. Este proceso se realiza siempre en la fabricación de tornillos y tuercas de aceros inoxidable austeníticos, como los 304, 304L, 310, 316 y 316L, pero que no tiene aún ninguna validez científica. Es por esto que surge la necesidad de verificar de manera detallada y con un fundamento válido si este proceso ayuda o no a la disolución de dichos carburos, o si por el contrario, simplemente con el enfriamiento al agua que se realiza en el proceso de forja ya es suficiente para garantizar que el producto no tendrá dichos carburos.

Adicionalmente, el tiempo de desmoldeo es un factor crítico, porque en muchas ocasiones luego de la forja, el producto, sea tornillo o tuerca, no alcanza a salir de inmediato ya que se pega en las paredes del molde, por lo que se necesitan varios golpes para poderlo retirar y esto provoca un enfriamiento y transferencia de calor por conducción en las paredes y de convección con el aire resultante, lo que puede generar, si son tiempos prolongados, una precipitación de carburos si se alcanzan las temperaturas críticas de formación.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

- Evaluar el proceso de forja en caliente realizado por la empresa SISPRO S.A. en piezas de acero inoxidable 304, estableciendo los parámetros y las condiciones de operación, garantizando la calidad de la microestructura que le ofrece sus propiedades resistencia a la corrosión.

B. Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico del proceso de forja de tornillos y tuercas en acero inoxidable 304.
- Analizar la influencia de las variables de forja en la microestructura de tornillos y tuercas de acero inoxidable 304.
- Corroborar la resistencia a la corrosión del material entre su estado de entrega, en forma de materia prima, a su estado final a manera de producto.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Forja

La forja que se remonta hacia 6000 o 9000 años atrás en el Medio Oriente, resulta de la observación de cómo la hoguera podía deformar los metales con la aplicación de una fuerza [3], por lo tanto, la forja se define como la deformación controlada de un metal hacia una forma final mediante la aplicación de una presión o de impactos sucesivos [4] Por lo tanto, el proceso implica la aplicación de fuerzas unidireccionales mediante dados, matrices o herramientas para la generación de piezas discretas como se muestra en la Fig.1 Así pues, el principio fundamental de la forja es la deformación plástica, donde el metal es sometido a diferentes cargas haciendo que sus granos se distorsionen y entren en una zona que excede el límite elástico y llega a la deformación irreversible (plástica) [5]. Es allí donde el material obtiene una nueva forma por la acción de esfuerzos y también de la temperatura (que aumenta su fluencia), y hace que se obtengan nuevas geometrías según los elementos utilizados. De tal manera, la forja está condicionada por factores internos (del material), como su composición química, sus procesos de conformación (de la pieza a modificar), de los ciclos térmicos recibidos, su proceso de fundición y el estado de deformación previa que ha sufrido (que lo puede hacer más frágil), así también de factores externos como la temperatura de trabajo, el tiempo de forja, la presión de forjado, el ciclo de forjado (cantidad de golpes), la geometría y el tipo de herramienta con la que se forja, y demás aspectos que influyen en este procedimiento de transformación del metal [6], [7], [8].

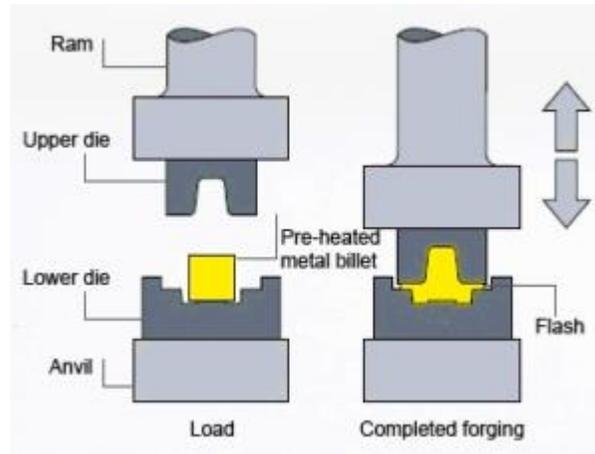


Fig. 1 Proceso de forja. [4]

Una de las ventajas de la forja, es la forma en la que quedan orientados los granos, por ejemplo, como se muestra en la Fig. 2, lo que hace que se genere un comportamiento anisotrópico y que sus propiedades mecánicas sean mejores. Esta es una de las razones por las que se prefieren tornillos forjados y no maquinados.

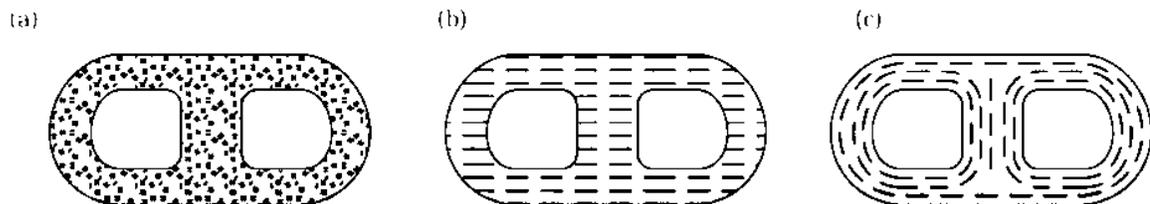


Fig. 2. Fibras del acero a) Fundido b) Maquinado c) Forjado [6]

De esta forma, existen dos tipos de clasificación de forja según su temperatura de operación, los cuales veremos a continuación.

1. Forja en frío

Este proceso se lleva a cabo por debajo de los 150°C y generalmente a temperatura ambiente. Reduce la maleabilidad y exige altas cargas, lo que limita considerablemente la aplicabilidad de la técnica. Según se utilicen o no matrices, los procesos de forja de metales se pueden dividir en forja sin matriz (forja manual o a máquina libre) y forja con matriz. En la forja libre, la pieza metálica se trabaja con máquinas especiales de forja, martillos y prensas hidráulicas. La deformación del producto se produce durante el proceso de torneado hasta que este obtiene la

forma necesaria. En caso de necesitar un objeto de forma compleja, hay que recurrir a la forja con matriz cerrada, donde el metal se coloca entre dos matrices con las que se obtiene la forma requerida. La forja libre se utiliza principalmente para elaborar piezas únicas y lotes pequeños, mientras que en las empresas se recurre con más frecuencia a la forja en matriz para fabricar grandes lotes de artículos de uso común. [3]

Como el material no ha sufrido ni experimentado ciclos térmicos, sus propiedades mecánicas y químicas son las de suministros, las mismas del lote de la colada. Además, posee ventajas como una alta productividad, una buena estabilidad dimensional y una alta rentabilidad. [9].

2. Forja en caliente

Ocurre cuando el metal es calentado a altas temperaturas antes de ser trabajado para reducir su resistencia a la deformación. En el caso del acero (dependiendo de la aleación y el contenido de carbono), la temperatura oscila entre 800°C y 1.250°C, siendo superior a la temperatura de recristalización y de transición de fase, para aceros en general, lo que facilita el conformado de la aleación [10], [11]. En la antigüedad e incluso hasta el día de hoy, se determinaba la temperatura del material y las condiciones de forja con la visualización del color del acero, donde el color que el acero adquiere está relacionado con la temperatura que alcanza, cuando más amarillo incandescente es el tono, mayor la temperatura, y luego según disminuye pasando por tonos naranja, rojizo, cereza como se muestra en la Fig. 3.

2462°F	1350°C
2372	1300
2282	1250
2192	1200
2102	1150
2012	1100
1922	1050
1832	1000
1742	950
1652	900
1562	850
1472	800
1382	750
1292	700
1202	650
1112	600

Fig. 3. Temperaturas del acero según la coloración. [38]

Por ejemplo, cuando el acero de color amarillo favorece la maleabilidad y hace que su trabajo sea más fácil, de hecho, suele trabajarse mucho a esta temperatura. Pero si la temperatura es superior a este valor y el calor es excesivo, puede quemar el carbono y debilitar la estructura del acero y si es muy bajo, inferior a los 760°C (cereza mate), se puede generar tensión en el acero y causar grietas [39]

Además de esto, la forja en caliente hace posible la fabricación de objetos con formas complejas, así como de productos pesados o voluminosos. Como en el forjado en frío, también existen tipos de procesos lo son la forja libre o de matriz abierta, la forja cerrada, la laminación de anillos, la forja en templado y el forjado isotérmico. El forjado isotérmico es un proceso especial de forjado donde el material y los troqueles son calentados a la misma temperatura. Algunas ventajas de la forja en caliente sobre la forja en frío son: Eliminación de impurezas químicas, mejora de la ductilidad, mejora de la homogeneización, precisión en el moldeo, resistencia al agrietamiento y permite fabricar partes pesadas y de gran volumen [9]. Así pues, la forja en caliente suele generar rebabas, las cuales deben ser eliminadas con procesos de mecanizado posterior.

3. Forja en dado abierto

En la forja de dado abierto no existe un molde que contenga, cierre y abarque completamente al material y para conformarlo se generan una serie de impactos de compresión donde suele deformarse y endurecerse en la zona en la que es comprimido como se muestra en la Fig. 4. A su vez, generan rebabas en el material que deben ser corregidas con un proceso de mecanizado posterior. [12]

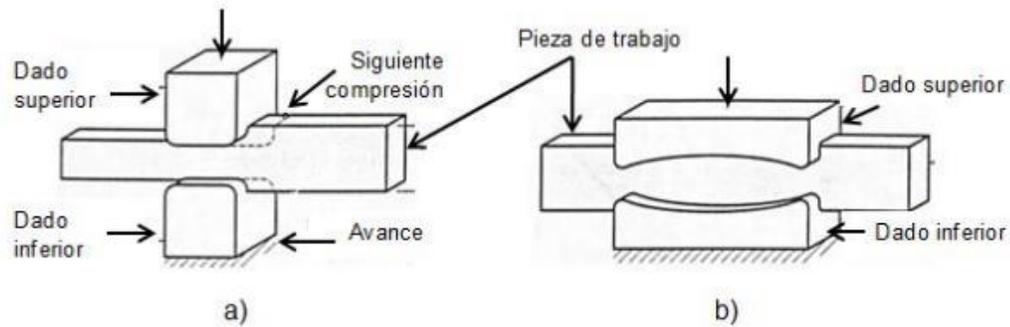


Fig. 4. Forja con dado abierto. A) Dado plano B) Dado cóncavo. [13]

Para estos casos, la fricción juega un papel muy importante, porque ella determina la homogeneidad de la deformación, a menor fricción, la deformación es más similar en cada parte de su volumen, pero si esta es mayor, se generan ondulaciones o barrigas a los lados del material cuando recibe la aplicación de la fuerza, como se muestra en la Fig. 5.

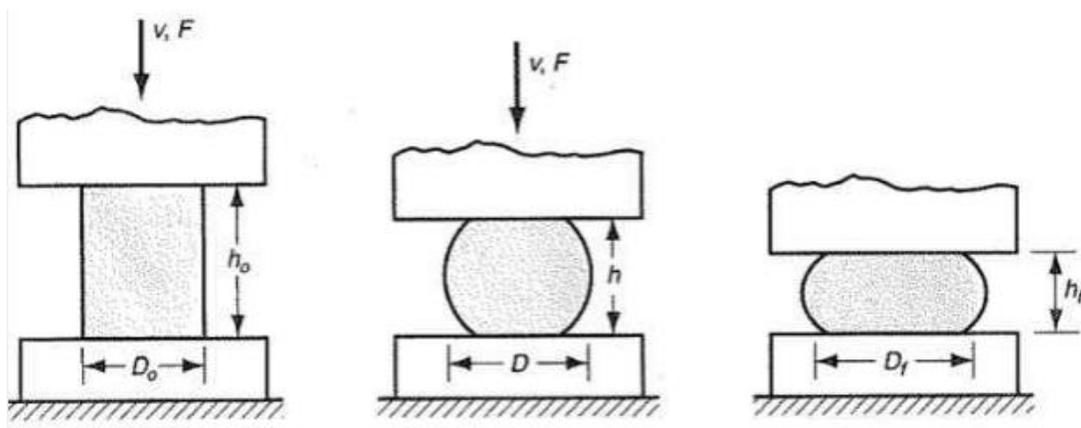


Fig. 5. Esquema real del proceso de forja en dado abierto. [5]

4. Forja en dado cerrado.

La materia prima de la que se parte generalmente es cilíndrica o cuadrada y se introduce en un molde que tiene las geometrías deseadas para la estampación, de esta manera cuando la fuerza compresora llega sobre el material, este adquiere la geometría del molde en el que está contenido y se genera su transformación. Acá también se genera una rebaba que es el desperdicio que se obtiene por el material cuando este ya ha llenado el molde y se extiende por las zonas libres o vacías del mismo como se observa en la Fig. 6.

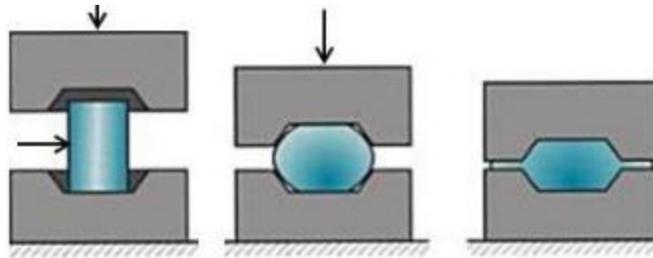


Fig. 6. Esquema del proceso de forja en dado cerrado. [13]

B. Mecanizado

Los procesos de mecanizados son útiles en la fabricación de tornillos y tuercas forjadas porque son procesos posteriores y complementarios al proceso de forja. Como se vio anteriormente, la forja suele necesitar reparar ciertas imperfecciones que se generan en el proceso, como lo son las rebabas, por eso se utiliza el mecanizado el cual consiste en el arranque de material por medio de un elemento duro que hace que se remueva el mismo para obtener esos acabados y precisiones dimensionales esperadas. Se denomina ‘mecanizado’ a cualquier proceso que se elimine material y pueda ser usado para generar piezas en bruto o para realizar acabados en piezas ya fabricadas por otros métodos [14]. El mecanizado consiste en varios tipos de procesos de remoción de materia: mecanizado por arranque de viruta (que se lleva a cabo con un torno, una fresadora, etc.); procesos abrasivos (que son procesos de rectificado); procesos avanzados de mecanizado (que se realizan por medio de mecanizado químico, electroquímico, por electroerosión, etc.) [15], [16].

Para la fabricación de tornillos, suelen usarse principalmente los métodos de arranque por viruta.

1. Mecanizado por arranque de viruta

Consiste en dar forma a un material con una herramienta de corte filada como cuchillas generando virutas con la extracción de material. Para este caso se puede generar un proceso donde se elimina mucho material con poca precisión, que es conocido como desbaste, que puede quitar hasta el 70-90% del material de la pieza original y se realiza también un acabado que es un proceso donde se remueva poco material, pero con una alta precisión dimensional [16]. Otras ventajas, son la variedad de geometrías que se puede obtener, la conservación de la microestructura, la automatización de los procesos y la poca variedad de herramientas [14].

Gran parte de estos equipos, como los que se mostrarán a continuación vienen con el sistema de Control Numérico Computarizado (CNC), el cual es un sistema de automatización digital que programa las operaciones de mecanizado.

1.1 Torno

El torno consiste en un eje que revoluciona y avanza el material para que haga contacto con el buril (una herramienta mono-filo) y remueva el material. De esta forma se pueden obtener piezas de revolución como tornillos como se muestra en la Fig. 7.

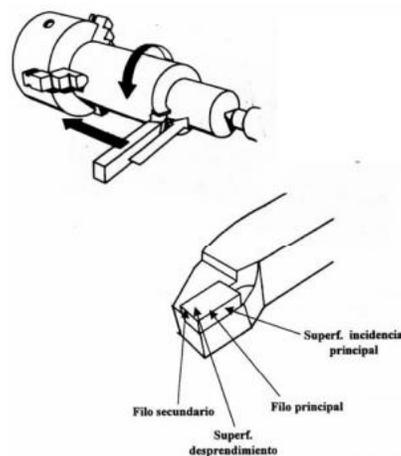


Fig. 7. Buril para torno. [15]

1.2 Fresadora

En este proceso se arranca el material por medio de una herramienta circular con múltiples filos, la cual se llama fresa, que gira sobre su propio eje y avanza hacia la pieza a trabajar.

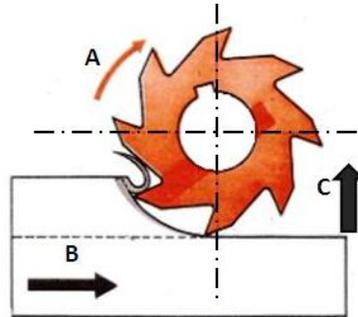


Fig. 8. Movimientos de una fresa. A) Corte B) Avance C) Penetración y profundidad. [17]

2. Roscado por laminación

Se genera cuando se pasa el material entre dos rodillos con el paso y el hilaje especificado, para que el material se deforme y se genere la rosca deseada.

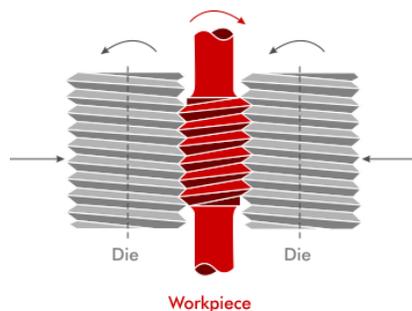


Fig. 9. Esquema roscado por laminación.

Recuperado de <https://www.profiroll.com/es/proceso/laminacion-de-roscas.html>. [19]

C. Los aceros inoxidable

Los aceros inoxidable son aceros cuya principal función es la de resistir los agentes químicos y ser resistentes a la corrosión, por lo tanto, se les añade una cantidad de cromo superior al 12% en peso y se genera una capa pasiva de óxido de cromo cuando el material está inmerso en

agentes químicos, lo cual hace que proteja al resto de la aleación de hierro que es fácilmente perjudicable [20]. Los aceros inoxidable suelen poseer un bajo contenido de carbono para evitar que formen carburos con otros elementos presentes, por ejemplo, con el propio cromo, tungsteno, vanadio, titanio y niobio. Por esta razón, se debe tener control en los procesos y ciclos térmicos porque pueden favorecer la precipitación de carburos según las temperaturas que experimente [21].

1. Aceros inoxidables austeníticos y sus tratamientos térmicos

Los aceros inoxidables austeníticos constituyen la familia con el mayor número de aleaciones disponibles, integra las series AISI 200 y 300. Tienen la habilidad de ser funcionales en temperaturas extremas y no son magnéticos. Los aceros inoxidables austeníticos se obtienen adicionando elementos estabilizadores de la austenita, tales como níquel, manganeso y nitrógeno. El contenido de cromo generalmente varía del 16% al 26%, el de níquel entre 8% a 17% y su contenido de carbono es del rango de 0.03 al 0.08% [22]. El cromo proporciona una resistencia a la oxidación en temperaturas aproximadas de 650° C en una variedad de ambientes, por lo que lo hace ideal para aplicaciones a estas temperaturas. En la Tabla 1 se muestran las composiciones químicas de algunos aceros inoxidables austeníticos.

Tabla I. Composición química de algunos aceros inoxidables austeníticos.

TIPO AISI	C (%)	Cr (%)	Ni (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S
202	0,15	18	5	1	8	0,06	0,03
302	0,15	18	8	1	2	0,045	0,03
304	0,08	18	8	1	2	0,045	0,03
309	0,2	23	14	1	2	0,045	0,03
316	0,08	17	12	1	2	0,045	0,03

Los aceros inoxidables austeníticos pueden ser inestabilizados, estabilizados o de bajo carbono según su composición química, la cual promueve o no la formación de carburos [23]

*1.1 Aceros inoxidable *inestabilizados**

Estos aceros son recocidos para asegurar la máxima resistencia a la corrosión y restaurar la máxima ductilidad y ablandamiento. Durante el recocido, los carburos que decrecen marcadamente la resistencia a la corrosión intergranular, se disuelven, como la precipitación de los carburos puede ocurrir entre los 400°C y 840°C, es deseable realizar el recocido sobre este límite. Además, es necesario que los carburos estén disueltos antes de comenzar el enfriamiento, y como esto ocurre muy lentamente, se elige la temperatura más elevada que no aumente el tamaño de grano, cercana a los 1090°C. El enfriamiento debe ser rápido pero consistente con las limitaciones de distorsión. El mejor temple es el agua, porque los carburos disueltos permanecen en solución; no obstante, cuando las piezas son delgadas y el temple en agua produce distorsión, será necesario enfriar en aire forzado. Si en este caso llegaran a precipitarse carburos, la solución será utilizar acero inoxidable estabilizado. [23]

*1.2 Aceros inoxidable *estabilizados**

Contienen cantidades controladas de Titanio, Niobio, Tantalio, Tungsteno, Vanadio y demás formadores de carburos que hacen al acero inmune a la precipitación intergranular de los carburos de cromo. Necesitan tratamiento térmico para distensionar, incrementar la ductilidad y ablandamiento o proveer una estabilidad adicional.

Como no requieren enfriamiento al agua para prevenir la formación de carburos de cromo, generalmente es adecuado enfriar en aire. Sin embargo, espesores mayores a 7 mm deberían enfriarse en agua o aceite para la máxima retención de la austenita.

1.3 Bajo contenido de carbono

El contenido de C (0,03 % máx.) es suficientemente bajo para reducir la precipitación de carburos intergranulares, ya que, al estar en bajo porcentaje, este carbono tiene pocas posibilidades de asociarse con el cromo. En este sentido, son intermedios, entre las composiciones estabilizadas y no estabilizadas. [24]

Estos aceros pueden mantenerse entre 420°C y 815°C durante 2 horas y enfriarse lentamente sin el peligro de precipitación intergranular, pero de todas maneras si los tiempos a esa temperatura son prolongados, no son totalmente inmunes a la formación de carburos que deterioren la resistencia a la corrosión. No requieren, como los aceros inestabilizados, enfriarse en agua luego del proceso de recocido. [23]

1.4 Corrosión intergranular

Cuando los aceros inoxidable austeníticos pasan un largo periodo de tiempo entre los 650°C y 800°C , se genera una precipitación de $\text{Cr}_{23}\text{Cr}_6$, lo que genera que el área vecina a ellos obtenga un empobrecimiento de cromo [25], como se muestra en la Fig. 10 haciéndolos susceptibles a la corrosión intergranular

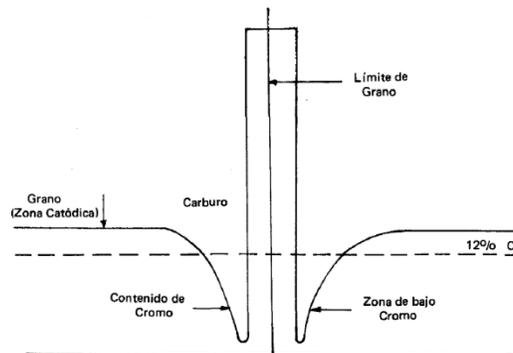


Fig 10. Corrosión intergranular por empobrecimiento del cromo. [26]

V. METODOLOGÍA

Este proyecto contó con distintos momentos o fases para la obtención de los resultados, como lo fue la parte del diagnóstico del proceso, la documentación bibliográfica, la comparación de información entre lo teórico y experimental, el ajuste de la línea investigativa, la selección y elaboración de muestras, la generación de datos en campo y toma de resultados, la preparación de muestras y su posterior análisis metalográfico, la evaluación de utilización de técnica complementarias, la realización de los ensayos potenciodinámicos para evaluar la resistencia a la corrosión de los aceros, luego de esto la estandarización de los procesos en planta luego de los resultados obtenidos y por último la realización del informe.

A. Diagnóstico

La primera parte de todo el trabajo consistió en la observación detallada de todo el proceso de forja realizado en la empresa SISPRO S.A. La empresa cuenta con dos plantas de producción, ambas ubicadas en el Barrio Antioquia en el conocido Sector Industrial de Belén en la ciudad de Medellín, en las cuales tienen propiamente su énfasis, la primera en estructuras metálicas y la segunda en tornillería forjada y procesos de mecanizado, en esta última es donde se desarrolló todo el trabajo experimental. De esta manera, se hizo una presentación por parte del personal en planta para familiarizarse en detalle con todos los procedimientos que se realizan, entre los cuales se encuentran los procesos de mecanizado de fresadora y torno CNC, roscado por laminación, corte por sierra, tratamientos térmicos (temple, revenido, recocido, alivio de tensiones, normalizado y cementación) y por supuesto, la forja en caliente que es el proceso a detallar durante todo este informe. Por lo tanto, se realizó una inducción detallada desde el personal de ingeniería hasta el personal de producción y los operarios. Desde la parte ingenieril, se explicó de forma muy descriptiva cómo funcionaban los procesos desde la elaboración de planos, la compra de material, la incorporación al plan de producción, la fabricación de moldes, el empleo de procesos de preforja en caso de ser necesario, los procesos complementarios a la forja, las tolerancias, los acabados, la preparación de superficie, el empaque, el análisis de calidad, la liberación y la entrega del producto.

Esto mismo luego fue corroborado en planta, con el supervisor de producción y los operarios, los cuales explicaron detalladamente cómo realizaban sus procedimientos y la importancia que tenían dentro del plano productivo.



Fig. 11. De izquierda a derecha: Horno de forja, fresadora CNC y torno CNC.

De esta manera, se logró observar y conocer cómo se realiza el proceso de forja en SISPRO para los aceros inoxidable, el cual consiste en los siguientes pasos:

1. Se genera orden de compra por parte del cliente.
2. Se genera orden de producción de manera interna.
3. Se realiza el procedimiento ingenieril como la elaboración de planos para tornillos, tuercas y moldes.
4. Se selecciona la materia prima a utilizar y se realiza un corte por sierra a los ejes.
5. Se selección el molde a utilizar.
6. Se realiza un calentamiento a 1200°C durante aproximadamente 15 minutos hasta obtener una coloración amarillo limón, ideal para forjar.
7. Se retira el eje del horno y se coloca sobre el molde.
8. Se acciona la prensa que comprime el material.
9. Se desmoldea y es echa inmediatamente en agua a temperatura ambiente.
10. Luego de enfriarse, se repite el proceso desde el calentamiento hasta el enfriamiento, variando la temperatura de sostenimiento en el calentamiento en 5 minutos.
11. Se mecaniza en caso de ser necesario y luego se rosca con la longitud solicitada.
12. Finalmente se pule y se entrega.

B. Documentación bibliográfica

Durante todo el proceso, desde el inicio hasta el final se realizó una constante búsqueda bibliográfica con el fin de comprender el proceso de forja, conocer las variables más relevantes, comparar la operación experimental con lo sugerido por la literatura y también con el objetivo de realizar una investigación emergente y con ajustes.

El proceso consistió en investigar profundamente el funcionamiento de la forja en caliente, conocer un poco de su historia, de sus aplicaciones, de los parámetros más relevantes como el calentamiento, la temperatura de sostenimiento, el moldeo, la deformación por presión, el enfriamiento y demás. Así como también conocer en detalle al acero inoxidable 304, su formación, su composición química, sus propiedades, aplicaciones, tratamientos térmicos, usos en la industria y demás. De esta forma podríamos determinar si las condiciones a las que vienen siendo tratado este acero son las ideales para su correcta producción y así tener la posibilidad de realizar ajustes cuando sea necesario.

C. Selección de muestras

Dentro de los aceros inoxidables utilizados en la empresa, el AISI 304 es el más usado, por lo tanto, se compró un eje 1½” de diámetro en acero inoxidable 304 de la empresa Inversinox Colombia S.A.S. donde su composición química suministrada en el certificado de calidad del proveedor se muestra en la Tabla 2, tanto para las coladas en general como para el material suministrado, con el fin de obtener tornillos y tuercas en AISI 304.

Tabla II. Composición química suministrada por el proveedor para el acero a trabajar.

TIPO AISI	C (%)	Cr (%)	Ni (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S
304 estándar	0,08 máx.	18,00-20,00	8,00-11,00	1,00 máx.	2,00 máx.	0,04 máx.	0,03 máx.
304 usado	0,067	18,10	8,08	0,52	1,03	0,04	0,02

Por lo cual se estableció de manera fija los porcentajes de cada elemento para temas comparativos, ya que, dependiendo de la colada, este mismo acero puede variar en su composición

química dentro del rango, generando variación en su respuesta a los ciclos durante el proceso como lo muestra la Tabla 2 y esto hará que se comporte de manera diferente.

D. Generación de planos para la fabricación de tornillos, tuercas y moldes

1. Tornillos

La empresa SISPRO S.A trabaja bajo plano por los que los utilizados están siempre bajo las especificaciones del cliente y no de la empresa, por lo que para este trabajo se utilizó el modelo de una solicitud de un cliente particular en donde se desarrolló cada paso de la producción.

Se selecciona la MPC (Materia Prima a Calentar), que se calcula de acuerdo al volumen de la cabeza y la rebaba, luego se divide por la longitud total para verificar que sí cumpla el factor de llenado f que debe ser menor a 3 para que se pueda dar la forja.

$$V_{MPC} = V_{Cabeza} + V_{Rebaba} \quad \text{Ecuación. 1}$$

$$L_{MPC} = \frac{V_{MPC} \times 4}{\phi_{MP}^2 \times \pi} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$f = \frac{L_{MPC}}{\phi_{MP}}; f < 3 \quad \text{Ecuación 3.}$$

Por lo tanto, se debe calcular el volumen de la materia prima a calentar (MPC), que es la sumatoria entre el volumen de la cabeza V_{Cabeza} y el volumen de la rebaba V_{Rebaba} , cuyo resultado será utilizado para hallar la longitud de la materia prima a calentar, que será la que estará dentro del horno. Con el resultado de la *Ecuación 2* se realiza el cociente con el diámetro de la materia prima (Del eje desde el que se parte), para obtener el factor de llenado (f), el cual indica si el molde alcanza a llenar o no, si este factor es mayor a 3, el diámetro de la materia prima debe ser aumentado.

Luego de corroborar que el molde sí puede llenar y saber la longitud del tornillo da la que se tiene que partir y la longitud que deberá ser calentada para ingresar al horno, se establece la

longitud a cortar en sierra y las tolerancias dimensionales junto con los procesos previos o posteriores de mecanizado. Adicionalmente, se seleccionan los rodillos según el paso o la rosca requerida y se establecen también los tratamientos térmicos a utilizar y los acabados o recubrimientos en caso de ser necesarios.

2. Para el molde

Se calculan las dimensiones para el molde con la distancia entre aristas y la longitud máxima con las siguientes fórmulas:

$$L_{\text{Molde}} = L_{\text{Espigo}} + h_{\text{Cabeza}} + 10 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\emptyset_{\text{Molde}} = D_{\text{Entre caras}} + 64 \quad \text{Ecuación 5}$$

Posteriormente se ordena un eje en 1045 con el diámetro superior comercial más cercano para luego modelar en programas digitales la geometría de la cabeza a realizar. Finalmente, se dan indicaciones sobre el mecanizado.

E. Fabricación de los productos en AISI 304

1. Tornillos

Se partió de un eje de 1 ½” de acero inoxidable austenítico 304 de 2m para sacar las muestras necesarias, en donde se cortaron diez tramos de 120mm en sierra para ser forjados.

Como la empresa no cuenta con equipos para medir la temperatura, esta se midió con un controlador EXCTECH SD200 y una termocupla tipo K y se estableció una temperatura de 1100°C durante 15 minutos.

Hay que tener en cuenta que los tornillos no se introducen completamente en el molde, sino que como se mencionó anteriormente, solo están dentro la L_{MPC} , que es la que será deformada por la prensa, porque en caso de calentarlo completamente, el eje no alcanzaría entrar en el molde por su dilatación térmica.



Fig. 12. Montaje de forja y tornillo luego de la disolución.

En la Tabla III, se muestran las condiciones a las que fueron fabricados los tornillos

Tabla III. Condiciones de tiempo y tratamiento térmico en tornillos.

Tornillo	Tiempo de desmoldeo (s)	Disolución de carburos
SD	10	No
CD	10	Si
20s	20	No
40s	40	No
60s	60	No

Adicionalmente, para cada condición se extraerá una parte de la cabeza y del espigo para ser analizadas.

2. Tuercas

Se fabricaron tuercas partiendo de un eje de 1 1/2" con las mismas condiciones de los tornillos, salvo que para tuercas sí se introduce completamente todo el eje dentro del horno. Las tuercas, se forjaron con un tiempo de desmoldeo de 10 segundos que normalmente tarda y se enfría de manera inmediata en agua a temperatura ambiente.

En la Tabla 4 se muestran las muestras generadas con sus condiciones.

Tabla IV. Condiciones de tiempo y tratamiento térmico en tuercas.

Tuerca	Tiempo de desmoldeo (s)	Disolución de carburos
SD	10	No
CD	10	Si

F. Análisis metalográfico

Para el análisis metalográfico se prepararon muestras de alrededor de 25mm de diámetro en su estado de entrega y las tuercas con el tratamiento de disolución de carburos y sin él, como se expuso en la Tabla 4. Para los tornillos se usaron las condiciones de la Tabla 3 y como se mencionó anteriormente, se extrajeron las zonas de la cabeza y el vástago con el fin de determinar la formación de carburos mediante microscopía óptica, las cuales fueron cortadas en sierra para la zona del espigo y mecanizadas en fresadora CNC para la zona de la cabeza. La preparación de muestras se hizo bajo la norma ASTM E3.

Luego de esto, se procedió a hacer un desbaste con la banda de 120, para luego generar la secuencia de lijas que se muestra a continuación: 180, 240, 280, 320, 400, 600, 1000, 1200, 1500 y 2000. Todo con el objetivo de generar la superficie más plana y tener el mejor tratamiento de muestra para el análisis.

Al terminar con las lijas, se procedió a realizar el pulido en paños, empezando a altas revoluciones y disminuyéndolas a medida que se reducía el tamaño de partícula de la alúmina, la cual se utilizó en un principio de $1\mu\text{m}$, luego de $0,3\mu\text{m}$ y finalmente de $0,05\mu\text{m}$, esto con el fin de reducir las rayas más finas y delgadas que se observaban ya no a simple vista sino con el microscopio.

Para el ataque químico, se realizaron varias pruebas para determinar el reactivo más apropiado para la aleación, se usaron diferentes ataques propuestos por el documento Standard Practice for Microetching Metals and Alloys de la norma ASTM E407-07 de 2015 y el que mejor se adaptó fue la solución de 10 mL de HNO_3 , 20 mL de HCl y 30 mL de agua propuesto para aceros

austeníticos de la serie 300. Para estos también se determinó el tiempo óptimo de contacto entre la superficie del metal y el agente químico que fue de 3 minutos para todas las muestras.

Finalmente, se observó la microestructura del material a diferentes aumentos y se realizaron capturas en 5x, 10x, 20x, 50x y 100x.

G. Resistencia química.

Se prepararon las muestras mediante torno CNC, generando un diámetro de 18mm y un espesor de 6mm ideal para las celdas electroquímicas.

Para la polarización potenciodinámica que cuyo objetivo es obtener las curvas Tafel, se aplicó un voltaje desde $-0,4V$ hasta $0,4V$ con una velocidad de barrido de $170 \mu V/s$ por 1 hr en un potenciostato Autolab AUT84636 que estaba en circuito con el sistema de tres electrodos, conformados por el electrodo referencia de Ag/AgCl quien es el que posee un potencial constante, el contraelectrodo que es una barra de grafito encargada de aportar electrones a la solución y la muestra de referencia a quien se medirá su densidad de corriente en función del potencial aplicado.

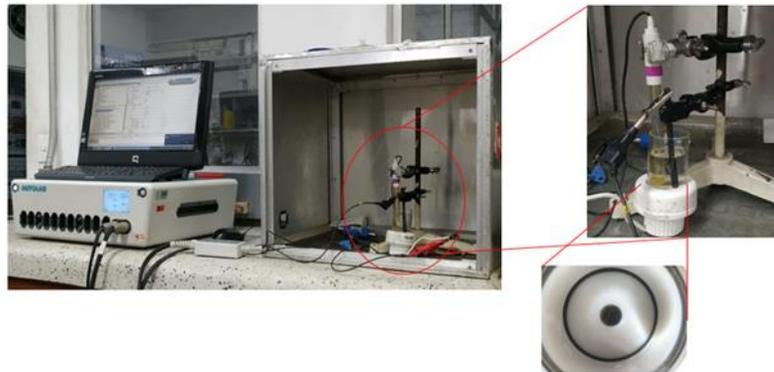


Fig. 13. Montaje para la polarización.

Para el electrolito, se utilizó la una solución de NaCl al 3,5wt% como sugerían algunos autores [34], [35] y se introdujo en las celdas electroquímicas, las cuales poseen un área expuesta de $1,33cm^2$

Finalmente, se extrajeron los datos de la curva como el potencial aplicado (V) y la corriente percibida (A) en un archivo .txt para luego ser procesados en Excel y graficados en el software Origin.

H. Balance de costos y producción

1. Costos

Se realizó un balance de costos en donde se compararon los precios con la inclusión y la exclusión de la disolución de carburos en términos monetarios y de rentabilidad para la empresa.

Para esta condición, se utilizó una orden reciente de un cliente en donde se usaba acero AISI 304 y que se le realizó propiamente la disolución de carburos a cada pieza. Las cantidades para esta fabricación estaban compuestas de 320 tornillos de la referencia A, 320 tornillos de la referencia B y 640 tuercas. Para el balance de costos se utilizó el precio por kilo unitario del tratamiento térmico (disolución de carburos) que estima la empresa y se costó el resto de la producción con los parámetros internos de la misma. Con este resultado se calculó un precio incluyendo el precio/kg del tratamiento y sin él, para conocer la reducción de costos que podría tener.

2. Producción

A su vez se realizó una estimación del tiempo invertido en el tratamiento térmico y conocer en cuanto se podría mejorar el tiempo de entrega de esta producción si este tratamiento térmico no se realizase. Para esta situación se obtuvieron datos de los tiempos de tratamiento promedio en función del diámetro de la materia prima y se propuso una ecuación para parametrizar la operación.

Para determinar el tiempo que tarda el tratamiento térmico en la parte de producción se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Turnos necesarios} = \frac{\text{Cantidad de elementos} \times \text{Tiempo de calentamiento}}{5 \text{ elementos} \times 60 \text{min} \times 10} \quad \text{Ecuación 6.}$$

VI RESULTADOS

A) Microscopía óptica

1. Tratamiento térmico empleado en SISPRO S.A.

1.1 Estado de entrega

De la Fig. 14 se puede destacar lo fina que es la estructura del material inicialmente antes de ser procesado, ya que el material de entrega es un eje redondo macizo que proviene del proceso de laminación.. Así pues, en la micrografía se notan los característicos granos austeníticos maclados y algunos carburos precipitados, pero no en mucha cantidad, lo que evidencia el buen procesamiento de la materia prima por parte del proveedor.

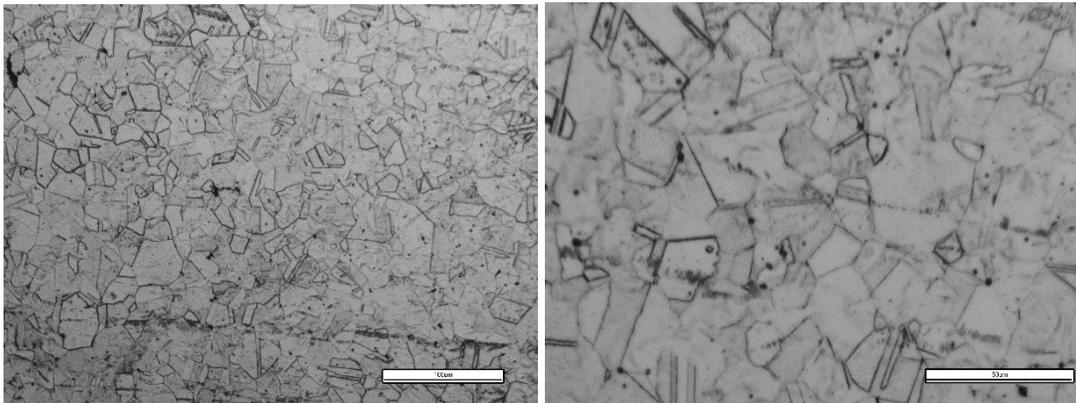


Fig. 14. AISI 304 en estado de entrega a 20x y 50x.

1.2 Tornillos

En la Fig. 15 se muestra un esquema de las zonas de los tornillos en donde se hicieron los cortes para ser analizados.



Fig. 15. Zonas de corte A) Cabeza B) Espigo

Las micrografías que se muestran en la Fig. 16, evidencian la microestructura de ambos tornillos en la zona A, después del proceso de forja y con el tratamiento de disolución de carburos.

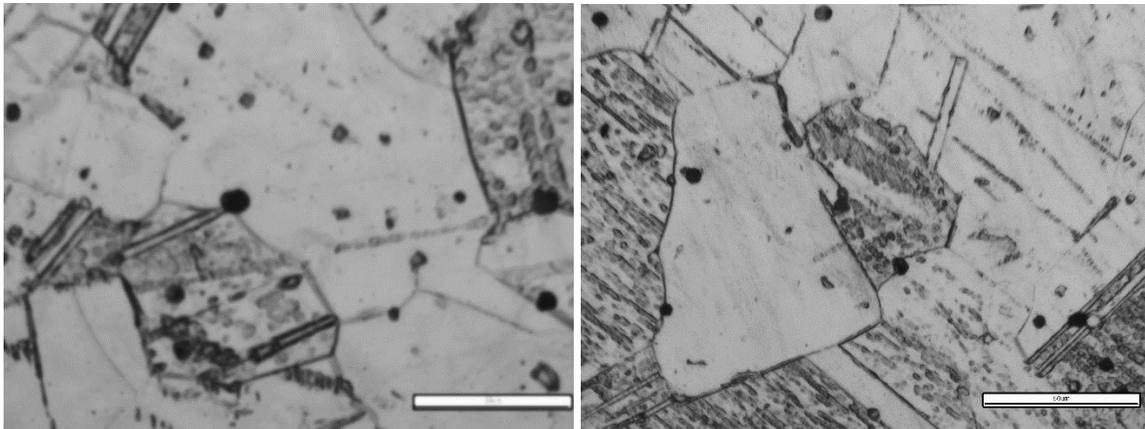


Fig. 16. Sin disolución de carburos / Con disolución de carburos. 50x.

De estas imágenes se destaca que no hay muchas diferencias entre las microestructuras de las dos condiciones analizadas. Tanto con el tratamiento como sin él, se evidencian los granos austeníticos maclados que son característicos de este tipo de aleación, se evidencian claramente los límites de grano los cuales son los sitios que favorecen la nucleación de carburos. Estos carburos de cromo [28] surgen luego de la asociación del cromo en solución como el carbono del acero, estos se nuclean tanto en el interior como en el límite de grano, siendo el último su sitio de mayor

frecuencia. El tamaño de grano permanece estándar, tampoco hay variaciones significativas ni en el tamaño, ni en la cantidad de carburos, siendo un poco menor en la imagen de la derecha. Esto es esperado dado que ambos son sometidos a la misma temperatura, la cual está por encima de lo recomendado por ciertos autores [23], [24] [25]. Se sabe que para estas temperaturas puede existir una disolución completa de los carburos y ambos usan el mismo medio de enfriamiento (agua a temperatura ambiente), para así evitar las zonas de precipitación críticas de carburos entre 470°C y 950°C.

Sin embargo, no existe una completa disolución de los mismos y es que, aunque se utilicen las temperaturas recomendadas para que los carburos precipitados entren en solución, no hay una completa homogenización y tiempo de sostenimiento a esa temperatura que es necesaria para que se disuelvan completamente. La situación está en que el horno que dispone la empresa no tiene regulador ni control de la temperatura, por lo tanto este horno solo puede prenderse y apagarse y no puede sostener la temperatura, es decir, si un tornillo se queda dentro de este horno por los tiempos recomendados es muy probable que su temperatura suba, ya que el horno trabaja entre 1200°C y 1300°C (según los valores arrojados por la termocupla) donde por un lado aumentaría considerablemente el tamaño de grano si se sobrepasan los 1090°C y aparte se quemaría el carbono existente generando una pieza completamente defectuosa y casi sin posibilidad de reproceso. Por lo tanto, no existe un tiempo de sostenimiento en el material, sino simplemente un tiempo de calentamiento, que se da según lo que tarde la pieza en obtener amarillo limón cuyas condiciones son las ideales para la forja. En la Fig. 17 se muestran los tiempos de calentamiento promedio de los ejes para tornillos en función del diámetro.

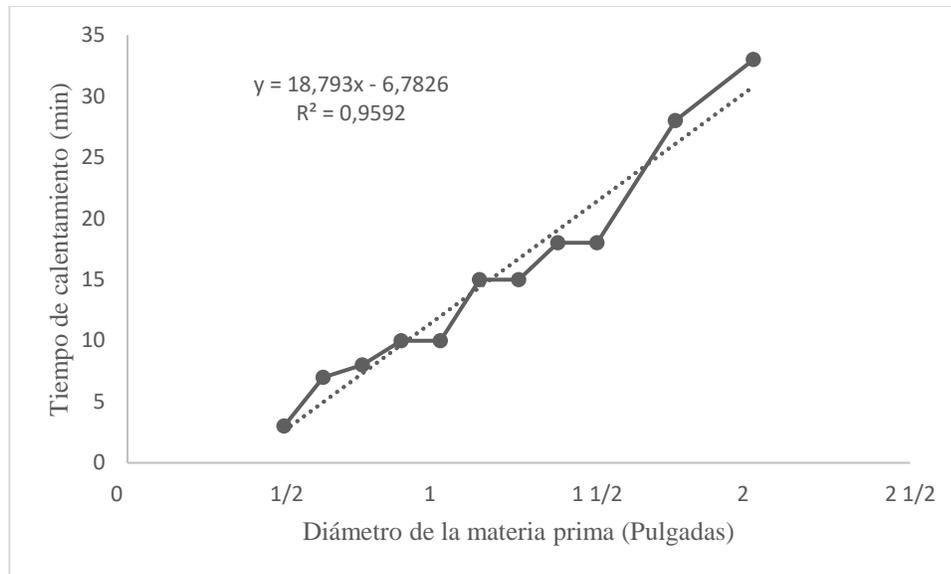


Fig. 17. Tiempo de calentamiento promedio según diámetro de la materia prima para forja.

Por lo tanto, como no existe sostenimiento alguno sino solo calentamiento, los carburos, aunque están en la temperatura óptima para su disolución no pueden difundirse por falta de tiempo, lo que genera que se mantenga los carburos que trae el material desde su estado de entrega y a parte que se formen más si el enfriamiento no es el adecuado. Ya que solo pueden desaparecer si están disueltos entre 1090°C y 1150°C para el 304 [23].

En la Fig. 18, se evidencian la microestructura de ambos tornillos en la zona B.

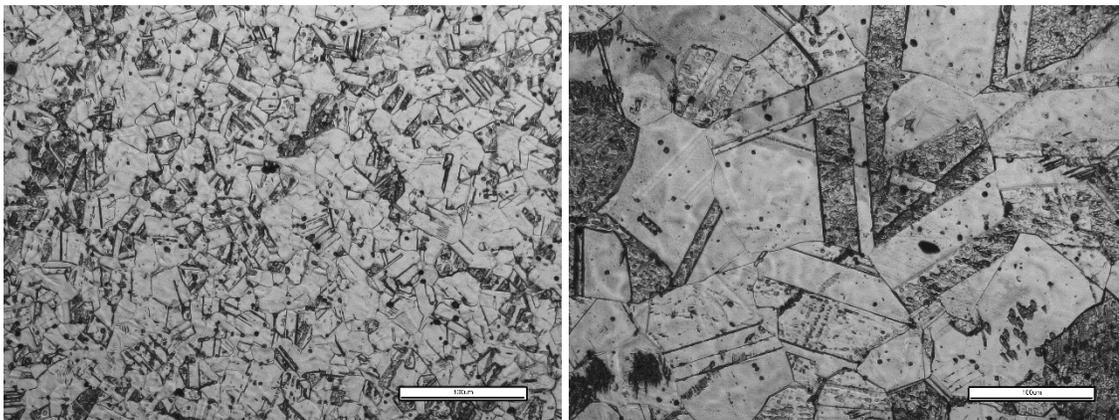


Fig 18. Sin disolución / Con disolución en el espigo a 20x.

La microestructura es austenítica maclada con algunos precipitados de carburos de cromo. Para este caso, se observa claramente un crecimiento de grano y del tamaño de los carburos después del tratamiento de disolución de carburos. El tratamiento térmico aplicado genera una modificación en el tamaño de grano y de los carburos de forma heterogénea en comparación de la cabeza, esto podría explicarse por el importante contenido de níquel y ser la fase austenita estabilizada, la cual tiene la particularidad de que sus granos crecen considerablemente con el aumento de la temperatura. Cuando se realiza el primer tornillo, sin disolución, se parte de una materia prima como se muestra en la Fig. 14 y de ahí el grano empieza a crecer en favor de la temperatura (sobre todo cuando excede los 1100°C), por lo que la cabeza que está dentro del horno tiene mayor tamaño de grano y el vástago o espigo que está por fuera de esta (Fig. 12) conserva casi la misma distribución y tamaño que su estado de entrega de eje macizo laminado. Entonces, si se desea reducir el tamaño de grano, solo será posible mediante la propia deformación de los mismos.

En ese mismo sentido, los granos del espigo sin tratar no han alcanzado una temperatura suficiente para obtener un crecimiento, en cambio la cabeza sin disolución y el espigo tratado sí, lo que explica su diferencia en tamaño y de carburos disueltos. Esto implica, que desde la cabeza hasta el espigo hay una diferencia microestructural en el tornillo sin tratamiento en función del gradiente de temperatura. En el proceso de forja, solo la cabeza del tornillo que es la es L_{MPC} es quien se somete al calentamiento directo dentro del horno hasta la temperatura sea ideal según la coloración, alcanzando temperaturas de más de 1150°C. Por el contrario, en el extremo del vástago la temperatura es menor, esto permite explicar porque el mayor tamaño de grano se evidencia en la cabeza

Por lo tanto, la temperatura en el vástago no es suficiente para generar un crecimiento de grano, pero sí para promover la formación de carburos. Para esta situación, se podría proponer calentar completamente el eje y forjarlo para obtener el tornillo, la problemática está en que los inoxidables austeníticos poseen una alta dilatación térmica, por lo que podría pegarse a las paredes y complicar el desmoldeo generando tiempos de más de 60 segundos. En consecuencia, unas partes dentro del espigo podrían quedar con mayor diámetro que las otras a causa de la dilatación térmica, lo que implicaría una pérdida su estabilidad dimensional. Adicionalmente, los moldes ya no

podrían ser usados para aceros al carbón, quienes tienen menor dilatación térmica lo que haría de esta una solución poco rentable.

Finalmente, el espigo tiende a poseer la misma microestructura del estado de entrega, por lo tanto, tendrá propiedades similares a las de suministro, pero cuando es sometido al calentamiento, alcanza las zonas de formación de carburos y esto hace que luego se terminen formando si no se tiene un control en la temperatura y en el enfriamiento.

1.3 Tuercas

Las tuercas tienen una particularidad respecto a los tornillos y es que estas sí se ingresan completamente dentro del horno antes de la forja cuando están en forma de ejes, por lo tanto, en ellas no existen gradientes de temperatura y alcanzan el mismo valor, lo que hace que sea indiferente la parte o la zona desde la cual se extraiga la muestra para el análisis. Cuando no existen gradientes de temperatura, la microestructura no cambia y si el enfriamiento al que se someten las piezas es el mismo, no existirán zonas de temperaturas variables que favorezcan la formación de carburos como sucede en el espigo del tornillo, como se verá más adelante.

Así pues, las micrografías de las tuercas fabricadas después del proceso de forja y con el tratamiento de disolución de carburos se muestran en la Fig. 19.

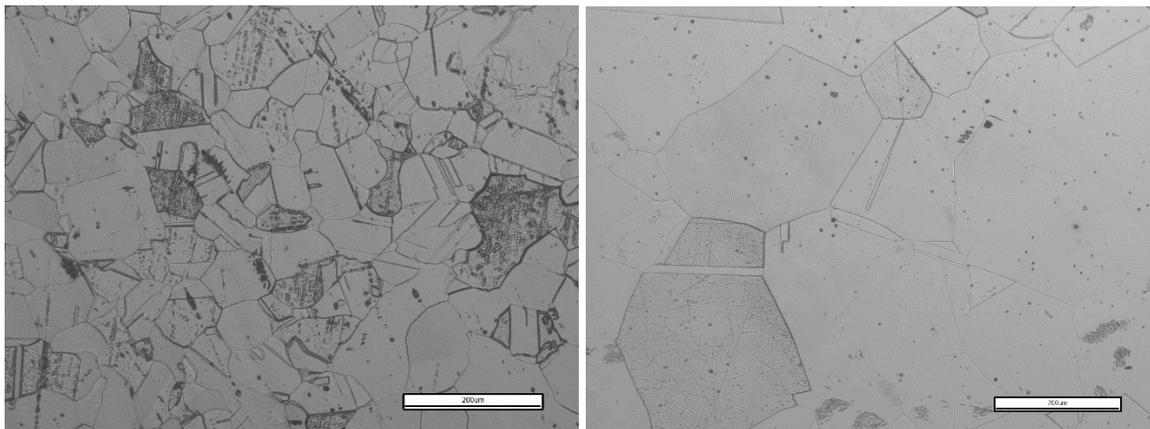


Fig. 19. Tuercas sin disolución / Con disolución a 10x.

Se observa en la Fig. 19 un evidente crecimiento de grano, esa es una constante en este trabajo cuando no se tiene control de la temperatura donde la muestra con disolución exhibe que la temperatura a la que llegó fue mayor que sin disolución, además el material ya fue sometido a un ciclo térmico previo (proceso de forja), por lo que el crecimiento de grano no parte desde el estado de entrega, sino de la tuerca ya forjada con un grano más grande, lo que hace que su microestructura sea diferente. También se muestra que aún existen carburos y es por la misma razón que se explicó en el apartado anterior, aunque se esté en la temperatura ideal, no existe un tiempo de sostenimiento suficiente para que estos sean disueltos.

En un análisis más detallado de la muestra sin tratamiento de disolución de carburos, se evidencia la presencia de zonas de carburos, los cuales son más pequeños que la muestra tratada, lo que abre la discusión un poco hacia si el tamaño de grano y de carburos favorece o desfavorece la resistencia a la corrosión del material, situación que se verá más adelante. Así pues, se establece la hipótesis de que, al tener mayor tamaño, la zona de precipitación de carburos genera un empobrecimiento de cromo más grande en su alrededor y favorece el ataque intergranular [26], por lo que quizás realizar este tratamiento nuevamente puede tener el efecto contrario al buscado.

2. Tiempos de desmoldeo

Uno de los principales problemas en el proceso de forja es el desmoldeo, este es el paso que crea la mayor cantidad de rechazos en las piezas producidas y hace también que ellas requieran de la disolución de carburos por la presunta formación de estos. Por lo tanto, se obtuvieron las muestras en los diferentes tiempos establecidos de 20s, 40s y 60s para evaluar el efecto del tiempo de desmoldeo en la formación de carburos en la microestructura AISI 304.

2.1 20 segundos

Para esta situación, los tornillos después del proceso de forja permanecieron durante 20 segundos en el molde, 10 segundos más de lo que se demora en promedio el forjador en desmoldear una pieza en óptimas condiciones. Las micrografías de esta condición se encuentran en la Fig. 20.

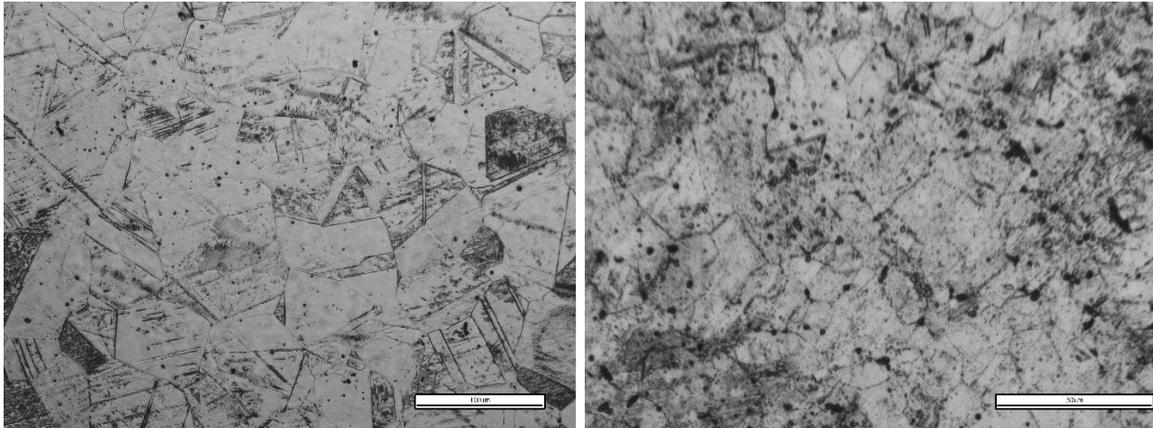


Fig. 20. Cabeza a 20x y vástago a 50x.

Se evidencia en la micrografía la estructura de granos austeníticos maclados característicos de los aceros inoxidable austeníticos en la Fig. 20, con pequeñas evidencias de carburos precipitados. En el vástago se tiene un poco más de detalle sobre esta precipitación, que aún es mínima y similar a la Fig. 18. donde el tiempo de desmoldeo es de 10 segundos.

Evidentemente es así, se comprueba que la estructura en el vástago es más fina, como se había expuesto anteriormente y no tiene diferencias significativas en cuanto a la formación de carburos con el tiempo estándar, por lo tanto, este tiempo de desmoldeo aún es permitido para conservar la calidad del producto.

2.2 40 segundos

Pasando a un intervalo un poco mayor, surge la duda en pensar si ya en este tiempo, alguna parte de tornillo sufre pérdidas considerables de calor por conducción con el molde y convección con el aire favoreciendo un enfriamiento más lento y generando una condición de permanencia de temperatura en la zona crítica de formación de carburos. Por lo tanto, los resultados de las micrografías de la cabeza y el vástago se muestran en la Fig. 21.

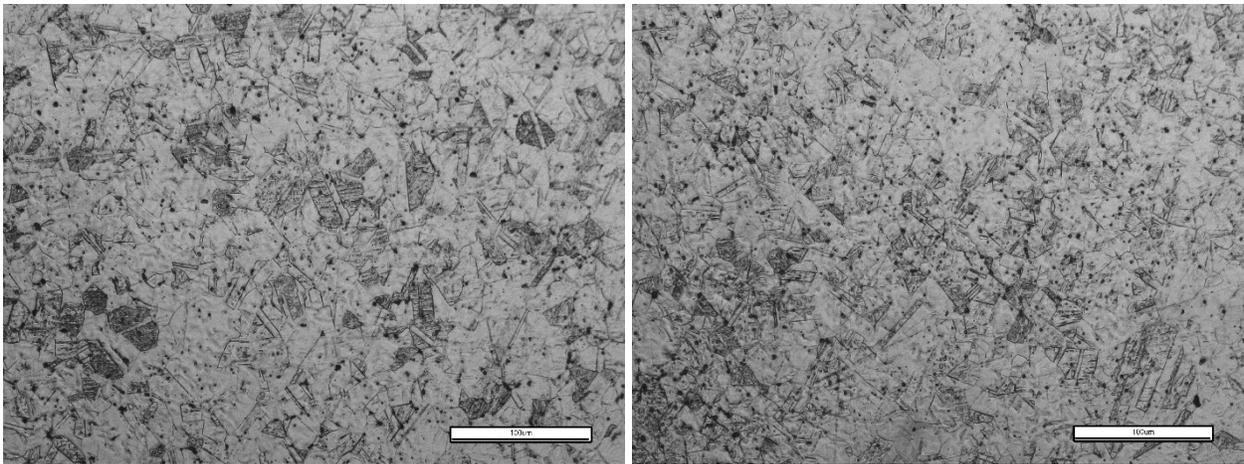


Fig. 21. Cabeza y vástago a 40s a 20x.

En este tiempo de desmoldeo, se nota un poco más la precipitación de carburos, esto sucede porque cada vez se acerca más a la nariz de precipitación de carburos, como se observa en la Fig. 22.

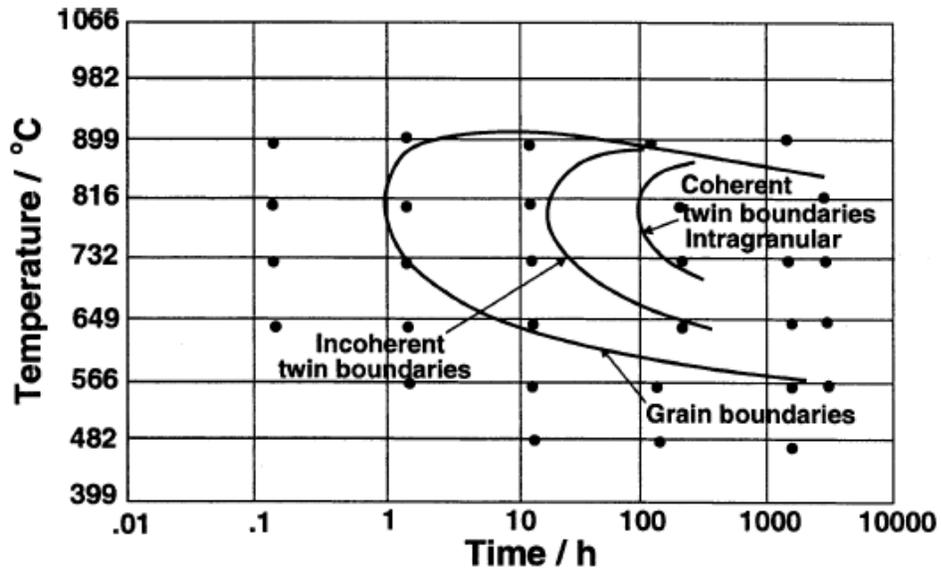


Fig. 22. Tiempo-Temperatura-Precipitación para $M_{23}C_6$ en AISI 304. [29]

Un detalle a mayores aumentos de este comportamiento se muestra en la Fig. 23.

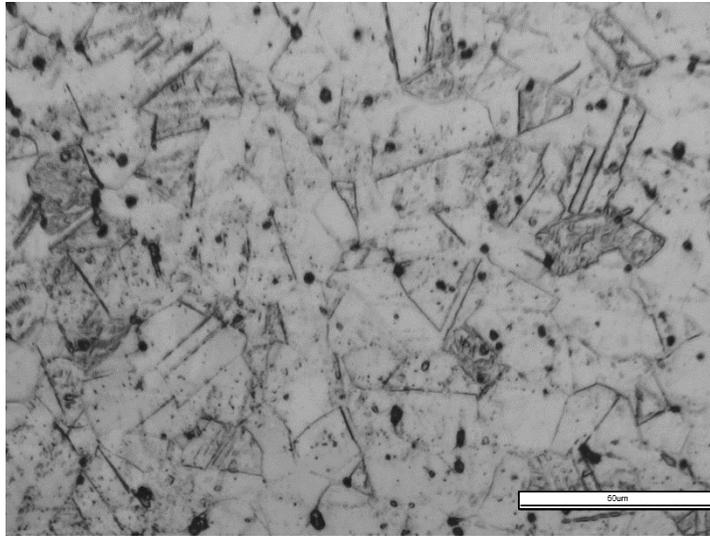


Fig. 23. 40 segundo en el espigo a 50x.

Se establece que quizás para esta condición ya no sea tan conveniente liberar el producto por temas de calidad y en este tiempo se requiera realizar la disolución de carburos para obtener una estructura libre de ellos.

2.3 60 segundos

A su vez, se evaluò el tiempo más prolongado de desmoldeo después de forja en la microestructura del tornillo. La micrografía de la Fig. 24 evidencia de manera notoria la formación de carburos por toda la microestructura del material, estableciendo que este es un tiempo extenso para lo que requiere una fabricación de forja y por lo tanto, este producto debe ser rechazado o reprocesado con el tratamiento térmico estudiado para conservar sus propiedades y evitar la corrosión intergranular.

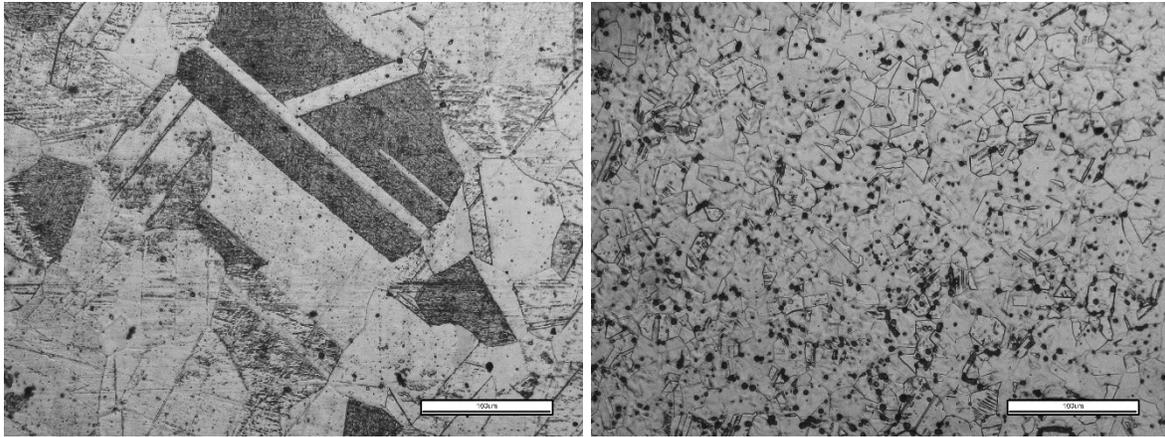


Fig. 24. Cabeza y espigo a 60 segundos en 20x.

En la cabeza se observa la microestructura compuesta de grano austenítico grande con ligeras precipitaciones de carburo de tamaño pequeño. En el vástago se evidencia un tamaño de grano fino, pero con carburos más grandes y en mayor cantidad. Estos resultados muestran que esta parte estuvo un largo tiempo en la temperatura de precipitación y es por eso que gran parte de su estructura está llena de carburos, por lo tanto, esta pieza no puede ser aceptada.

De esta manera, se destaca la evolución de la formación y precipitación de carburos a medida que pasa el tiempo en el molde, donde disminuye su temperatura de manera lenta y entra en rango de temperatura crítica donde la precipitación de carburos es inminente.

B) Polarización Potenciodinámica

Las curvas Tafel se obtuvieron luego de extraer los valores de corriente (A) y potencial (V) del software de análisis NOVA 1.10 y con un área expuesta de $1,33 \text{ cm}^2$, donde se obtuvieron los siguientes datos

1. Estado de entrega

En la Fig. 25 se presenta la curva de polarización potenciodinámica de la muestra en estado de entrega.

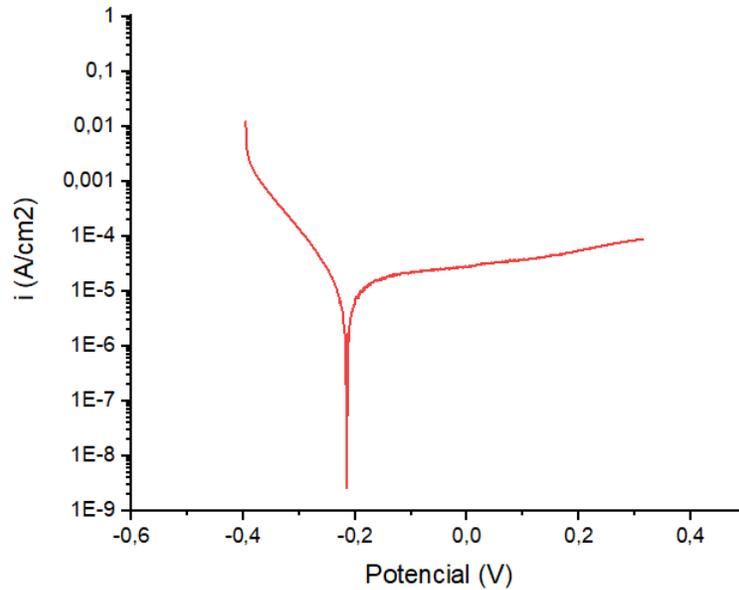


Fig. 25. Polarización Tafel para el acero en estado de entrega.

De la figura anterior se determina que se tiene un potencial de corrosión de -0,21V y una densidad de corriente de $1,16 \times 10^{-6}$ A/cm^2 , lo que es usual según algunos autores [35], [37]. Esto muestra cómo la salmuera o solución salina afecta al metal en cuestión y se puede afirmar que el material entregado está en condiciones estándares y normales de calidad [36].

2. Con disolución de carburos

En la Fig. 26 se presenta la curva de polarización potenciodinámica de la muestra forjada con disolución de carburos en la cabeza.

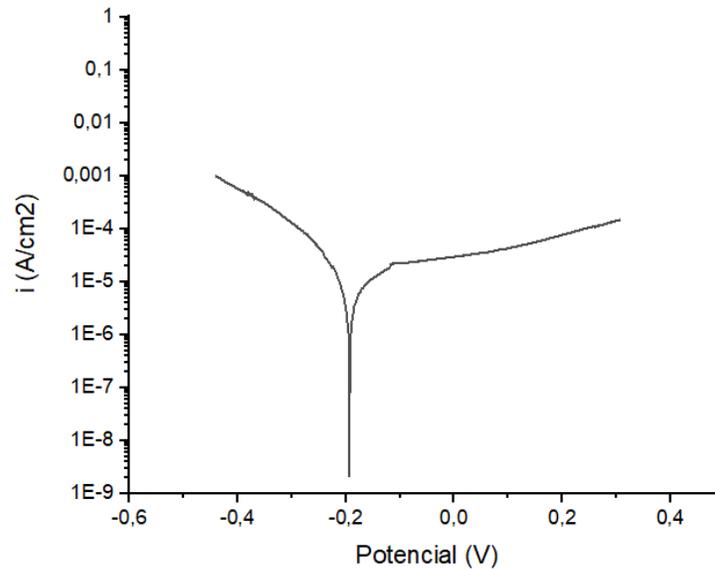


Fig. 26. Polarización Tafel para el acero con disolución de carburos en la cabeza.

Cuando se realiza el tratamiento, la curva de polarización cambia un poco, porque se determina un potencial de corrosión de $-0,19\text{V}$ y una densidad de corriente $1,19 \times 10^6 \text{ A/cm}$, los cuales son similares a la pieza en su estado de entrega, lo que permite evidenciar que no existen diferencias significativas en cuanto a la resistencia a la corrosión en función del tamaño de grano como también sostiene J. Tortosa, A. Sánchez y A. Sánchez [37].

Adicional a esto, si se comparan las figuras Tafel 1 y Tafel 2, se nota que las densidades de corriente son muy similares, cuyo valor evidencia la favorabilidad termodinámica o la misma espontaneidad con las que se dan las reacciones por lo que se da a entender que se trabaja con el mismo material, claro está, ambos son un 304, por lo tanto, la condición de tratamiento de disolución de carburos no afecta considerablemente la resistencia a la corrosión.

C) Relación de costos y producción

1. Costos

En la Tabla 5 se presentan los resultados respecto a los costos y tiempos de producción generados cuando se realiza el tratamiento térmico de disolución de carburos y cuando no.

Tabla V. Descripción de los productos fabricados.

Tipo	Peso (kg)	Cantidad
Tornillo A	1,77	320
Tornillo B	1,88	320
Tuerca	0,36	640

La Tabla 6 muestra la comparativa de costos para una orden ya fabricada donde expone los costos unitarios y totales de los elementos expuestos cuando se le aplica y cuando no el tratamiento de disolución de carburos. Se nota en primer lugar una reducción mayor para el Tornillo B ya que el costo del tratamiento térmico está en función del peso de la unidad y como se muestra en la Tabla 5, este es el producto de mayor peso. Es por tal motivo, que la exclusión de este tratamiento térmico tendrá mayor impacto cuando los tornillos son más pesados y por eso en las tuercas, la diferencia es menor.

Tabla VI. Comparativa de costos con y sin la realización del tratamiento.

Condición	Con disolución		Sin disolución	
	Valor unitario (COP)	Valor total (COP)	Valor unitario (COP)	Valor total (COP)
Tornillo A	66.227	21.192.489	59.688	19.100.278
Tornillo B	74.023	23.687.249	67.078	21.464.876
Tuercas	29.656	18.979.559	28.338	18.136.203
Total	169.905	63.859.297	155.104	58.701.357

Así pues, se obtiene una reducción del 8% del total de los costos cuando no se realiza el tratamiento térmico, lo que en materia comercial es un porcentaje más que suficiente para destacar en productos de precios similares, generalmente las diferencias en precios para estas fabricaciones son de un 1% o 2%, máximo un 5%, lo que haría a la empresa más competitiva y aumentaría su rentabilidad.

2. Producción

En la Fig. 27 se muestra el tiempo de calentamiento promedio para el tratamiento de disolución de carburos según el diámetro.

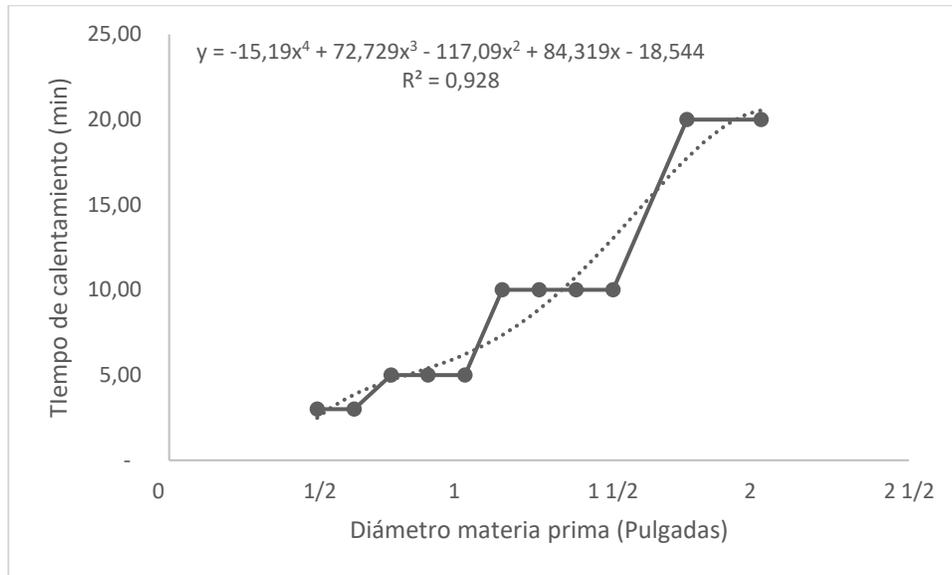


Fig. 27. Tiempo de calentamiento promedio para el tratamiento térmico de disolución de carburos según el diámetro.

Haciendo uso de la Ecuación 6 y tomando el tiempo de calentamiento aplicado en la producción que fue de 10 minutos, se obtuvo una cantidad de 4 turnos empleados solo para el tratamiento de disolución de carburos. Todo el proceso productivo de tuercas y tornillos tardó 12 días en realizarse, por lo tanto, la comparativa en tiempos de producción se muestra en la Tabla 7.

Tabla VII. Turnos empleados para la producción con y sin tratamiento de disolución de carburos.

Producción	Turnos necesarios	Reducción (%)
Con disolución	14	28,5%
Sin disolución	10	

Por lo tanto, se reducen los tiempos de fabricación casi en su tercera parte, lo que hace más competitiva a la empresa en términos de tiempos de entrega y genera mayor productividad ya que se estaría liberando espacio para otras órdenes.

VII. CONCLUSIONES

El tratamiento térmico de disolución de carburos realizado por la empresa SISPRO S.A muestra que los tornillos no poseen una reducción en la cantidad de carburos, además, el espigo posee una microestructura similar a la materia prima ya que al no introducirse dentro del horno, no alcanza las temperaturas para generar un crecimiento de grano significativo. Ambos poseen precipitados de carburos de cromo porque no se logran los tiempos de sostenimiento sugeridos para la disolución, ya que el horno que posee la empresa no tiene la manera de regular la temperatura, haciendo que solo exista calentamiento y que la temperatura de forja se dé por la coloración del acero.

Las tuercas forjadas, no muestran cambios significativos en cuanto a la disolución de carburos con el tratamiento térmico, pero al igual que los tornillos, se evidencia un incremento en el tamaño de grano por las temperaturas utilizadas y porque la muestra con el tratamiento de disolución de carburos parte de una pieza con un crecimiento de grano previo generado por el calentamiento inicial de forja.

Se midió la temperatura del horno y la del tornillo, estando la primera en un rango entre 1200°C y 1300°C y la segunda en 1100°C lo cual está en los valores sugeridos para disolver los carburos del AISI 304, aunque esté un poco por encima de lo recomendado para evitar el crecimiento de grano. Sin embargo, la temperatura siempre será variable dado que no existe forma de regularla y si el material no se saca a tiempo, puede alcanzar la temperatura del horno, quemando el carbono existente y debilitando la estructura.

El tiempo de sostenimiento es uno de los factores más determinantes para generar una completa disolución de carburos y es la razón por la cual aun alcanzando la temperatura óptima de disolución, estos no se disuelven completamente. Por lo tanto, se recomienda emplear un sistema para regular la temperatura del horno.

En cuanto al enfriamiento, el agua está en capacidad de generar una estructura libre de carburos o al menos con muy pocos.

Las piezas que pasan menos de 20 segundos en el molde están en buenas condiciones para ser procesadas, luego de este tiempo empiezan a mostrar una precipitación de carburos considerables que no son ideales y se sugiere realizar el tratamiento térmico de disolución de carburos para corregir los defectos.

Las polarizaciones muestran valores muy similares de potencial aplicado y densidad de corriente para la muestra en estado de entrega y en su proceso de forja, lo que evidencia que no hay implicaciones significativas para la resistencia a la corrosión con respecto al proceso de forja y al tamaño de grano.

Se obtienen reducciones de hasta el 8% en los costos de producción y casi un 30% en los tiempos de fabricación cuando no se realiza la disolución de carburos

Finalmente, si se requieren fabricar piezas con una menor cantidad de carburos, se sugiere utilizar aleaciones estabilizadas con Ti, Nb, W y Ta o de bajo contenido de carbono como el AISI 304L que impiden la asociación del cromo con el carbono y por tanto de los precipitados que generan la corrosión intergranular,

VII. REFERENCIAS

- [1] A. Valencia Giraldo, Tecnología de los Tratamientos Térmicos de los Metales, Medellín: Universidad de Antioquia, 1986.
- [2] ASTM, Standard Specification for Alloy-Steel and Stainless Steel Bolting Materials for High-Temperature Service, 2017.
- [3] METINVEST, «Historia y evolución de la forja del metal,» 27 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://metinvestholding.com/es/media/news/kuznechnoe-masterstvo-istoriya-i-sovremennostj-kovki-metalla>.
- [4] Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, «El proceso de forja,» [En línea]. Available: https://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/713_ca.pdf. [Último acceso: 26 Abril 2022].
- [5] F. Gutiérrez Castillo, «Forjado,» Junio 2018. [En línea]. Available: https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/Sahagun/industrial/2018/Forjado.pdf.
- [6] «Module 3: Forging,» [En línea]. Available: https://www.rajagiritech.ac.in/home/mech/Course_Content/Semester%20IV/ME%20220%20Manufacturing%20Technology/Module%203.pdf. [Último acceso: 15 Septiembre 2022].
- [7] M. Greger, Forging, Ostrava: Technical University of Ostrava, 2014, p. 176.
- [8] ASM International, Cold and Hot Forging, Ohio, 2004.
- [9] Gestión de Compras, «Forja en frío,» [En línea]. Available: <https://www.gestiondecompras.com/wp-content/uploads/2021/11/forja-en-frio-es.pdf>. [Último acceso: 18 Marzo 2022].
- [10] H. Kuhn, «Forging and Hot Pressing,» *ASM Handbook, Volume 7:*, pp. 623-637, 1998.
- [11] P. Naresh y V. Madhava, «Design and Analysis of a Hot Forging Dies,» *International Journal of Engineering Trends*, 2016.
- [12] M. Greger, Forging, Ostrava: Technical University of Ostrava, 2014.
- [13] A. Contreras Hernández, Optimización del proceso de forja abierta para evitar defectos internos, Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2013.

-
- [14] G. Bavaresco, «Mecanizado,» [En línea]. Available: <https://docplayer.es/19882723-Mecanizado-ing-guillermo-bavaresco.html>. [Último acceso: 12 Junio 2022].
- [15] M. Estrems, «Principios de Mecanizado y Planificación de procesos,» Cartagena, 2007.
- [16] A. Pernía, J. Blanco, J. Sierra y J. C. Azofra, «Prácticas de mecanizado en torno y fresadora,» Rioja, Universidad de la Rioja, 2018.
- [17] G. Bavaresco, «Fresadora,» [En línea]. Available: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-agraria-la-molina/resistencia-de-materiales/pffresadora-apuntes-1/2782476>. [Último acceso: 18 Abril 2022].
- [18] R. Castañeda, Caracterización y análisis de rodillos de laminación en caliente y en frío, San Nicolás de los Garzas, 1999.
- [19] PROFIROLL, «Laminación de Roscas y Perfiles,» [En línea]. Available: <https://www.profiroll.com/es/proceso/laminacion-de-roscas.html>. [Último acceso: 1 Octubre 2022].
- [20] ITEA, «Acero inoxidable,» [En línea]. Available: http://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metallica/bibliografia_documentacion/itea/TOMO22.pdf. [Último acceso: 7 Mayo 2022].
- [21] INDURA , Manual de aceros inoxidables, Cerrillos , 2010.
- [22] A. Padihla, R. Plaut y R. Paulo, «Stainless Steel Heat Treatment,» pp. 695-734.
- [23] Facultad Regional Rosario , «Tratamientos térmicos de los aceros inoxidables,» [En línea]. Available: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/16-TT_aceros_inoxidables_v2.pdf. [Último acceso: 10 Agosto 2022].
- [24] J. Medrano, MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS JUNTAS SOLDADAS DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS MEDIANTE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS, Quito: Escuela Politécnica Nacional , 2006.
- [25] J. P. Velásquez, ESTUDIO DE LA PRECIPITACION DE CARBUROS EN EL ACERO INOXIDABLE AISI 304 EN ENFRIAMIENTO CONTINUO, Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León, 1996.

-
- [26] Á. Forero Mora, «Corrosión intergranular en aceros inoxidables,» [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902515.pdf>. [Último acceso: 6 Mayo 2022].
- [27] ASM, Atlas of microstructures of industrial alloys.
- [28] ASM, Metallography and Microstructures.
- [29] T. Sourmail y C. Too, Sensitisation and Evolution of Chromium-depleted Zones in Fe-Cr-Ni-C Systems, Cambridge, 2003.
- [30] Y. Liang, Carbide dissolution and austenite grain growth behavior of a new ultrahigh-strength stainless steel, 2020.
- [31] K. Nakazawa, Effects of Carbide Dissolution in Austenization on the Behavior in Transformation of 13 Cr Stainless Steel.
- [32] L. X. Ming, SECONDARY CARBIDE DISSOLUTION AND COARSENING IN 13% Cr MARTENSITIC STAINLESS STEEL DURING AUSTENITIZING, Boston, 2012.
- [33] M. Caldera y J. Sikora, Características y disolución de carburos en fundiciones esferoidales aleadas de espesores variables, Mar del Plata, 2004.
- [34] S. R. S. Muhamad Syazwan Sanusi, Electrochemical Corrosion Behaviours of AISI 304 Austenitic Stainless Steel in 3.5 wt. % NaCl Solutions at Different pH, Kuala Lumpur, 2018.
- [35] M. Saadawy, Kinetics of Pitting Dissolution of Austenitic Stainless Steel 304 in Sodium Chloride Solution, Ibrahimia, 2012.
- [36] C. España, C. Cocuy y A. Vargas, Estudio del comportamiento mecánico y frente a la corrosión bajo tensión de acero inoxidable AISI 304 sometido a laminación, Cali, 2008.
- [37] J. Tortosa, A. Sánchez y A. Sánchez, Influencia del grado de deformación en frío en el tamaño de grano y en la resistencia a la corrosión del acero F-1110, Jaén.
- [38] Escuela de Herreros Toledo-Ramón, «Carta de temperaturas,» [En línea]. Available: <https://ramonrecuero.jimdo.com/%C3%BAltimos-v%C3%ADdeos-editados/futuros-maestros/carta-de-temperaturas/>. [Último acceso: 6 Agosto 2022].
- [39] «Forja: Color y temperaturas,» 7 Agosto 2009. [En línea]. Available: <http://www.eki.es/blog/forja-58-color-y-temperaturas/>. [Último acceso: 5 Julio 2022].