

Desarrollo controles para el uso de materiales con variación en las características idóneas para el trefilado de alambre

Flores Gaspar, Miguel Ángel

2021

<https://hdl.handle.net/20.500.11777/4971>

<http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf>

UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA PUEBLA

Estudios con Reconocimiento de Validez Oficial por Decreto

Presidencial del 3 de abril de 1981



DESARROLLO CONTROLES PARA EL USO DE MATERIALES CON VARIACIÓN EN LAS CARACTERÍSTICAS IDONEAS PARA EL TREFILADO DE ALAMBRE

DIRECTOR:

DR. JUAN CARLOS CISNEROS ORTEGA

CODIRECTOR:

DR. DANIEL SOLA MARTÍNEZ

ELABORACIÓN DE TESIS

que para obtener el Grado de:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN MANUFACTURA AVANZADA

PRESENTA:

MIGUEL ANGEL FLORES GASPAR

Este trabajo está dedicado a aquel que me demostró que el amor a la familia, el trabajo duro, el estudio y la determinación es el mejor patrimonio que se le puede dar a un Hijo.

Donde quiera que estés, gracias, Papá (QEPD).

Agradecimientos:

Agradezco primeramente a mis Asesores de este trabajo el Dr. Juan Carlos Cisneros Ortega, Profesor del Departamento de Ingenierías de la Universidad Iberoamericana Puebla y al Dr. Daniel Sola ARAID Senior Researcher del Dpto. Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura-EINA de la Universidad de Zaragoza. Muchas gracias por su invaluable guía, interés, conocimiento y tiempo dedicado para que este trabajo pudiera ser terminado de la mejor forma.

Agradezco a mi Coordinador de Maestría el Dr. Raul Ruan por su incansable interés, paciencia y guía, quien desde la entrevista inicial cuando solicité el ingreso, mostro un profesionalismo que siempre agradeceré y que es un ejemplo para seguir.

Agradezco en lo general a la Universidad Iberoamericana por todas las facilidades proporcionadas aun en estos tiempos difíciles.

Por otro lado, agradezco el apoyo y facilidades que se me han otorgado en mi compañía TIM, las cuales han contribuido enormemente en lograr llegar hasta este punto.

En lo particular agradezco a mi Director el Ing. Sergio Ramos Vázquez y a mi Subdirector Ing. Luis Edmundo Pimentel Gonzalez por su particular seguimiento y apoyo incansable. Gracias a ambos.

Finalmente, y no menos importante agradezco el apoyo económico que ha proporcionado el CONACYT a través de su beca sin el cual me hubiera sido muy complicado haber logrado estudiar esta maestría. Solo anhelo que la Ciencia siga siendo eso, Ciencia y no otro medio para hacer Política.

RESUMEN

La materia prima que se requiere en el proceso de alambre inoxidable, a pesar de estar dentro de las tolerancias que marcan las normas, presentan variaciones que afectan la capacidad de trefilado. Adicionalmente, el material sufre contaminaciones y daños durante el transporte que deben ser corregidos antes de usar el material.

El presente trabajo tiene como objetivo el crear una metodología que permita administrar correctamente dichas variaciones de forma que puedan ser consideradas y en su caso corregidas cuando sea posible antes de ingresar al proceso.

La metodología usada es DMAIC por sus siglas en inglés (define, measure, analyze, improve, and control) comenzando desde la inspección recibo donde mediante análisis y pruebas se define las condiciones que presenta el materia, el almacenamiento y administración de la información mediante una hoja de cálculo diseñada específicamente con este fin, aplicación de procesos sencillos que permitan corregir o al menos mejorar algunas de las condiciones en las que puede llegar el material y controlar algunas variables de proceso para permitir procesar este tipo de materiales.

Esta metodología ha permitido comenzar a administrar los materiales para tomar decisiones con respecto al uso. Además, se ha comenzado a recolectar los datos necesarios para definir tendencias y correlaciones futuras.

Por otro lado, también surge la necesidad de actualizar el equipo para inspeccionar las pruebas mecánicas de la materia prima y la propuesta para invertir en equipos de proceso que permitan hacer una preparación en línea de la materia prima.

Tabla de Contenido

RESUMEN.....	4
1. INTRODUCCION.....	7
1.1. Grupo NOVAMETAL	7
1.2. Antecedentes.....	7
1.3. Planteamiento y Delimitación del Problema.....	8
1.4. Objetivo General	8
1.4.1. Objetivos Específicos.....	8
1.5. Justificación.....	8
2. MARCO TEORICO	9
2.1. El Acero Inoxidable y su Historia	9
2.2. Designación y Clasificación de los Aceros Inoxidables	12
2.2.1. Designación de los Aceros Inoxidables.....	12
2.2.2. Clasificación de los Aceros Inoxidables	13
2.2.2.1. Aceros Inoxidables Martensíticos.....	14
2.2.2.2. Aceros Inoxidables Ferríticos.....	16
2.2.2.3. Aceros Inoxidables Austeníticos.....	18
2.2.2.4. Aceros Inoxidables Dúplex	20
2.2.2.5. Aceros Inoxidables Endurecibles por Precipitación	21
2.3. Procesos de Fabricación de Los Aceros Inoxidables.....	22
2.3.1. Formado.....	22
2.3.2. Forjado	23
2.3.3. Trabajo en Frío	24
2.3.4. Maquinado.....	25
2.3.5. Tratamientos Térmicos	27
2.3.6. Procesos de Unión	30
2.4. Trefilado de Alambre	31
2.4.1. Características del Trefilado.....	31
2.4.2. El Proceso de Trefilado.....	32
2.4.3. Equipo para Trefilado.....	32
2.5. Normas, Especificaciones y Estándares para el Acero Inoxidable en Alambrón.....	32
3. DESARROLLO.....	34
3.1. Metodología.....	34

3.2.	Inspección de la Materia Prima.....	35
3.2.1.	Análisis Dimensional	36
3.2.2.	Pruebas Mecánicas	38
3.2.3.	Análisis Químico.....	38
3.2.4.	Análisis Superficial.....	39
3.2.5.	Revisión de contaminantes	39
3.3.	Almacenamiento de Registros de Inspección.....	40
3.4.	Consulta de Datos Almacenados.....	41
3.5.	Factores de Decisión para el Uso de los Materiales	42
3.5.1.	Basados en Las Dimensiones.....	42
3.5.2.	Basados en las Propiedades Mecánicas Determinadas	43
3.5.3.	Resumen de la Composición Química	43
3.5.4.	Basados en la Calidad Superficial y los Contaminantes	44
3.6.	Rutas de Proceso Complementarias y Alternativas.....	45
3.7.	Documentos del SGC Relacionados.....	46
4.	CONCLUSIONES.....	47
5.	PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES	48
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
7.	PROJECT CHARTER	52

1. INTRODUCCION

1.1. Grupo Novametal

Trefilados Inoxidables de México (TIM) pertenece al Grupo NOVAMETAL con sede en Suiza el cual cuenta con fábricas alrededor del mundo y es un grupo especializado en Acero Inoxidable, Aluminio y Alambres de Aleación de Níquel que comercia sus productos en todo el mundo.

TIM es el fabricante nacional líder en el mercado del alambre de acero inoxidable, aluminio, aleaciones de níquel y soldaduras especiales, además de ser el único fabricante en México de barras de acero inoxidable, que cuenta con la más alta tecnología para el rectificado de barras.

Siempre está en la búsqueda de la innovación a nivel de producto y servicio. Esto se realiza al integrar sistemas de fabricación, verificación, documentación y análisis que permitan generar entregas a tiempo con un producto bajo las normas internacionales. ^[1]

El acero en el mundo

El acero inoxidable y aleaciones de níquel están presentes en nuestra vida diaria, desde el uso de un clavo hasta el más grande y sofisticado equipo, los cuales son utilizados en muchas industrias. ^[1]

Las características principales de nuestros productos fabricados en acero inoxidable son: Calidad, Resistencia a la Corrosión, Resistencia Mecánica, Belleza del Material y larga vida del producto con un bajo costo de mantenimiento. ^[1]

1.2. Antecedentes

El uso de materia prima diferente a la que proviene del molino de acero de nuestro Corporativo se ha venido realizando mediante prueba y error sin tener control sobre las características que pueden afectar el proceso de trefilado.

Hasta ahora el uso de este tipo de materiales había sido esporádico y por lo general se usa material de muy buena calidad. Sin embargo, la oferta de costos bajos de proveedores extranjeros en productos similares a los nuestros en los mercados, ha llevado a la Dirección de la Compañía a establecer la estrategia de usar proveedurías de materia prima con costos más económicos y muchas veces con menor calidad.

Esta estrategia comercial tendrá un impacto significativo en la capacidad productiva y en los niveles de calidad si el uso de dichos materiales se realiza sin los controles y procesos adecuados.

El impacto podría extenderse a nuestros Clientes al afectar los tiempos de entrega y posibles errores en la fabricación.

1.3. Planteamiento y Delimitación del Problema

El comportamiento del alambroón de acero inoxidable durante el proceso de trefilado responde a variables del producto y del proceso.

Al cambiar las condiciones del producto entrante o materia prima (alambroón recocido y decapado en este caso) se deben ajustar las condiciones del proceso en las cuales dicho material se debe transformar.

La materia prima (alambroón) de Proveedores con precios más competitivos presentan una variación más pronunciada en las características químicas, físicas y superficiales que dificultan o incluso imposibilitan la fabricación de alambre.

Muchas de las veces los materiales deberán ser seleccionados dependiendo de sus características físicas, químicas y mecánicas; para algún proceso o producto específico.

Dicha selección deberá ser realizada de forma metódica basada en la identificación, medición y clasificación de sus propiedades o características incluso si están dentro de la especificación que marcan las normas correspondientes.

Actualmente no se cuenta con un sistema que ayude a realizar el proceso desde la inspección recibo hasta la asignación de los materiales a los productos y procesos adecuados para algún material en específico.

1.4. Objetivo General

Determinar la forma de utilizar materias primas con propiedades que afectan la variabilidad de proceso de trefilado de alambre.

1.4.1. Objetivos Específicos

1. Desarrollar una metodología que permita asignar la materia prima (alambroón) a los diferentes procesos desde la Inspección-Recibo, basándose en las propiedades químicas, físicas y mecánicas.
2. Establecer operaciones complementarias que ayuden al procesamiento de estos materiales.
3. Actualizar los documentos de proceso y Sistema de Gestión de Calidad para que incluyan los cambios necesarios para llevar a cabo esta metodología.
4. Utilizar materiales de menor costo que impacten el beneficio económico de la operación.

1.5. Justificación

El costo actual de las materias primas en conjunto con la oferta de productos competitivos por fabricantes extranjeros ha llevado a utilizar con mayor frecuencia materiales de fuentes diversas que presentan variaciones en sus propiedades. Estas variaciones afectan el proceso de trefilar alambre.

2. MARCO TEORICO

2.1. El Acero Inoxidable y su Historia

Aleación con mínimo de 10-12% de Cromo y otros metales.^[2]



Figura 1. El elemento Cr (cromo) base del acero inoxidable ^[3]

En metalurgia, el acero inoxidable se define como una aleación de acero (con un mínimo del 10 % al 12 % de cromo contenido en masa). También puede contener otros metales, como por ejemplo molibdeno, níquel y wolframio.^[2]

El acero inoxidable es un acero de elevada resistencia a la corrosión, dado que el cromo u otros metales aleantes que contiene, poseen gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro (los metales puramente inoxidables, que no reaccionan con oxígeno son oro y platino, y de menor pureza se llaman resistentes a la corrosión, como los que contienen fósforo). Sin embargo, esta capa puede ser afectada por algunos ácidos, dando lugar a que el hierro sea atacado y oxidado por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos aleantes; los principales son el níquel y el molibdeno.^[2]

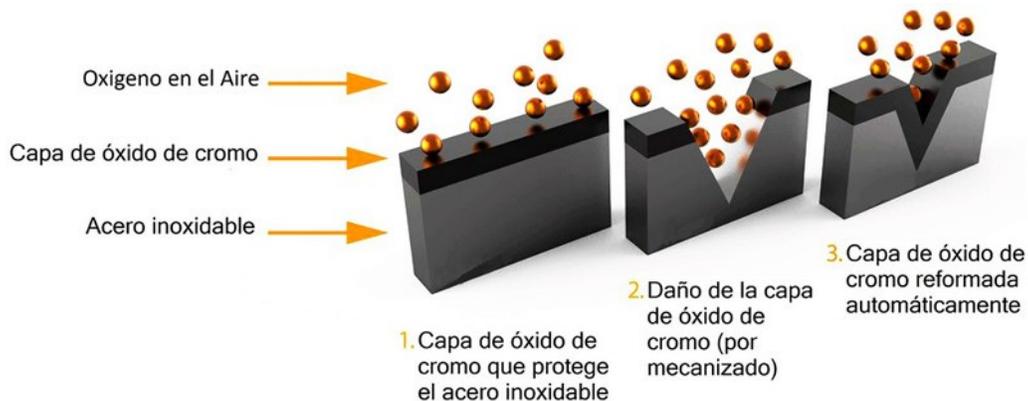


Figura 2. Capa pasivada del acero inoxidable ^[4]

Historia

Muchos países han buscado ser etiquetados como el “inventor” del acero inoxidable; Gran Bretaña, Alemania, Francia, Polonia, Estados Unidos y Suecia.^[5]

Todo comenzó en el año de 1820 por los ingleses Stoddard y Farraday y el francés Pierre Berthier en 1821. Estos científicos señalaron que las aleaciones de hierro-cromo demostraban ser más resistentes a los ataques de ciertos ácidos, pero los intentos para producir aleaciones de cromo superiores no tuvieron éxito gran debido a que los científicos no habían entendido la importancia del bajo carbono.^[5]

Otros científicos ingleses, Woods y Clark, presentaron en 1872 lo que hoy pudiera ser la primera patente de una aleación resistente al ácido y al medio ambiente con un contenido de cromo de 30-35% y 2% de tungsteno.^[6]

El francés, Brustlein, destacó la importancia del bajo contenido de carbono en la fabricación exitosa de lo que hoy conocemos como acero inoxidable: Estableció que, para crear una aleación con alto porcentaje de cromo, el contenido de carbono debía permanecer por debajo del 0.15%.^[6]

El alemán, Hans Goldschmidt desarrolló en 1895 el proceso de reducción aluminotérmica para producir cromo libre de carbono. Este descubrimiento, junto con otros factores, permitió que el acero inoxidable se volviera una realidad.^[6]

Ya en el siglo XX, el científico francés Leon Guillet realizó en 1904 investigaciones amplias sobre aleaciones de hierro-cromo. Su trabajo incluyó el estudio de las composiciones de lo que hoy conocemos como los martensíticos tipo 410, 420 y 442. En 1906 se adentró en el análisis de aleaciones de hierro-níquel-cromo, lo que hoy se considera las bases de la serie 300 (austeníticos).^[6]

Para 1909 el inglés Giesen publica un trabajo con respecto a los aceros cromo-níquel, al mismo tiempo el francés Portevin desarrollaría lo que ahora es considerado el acero inoxidable tipo 430.^[5]

Pero fue hasta 1911 que los alemanes P. Monnartz y W. Borchers dan a conocer el descubrimiento de la correlación entre el contenido de cromo y la resistencia a la corrosión, indicando que había un aumento significativo en la resistencia a la corrosión cuando en la aleación se contenía al menos 10.5% de Cromo. Estos dos científicos desarrollan y publican trabajos con gran detalle sobre el efecto del molibdeno en la resistencia de la corrosión.^[5]

El inglés Harry Brearley buscó cómo prolongar la vida de los aceros de los cañones de guerra ya que se corroían rápidamente y empezó a experimentar con aleaciones que contenían cromo con rangos del 6 al 15%. Un año después, creó un acero que contenía 12.8% de cromo y 0.24% de carbono, logrando la primera colada comercial de acero inoxidable que desarrolló aleaciones hierro-cromo extremadamente duraderas (martensíticos).^[6]

Brearley había decidido inicialmente nombrar su invento como “Rustles Steel” pero Stuart, quien lo ayudo a perfeccionar el endurecimiento del acero inoxidable para cuchillería, lo bautizó como “Stainless Steel” y es así es como quedo nombrado este acero, quedando finamente llamado Acero Inoxidable (Stainless Steel).^[5]

En 1908 Krupp Iron entra al debate por poseer el título de ser los primeros en desarrollar el acero inoxidable, producen un acero cromo-níquel para un casco de una embarcación. Se trataba de un yate conocido como el Half Moon, actualmente se encuentra en el fondo del mar frente a la costa este de Florida, este acero contenía un mínimo de 10.5% de cromo, la empresa Krupp, de la mano de Eduard Maurer y Benno Strauss también trabajaron desde 1912-1914 en el desarrollo de los aceros hoy conocidos como aceros inoxidables austeníticos utilizando <1% de carbono, <20% de níquel y 15 a 40% de cromo. ^[5]

Europa inicialmente quiere acaparar la gloria del descubrimiento del acero inoxidable, pero los Estados Unidos no querían quedarse atrás, siendo ahora Elwood Haynes quien después de haber inventado la navaja de afeitar argumentó haber sido el primero en descubrir el acero inoxidable en el año de 1911. En la historia del acero inoxidable también se mencionan a otros dos estadounidenses, Becket y Dantszen, quienes trabajaron en el desarrollo de aceros inoxidables Ferríticos, los cuales contenían 14-16% de cromo y 0.07 – 0.15% de carbono durante los años de 1911 a 1914. ^[5]

En el año de 1912 cuando se corre el rumor de que en Polonia se había creado el primer acero inoxidable creado por Max Mauermann, quien se presentó al público reclamando este título durante una exposición en Viena en 1913. ^[5]

Pero en 1913 se descubre un artículo en una revista de caza y pesca en Suecia, donde se habla de un acero utilizado para la fabricación de cañones. Aunque es pura especulación, los suecos hacen un reclamo audaz mencionando que ellos eran de hecho, los responsables de la primera aplicación práctica para el acero inoxidable. ^[5]

Con ello concluye el descubrimiento caótico del acero inoxidable, aunque hay mucho misterio y especulaciones detrás del descubrimiento de este acero maravilloso, no queda la menor duda de que sin el esfuerzo combinado de todos los científicos anteriores, metalurgistas y muchos más que no se mencionan no tendríamos un acero rico por sus propiedades y versátil como lo es el acero inoxidable que hoy en día tenemos a nuestro alcance. ^[5]

2.2. Designación y Clasificación de los Aceros Inoxidables

2.2.1. Designación de los Aceros Inoxidables

En los Estados Unidos, los grados de acero inoxidable forjados son designados generalmente por el sistema de numeración de la *American Iron and Steel Institute (AISI)*, el *Sistema Unificado de Numeración (UNS)* o el nombre propio de la aleación de acero. En resumen, los sistemas de designación han sido establecidos por la mayor parte de las naciones industrializadas. [7]

De los dos sistemas de numeración institucional usados en Estados Unidos, el sistema AISI es el más antiguo y es el más ampliamente usado. La mayor parte de los grados de acero tienen una designación de tres dígitos; las Series 200 y 300 son generalmente aceros inoxidables austeníticos, mientras que la Serie 400 contiene ambos ferríticos y martensíticos. Algunos de los grados tienen una o dos letras como sufijo que indica alguna modificación particular en la composición. [7]

Sin embargo, el Sistema Unificado de Numeración para Metales y Aleaciones (UNS) proporciona un medio para correlacionar muchos sistemas de numeración de metales y aleaciones de uso internacional administrados por sociedades, asociaciones comerciales y usuarios individuales y productores de metales y aleaciones. Desarrollado conjuntamente por SAE International y la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM), proporciona la uniformidad necesaria para una indexación, mantenimiento de registros, almacenamiento y recuperación de datos y referencias cruzadas eficientes. [8]

Existen diferentes designaciones en los aceros ya que algunos países desarrollaron sus propios sistemas y estándares (p.e DIN en Alemania, JIS en Japón, BS en Inglaterra o el GB en China). Incluso hay designaciones regionales (principalmente Europa con su sistema EU o EN del cual derivan algunos por países como la UNE de España) y actualmente se trata de llegar a algún consenso de designación a nivel mundial (o al menos poder identificar las equivalencias entre ellos) mediante la *International Standard Association (ISO)*. [9]

STEEL Worldwide Equivalent Grades	
Austria (ONORM, ON)	International (ISO)
Belgium (NBN)	Italy (UNI)
Canada (CSA)	Norway (NS)
China (GB)	Poland (PN)
Czechia (CSN)	Portugal (NP)
England (BS)	Russia (GOST)
European old (EU, EN)	Spain (UNE)
Finland (SFS)	Sweden (SS)
France (AFNOR NF)	USA (AISI, ASTM, UNS)
Germany (DIN, WNr)	Japan (JIS)
India (IS)	

Figura 3. Designaciones de aceros a nivel mundial [9]

2.2.2. Clasificación de los Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables pueden ser divididos en cinco familias. Cuatro de ellas están basadas en las características de la estructura/microestructura cristalina de las aleaciones en la familia. La quinta familia está basada en el tipo de tratamiento térmico usado, más que en la microestructura.

- Aceros Inoxidables Martensíticos
- Aceros Inoxidables Ferríticos
- Aceros Inoxidables Austeníticos
- Aceros Dúplex (Austenítico más Ferrítico)
- Aceros Inoxidables Endurecibles por Precipitación. [7]

Esta distribución de las familias metalúrgicas puede ser fácilmente reconocida a través del Diagrama de Schaeffler (Diagrama para aceros muy aleados inoxidables de Cromo y Níquel equivalente, o diagrama de Cr-Ni equivalente). [2]

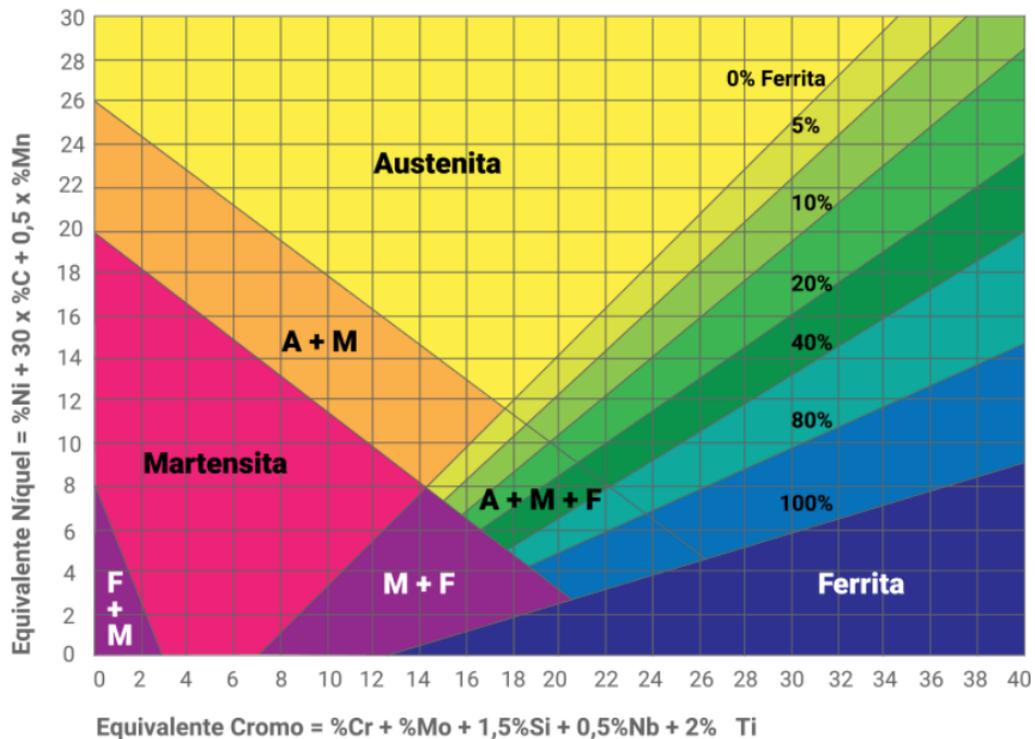
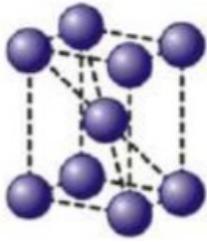


Figura 4. Diagrama de Schaeffler [10]

2.2.2.1. Aceros Inoxidables Martensíticos

Características y Composiciones



Los aceros Martensíticos son esencialmente aleaciones Fe-Cr que poseen una estructura cristalina con un cuerpo central tetragonal (BCT) en la condición endurecida. Son ferromagnéticos, endurecibles por tratamiento térmico y generalmente resistentes a la corrosión solo en ambientes relativamente suaves. El contenido de cromo esta generalmente en el rango de 10.5 a 18% y el contenido de carbón no podrá exceder a 1.2%. El balance entre el contenido de cromo y de carbón aseguran la estructura martensítica.

Pueden ser agregados elementos como el niobio, silicio, wolframio (tungsteno) o vanadio para modificar la respuesta al templado después del endurecimiento. Se pueden agregar pequeñas cantidades de níquel para mejorar la resistencia a la corrosión y mejorar la tenacidad. Se agrega azufre y selenio en algunos grados para mejorar la maquinabilidad. [7]

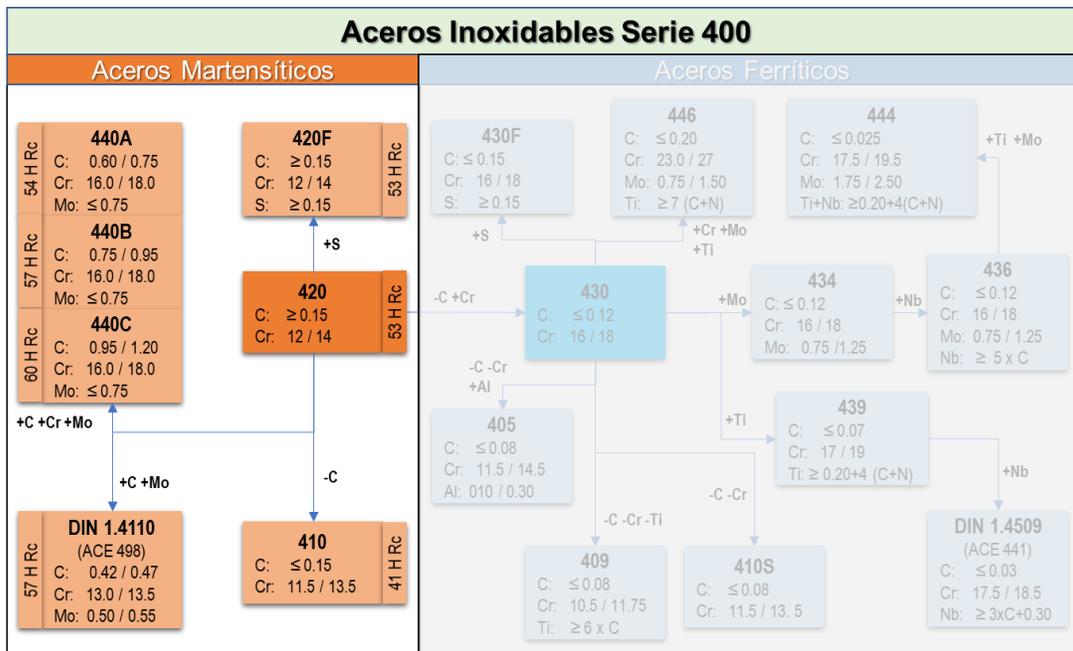


Figura 5. Aceros Martensíticos [11]

Propiedades

La aleación más comúnmente usada en la familia de los aceros inoxidables martensíticos es el tipo 410, la cual contiene aproximadamente 12% en peso de Cr y 0.1% en peso de C para proveer la resistencia. El nivel de carbón y consecuentemente el incremento en la resistencia se encuentra en las aleaciones 420, 440A, 440B y 440C. Las últimas tres aleaciones en particular tienen un incremento en el nivel de cromo con la intención de mantener la resistencia a la corrosión. Puede agregarse molibdeno para mejorar las propiedades mecánicas o la resistencia a la corrosión como en el tipo de acero inoxidable 422. Se puede agregar níquel con las mismas razones en los tipos 414 y 431. Cuando se usan niveles más altos de cromo para mejorar la resistencia a la corrosión, el níquel también sirve para mantener la microestructura deseada y prevenir una cantidad excesiva de ferrita libre. Las limitaciones requeridas en los contenidos de

las aleaciones para mantener completamente la estructura martensítica restringen la resistencia a la corrosión obtenida a niveles moderados. [7]

Los aceros martensíticos en la condición recocida tienen una resistencia a la cedencia de aproximadamente 275 MPa (40 ksi) y pueden ser endurecidos moderadamente por trabajo mecánico. Sin embargo, las aleaciones martensíticas son típicamente tratadas térmicamente mediante temple y revenido para alcanzar niveles de resistencia a la cedencia de hasta 1900MPa (275 ksi) dependiendo principalmente del contenido de carbón. Estas aleaciones tienen buenas propiedades de ductilidad y tenacidad, las cuales disminuyen conforme aumenta la resistencia. Dependiendo del tratamiento térmico, la dureza puede alcanzar valores dentro del rango de 150 HB (80 HRB) para materiales en la condición de recocido y valores tan altos como 600 HB (58HRC) para materiales completamente endurecidos. [7]

Aplicaciones

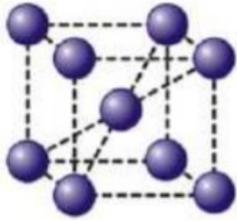
Los aceros inoxidables martensíticos se especifican cuando la aplicación requiere buenas propiedades de resistencia a la tracción, fluencia y resistencia a la fatiga, en combinación con una resistencia moderada a la corrosión y una resistencia al calor de hasta 650°C (1200°F). En los Estados Unidos los aceros martensíticos de bajo y medio carbono (por ejemplo, el tipo 410 y algunas versiones modificadas de este) se han utilizado principalmente en turbinas de vapor, motores a reacción y turbinas de gas. En Europa la aleación HT9 (12Cr-1Mo-0.3V) se ha utilizado ampliamente en aplicaciones de contención de presión y temperaturas elevadas, incluidas las turbinas de vapor, el recalentador y sobrecalentador de vapor del generador de vapor utilizados en centrales eléctricas de combustibles fósiles. El tipo 420 y aleaciones similares se utiliza en cubiertos, piezas de válvulas, engranajes, ejes y rodillos. Otras aplicaciones para grados de mayor nivel de carbono (grados 440) incluyen cubiertos, instrumentos quirúrgicos y dentales, tijeras, resortes, válvulas, engranajes, ejes, levas y rodamientos de bolas. [7]



Figura 6. Aplicaciones de los aceros Martensíticos. De derecha a izquierda: Turbinas de vapor para la generación eléctrica [12], cubiertos de acero inoxidable [13], válvulas automotrices de acero inoxidable [14], instrumentos quirúrgicos [15], rodamientos [16], engranes [17]

2.2.2.2. Aceros Inoxidables Ferríticos

Características y Composiciones.



Los aceros inoxidables ferríticos son esencialmente aleaciones de hierro-cromo con estructuras cristalinas cúbicas centradas en el cuerpo (BCC). El contenido de cromo suele estar en el rango de 11 a 30%. Algunos grados pueden contener molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio para conferir características particulares. Se puede agregar azufre o selenio para mejorar la maquinabilidad. Las aleaciones ferríticas son ferromagnéticas. Pueden tener buena ductilidad y conformabilidad, pero a alta temperatura la resistencia es relativamente pobre en comparación a los de los grados austeníticos. La tenacidad puede ser algo limitada a bajas temperaturas en secciones pesadas. A diferencia de los aceros inoxidables martensíticos, los aceros inoxidables ferríticos no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. También, estos aceros inoxidables no suelen ser endurecidos por trabajo en frío debido a que tienen factores de endurecimiento por deformación de la ferrita relativamente bajos y el trabajo en frío reduce significativamente su ductilidad. [7]

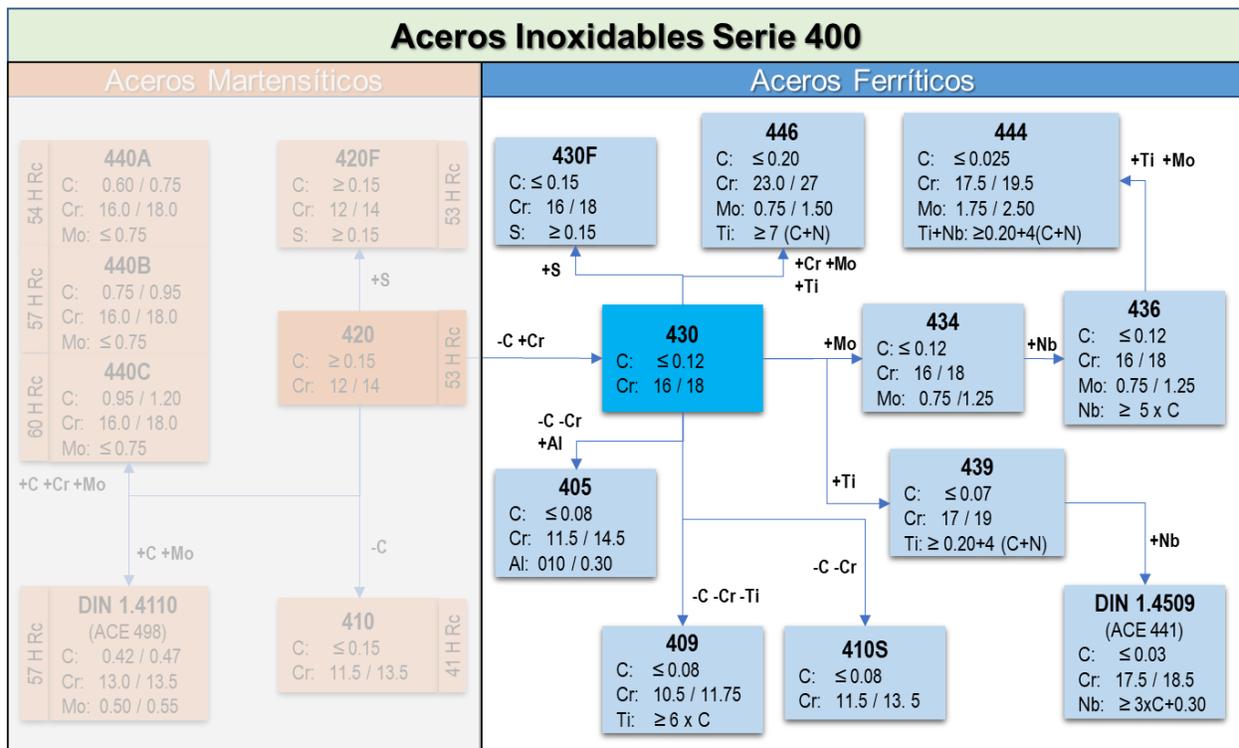


Figura 7. Aceros Ferríticos [11]

Propiedades

Los valores típicos de resistencia al límite de cedencia y resistencia a la tracción en los aceros inoxidables ferríticos son de 35 a 55 ksi (240 a 380 MPa) y 60 a 85 ksi (415 a 585 MPa), respectivamente. Las ductilidades tienden a oscilar entre el 20 y el 35%. Se obtienen resistencias

superiores hasta 75 ksi (515 MPa) para límite elástico y 95 ksi (655 MPa) para fuerza a la tracción en los aceros superferríticos más altamente aleados. Mientras que los aceros inoxidables martensíticos ofrecen resistencia a la corrosión moderada, la de los aceros inoxidables ferríticos pueden variar desde moderados para las aleaciones de bajo a medio contenido de cromo, hasta sobresaliente para los superferríticos como el tipo 444 y UNS No. S44627, S44635, S44660, S44700 y S44800. Las aleaciones con bajo contenido de cromo (11%) como son los tipos 405 y 409, tienen una corrosión y resistencia a la oxidación aceptable; además, buena capacidad de ser fabricados a bajo costo. El acero inoxidable ferrítico tipo 409 es el más extensamente usado y ha ganado una amplia aceptación para uso en sistemas de escape en automóviles. Las aleaciones intermedias de cromo (16 a 18%) incluyendo el tipo 430 resisten la oxidación leve a ácidos y ácidos orgánicos y se utilizan en equipo para la manipulación de alimentos; el acero tipo 434 el cual incluye una adición de molibdeno para mejorar la resistencia a la corrosión, se utiliza para molduras y tren motriz de automóviles. Las aleaciones con alto contenido de cromo (19 a 30%) entre las que están los tipos 442 y 446 así como los superferríticos, se utilizan para aplicaciones que requieren un alto nivel de resistencia a la corrosión y a la oxidación. Además, es posible producir grados con contenidos inusualmente altos de cromo y molibdeno (hasta 4.5%) con muy bajo contenido de carbono (tan bajo como 0,01%), controlando el contenido de los elementos intersticiales mediante proceso de descarburación con argón y oxígeno (AOD).^[7]

Aplicaciones

Estos aceros inoxidables superferríticos altamente aleados ofrecen una resistencia excepcional a la corrosión localizada inducida por la exposición a cloruros acuosos. La corrosión localizada como picaduras, corrosión por grietas, y el agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) son problemas que plagan muchos aceros inoxidables austeníticos. Por lo tanto, los aceros inoxidables superferríticos se utilizan a menudo en intercambiadores de calor y sistemas de tuberías para cloruros soluciones acuosas y agua de mar.^[7]



Figura 8. Aplicaciones de los aceros Ferríticos. De derecha a izquierda: intercambiadores de calor tubulares^[18] y tuberías en acero inoxidable^[19]

2.2.2.3. Aceros Inoxidables Austeníticos

Características y Composiciones

Los aceros inoxidables Austeníticos constituyen la familia más grande en términos de número de aleaciones y uso. De la misma forma que las aleaciones ferríticas, estos aceros no se pueden endurecer por tratamiento térmico; sin embargo, su similitud termina ahí. Los aceros inoxidables austeníticos son esencialmente no magnéticos en el estado recocido y solo puede endurecerse mediante trabajo en frío. Usualmente poseen excelentes propiedades criogénicas, buena resistencia a altas temperaturas y resistencia a la oxidación. El contenido de cromo generalmente varía del 16 al 26%, el contenido de níquel es menor o igual a casi 35% y contenido de manganeso es menor o igual al 15%. Los aceros de la serie 200 contienen nitrógeno, manganeso del 4% a 15% y un menor contenido de níquel (hasta 7% Ni). Los aceros de la serie 300 contienen mayores cantidades de níquel y hasta 2% Mn. Se pueden agregar molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio para conferir ciertas características como resistencia a las picaduras de haluros o resistencia a la oxidación.^[7]

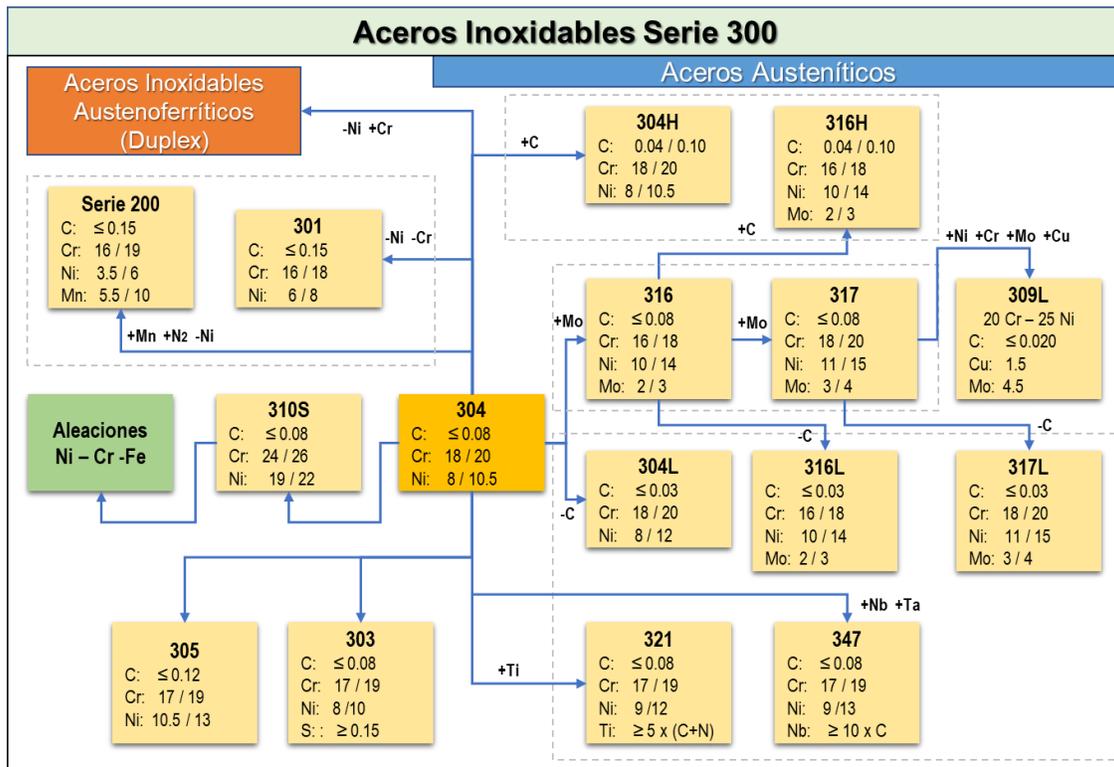


Figura 9. Aceros Austeníticos ^[11]

Propiedades y aplicaciones

Los límites de fluencia de los aceros inoxidables austeníticos al cromo-níquel son bastante modestos y comparables a los de aceros dulces. Las propiedades mecánicas mínimas típicas de un acero recocido de la serie 300 tienen límites elásticos de 205 a 275 MPa (30 a 40 ksi),

resistencias a la tracción máximo de 520 a 760 MPa (75 a 110 ksi) y alargamientos de 40 a 60%. Las aleaciones de la serie 200 en su condición de recocido tienen un mayor límite elástico que van de 345 a 480 MPa (50 a 70 ksi). Se pueden alcanzar resistencias superiores en formas trabajadas en frío, especialmente en alambre trefilado, en el que una resistencia a la tensión de 1200 MPa (175 ksi) o superior es posible. Incluso los aceros inoxidable austeníticos más magros (por ejemplo, los tipos 302 y 304) ofrecen una resistencia general a la corrosión atmosférica, en muchos medios acuosos medios, en presencia de alimentos y en oxidantes ácidos como el ácido nítrico. Los tipos 321 y 347 son esencialmente tipo 304 con adiciones de titanio o niobio respectivamente, que estabilizan carburos contra la sensibilización (fragilidad inducida térmicamente). La adición de molibdeno en los tipos 316/316L proporciona resistencia a las picaduras en ácidos fosfórico y acéticos, soluciones diluidas de cloruro, así como resistencia a la corrosión en ácido sulfuroso. Con un mayor contenido de molibdeno como en el tipo 316L (3%), e incluso las aleaciones más ricas mejoran aún más la resistencia a las picaduras. Se agrega nitrógeno para mejorar la resistencia a temperatura ambiente y especialmente a temperatura criogénica (tipo 304N). También se agrega nitrógeno para reducir la tasa de precipitación del carburo de cromo y, por tanto, la susceptibilidad a la sensibilización. También se agrega al molibdeno – contenido en aleaciones para aumentar la resistencia a la corrosión por picaduras y grietas inducida por cloruros. Son utilizadas cantidades más altas de cromo y / o níquel para mejorar la resistencia a la oxidación a alta temperatura (tipos 309, 310 y 330). Se puede agregar cobre y níquel para mejorar la resistencia a ácidos reductores, como el ácido sulfúrico (tipo 320). Algunas de las aleaciones más resistentes a la corrosión, como como la N08020 (20Cb-3) tienen altos contenidos de níquel tan altos (32 a 37%) como para calificar la clasificación UNS de las aleaciones a base de níquel. Las aleaciones que contienen níquel, molibdeno y nitrógeno (0.15 a 0.25%) a veces se denominan como “*superausteníticos*”. Estas aleaciones se desarrollaron para mejorar la resistencia a la corrosión por cloruros.^[7]



Figura 10. Aplicaciones de los aceros Austeníticos. De derecha a izquierda: mobiliario para cocinas, recipientes para procesamiento industrial de alimentos ^[19], arquitectura ^[20], resortes automotrices ^[21], conexiones hidráulicas y neumáticas ^[22], reforzamiento de paredes en mangueras flexibles ^[23], componentes internos y externos en hornos industriales ^[24]

2.2.2.4. Aceros Inoxidables Dúplex

Características y Composición

Los aceros inoxidables Dúplex son aleaciones bifásicas basadas en el sistema Fe-Cr-Ni. Estos materiales típicamente comprenden proporciones aproximadamente iguales de ferrita y austenita en su microestructura. Se caracterizan por su bajo contenido en carbono ($<0,03\%$) y adiciones de molibdeno, nitrógeno, tungsteno y cobre. Los contenidos típicos de cromo y níquel son del 20 al 30% y del 5 al 8% respectivamente. Las ventajas específicas que ofrecen los aceros inoxidables dúplex sobre los aceros inoxidables de la serie 300 convencionales son mayor resistencia mecánica (aproximadamente dos veces la de los aceros inoxidables austeníticos), tenacidad y ductilidad mejorada (en comparación con los grados ferríticos), resistencia superior a la corrosión por los cloruros y resistencia a las picaduras.^[7]

Propiedades y Aplicaciones

Los aceros inoxidables dúplex son capaces de resistencias a la tracción que van desde 550 a 690 MPa (80 a 100 ksi). Los valores altos de resistencia a la cedencia ofrecen a los diseñadores el uso de un material con pared delgada (lo cual puede llevar a una mayor reducción de peso) con una capacidad de carga y contención de presión adecuada. El alto contenido de aleación y la presencia de una matriz ferrítica hacen que el acero inoxidable dúplex sea susceptible a la fragilidad y la pérdida de resistencia mecánica, particularmente tenacidad, a través de exposiciones prolongadas a temperaturas elevadas. Por esta razón, la temperatura más alta de aplicación es generalmente menor a los 300°C (570°F). De la misma forma que con todos los aceros inoxidables, la composición juega el rol mayor en la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables dúplex. La resistencia a las picaduras es la más fácilmente afectada. Los aceros inoxidables dúplex han encontrado un uso extenso en la industria, particularmente en las áreas de petróleo-gas, petroquímica, y pulpa-papel.^[7]



Figura 11. Aplicación típica de un acero inoxidable Dúplex: cascos de barcos y submarinos ^[25], industria del petróleo y gas ^[26], industrial de pulpa y papel ^[27], petroquímica ^[28]

2.2.2.5. Aceros Inoxidables Endurecibles por Precipitación

Características y Composición

Los aceros inoxidable endurecibles por precipitación (PH) son grados con cromo-níquel que pueden ser endurecidos por el tratamiento térmico de envejecimiento. Estos grados son clasificados como austeníticos (p.e. A-286), semiausteníticos (p.e. 17-7PH) o martensíticos (p.e. 17-4PH). La clasificación es determinada por su microestructura en la solución recocida. Las aleaciones semiausteníticas son tratadas térmicamente en forma subsecuente de forma que la austenita se transforme en martensita. Algunas veces se utiliza el trabajo en frío para facilitar la reacción de envejecimiento. Se usan varios elementos aleantes como el aluminio, el titanio, niobio o el cobre para alcanzar el envejecimiento. [7]

Propiedades y Aplicaciones

De la misma forma que los aceros inoxidable endurecibles martensíticos de la serie 400, las aleaciones PH pueden alcanzar valores altos de resistencia a la tracción hasta 1700 MPa (250 ksi). Realizar trabajo en frío en estos aceros previo al proceso de envejecimiento puede dar como resultado valores incluso más altos de resistencia. Los grados PH tienen generalmente buena ductilidad y tenacidad con resistencia a la corrosión una moderada a buena. Se puede alcanzar una mejor combinación de resistencia mecánica y resistencia a la corrosión que con los aceros martensíticos de la serie 400. Esta mejora en las propiedades esta, relacionada con sus altos contenidos de cromo, níquel y molibdeno, de la misma forma que sus niveles controlados de carbón (0.040% máximo). El contenido bajo de carbón en los aceros inoxidable martensíticos PH es especialmente crítico para la tenacidad y buena ductilidad. La mayor parte de las aplicaciones de los aceros inoxidable PH están en la industria aeroespacial y otras de alta tecnología debido a su mayor resistencia. [7]



Figura 12. Aplicación típica de un acero endurecible por precipitación: cuerpo de aceleración de autos deportivos [29], alabes para motores tipo turbina jet [30]

2.3. Procesos de Fabricación de Los Aceros Inoxidables

La fabricación de piezas y componentes en acero inoxidable difiere de la fabricación de estos en acero al carbón o aceros de baja aleación principalmente porque los aceros inoxidables a) son más fuertes, más duros y dúctiles; b) se endurecen más rápidamente por trabajo mecánico; C) deben presentar generalmente una superficie resistente a la corrosión en el producto final. Estas características dictan el uso de mayor energía, reparación o reemplazo más frecuente del equipo para procesamiento y la aplicación de procedimientos para minimizar o corregir la contaminación de la superficie. [7]

2.3.1. Formado

El método elegido para formar acero inoxidable debe basarse en las características del tipo a utilizar y el espesor de la pieza que se va a formar. Como se indicó anteriormente, los requisitos de energía son más altos para formar aceros inoxidables que para formar aceros al carbono -particularmente los tipos austeníticos, los cuales se endurecen más rápidamente que los tipos ferríticos. Puede ser necesario el precalentamiento para el conformado o inclusive el formado en caliente para espesores que se podrían formar en frío en aceros al carbono. Los aceros inoxidables del tipo austeníticos son más fáciles de formar debido a su alta ductilidad: la lámina de acero inoxidable austenítico puede ser procesada mediante un embutido profundo y deformada severamente sin problema. Los tipos austeníticos 201 y 301 pueden ser formados con estiramiento biaxial superior al 35% porque la transformación parcial a martensita durante la deformación ayuda al metal a resistir el estrechamiento de espesor y la deformación más uniformemente. (La composición podría tener que ajustarse para adaptarse a algún trabajo en particular en donde se requiera una deformación inusualmente severa; además, puede ser necesario realizar una formación lenta para evitar la acumulación de calor y la pérdida del efecto de la martensita). Los aceros de los tipos ferríticos y aleaciones bajas martensíticas también pueden ser ampliamente formado en frío. Sin embargo, son menos dúctiles que tipos austeníticos, y así la formación de estas aleaciones es más limitada; además, es más probable que sea necesario el recocido intermedio. El contenido alto de carbono en los aceros del tipo martensíticos como el 440A, 440B y 440C los hacen tener solamente una conformabilidad en frío limitada. Por otro lado, las resistencias más altas en los aceros inoxidables dúplex en relación con sus contrapartes austeníticas hace necesario unas mayores cargas en operaciones de conformado en frío. Debido a su menor porcentaje de elongación, estos aceros deben ser formados usando radios más grandes comparados con los aceros completamente austeníticos. [7]

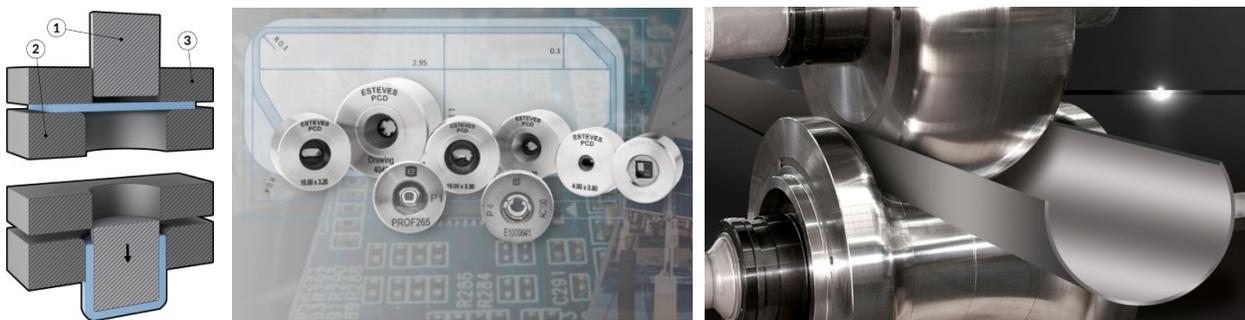


Figura 13. Proceso de formado: embutido profundo [31], dados con forma para extruido en frío [32], de un tubo con costura con proceso de rolado [33]

Las secciones muy conformadas en frío (> 15%) deben recocerse y templarse completamente siempre que la aleación tenga la posibilidad agrietamiento por corrosión debido a la tensión en el entorno de servicio. Los aceros inoxidable generalmente se agrietan más fácilmente que otros aceros; por lo tanto, requieren más atención a la lubricación durante la formación. Los aceites minerales puros raramente proporcionan una lubricación adecuada en los puntos donde ocurre el contacto deslizante durante la formación; en su lugar, se utilizan los lubricantes con aditivos de extrema presión. La contaminación de la superficie del acero durante el formado y la manipulación debe mantenerse al mínimo mediante una limpieza completa del equipo y usando mediante el uso de una lubricación adecuada. Las piezas de acero inoxidable conformadas en frío suelen ser utilizadas en esta misma condición; sin embargo, los tipos austeníticos susceptibles a este proceso de falla deben ser recocidos en solución después de la formación para eliminar las tensiones residuales para aplicaciones en las que el agrietamiento por corrosión bajo tensión pudiera ocurrir. En todas las condiciones de servicio excepto en las menos severas, las piezas formadas en caliente requieren un recocido posterior a la formación para restaurar la resistencia a la corrosión y/o la ductilidad. [7]

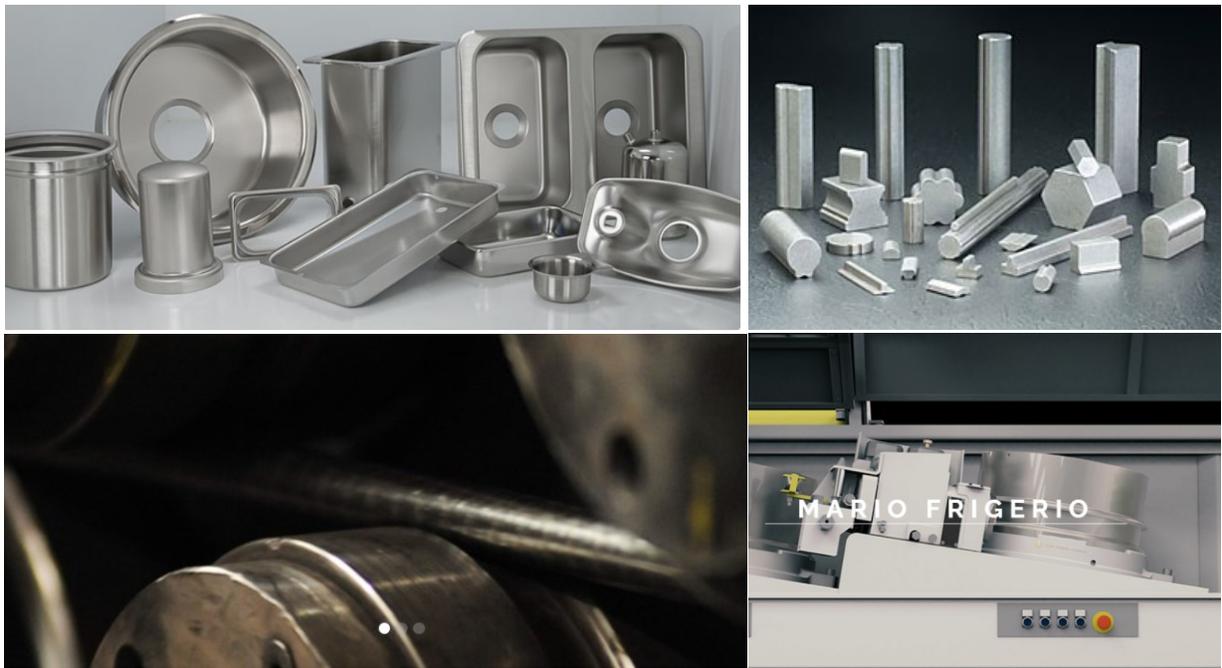


Figura 14. Proceso de formado: partes formadas mediante un embutido profundo e hidro formado [34], perfiles con formas especiales fabricados mediante extruido en frío [35], formado en frío de una barra [36], sección de una máquina para trefilado de alambre [37]

2.3.2. Forjado

Todos los tipos de acero inoxidable estándar pueden forjados. Sin embargo, a medida que aumenta el contenido de aleación en un grupo dado, la forja se vuelve más difícil. Las dificultades de forjado son más comunes al inicio de la forja de lingotes de alta aleación y pueden necesitarse precauciones adicionales para evitar roturas en la superficie. [7]

Temperaturas de trabajo

Se puede usar una amplia gama de temperaturas de forjado para la mayoría de los tipos austeníticos debido a la trabajabilidad natural de austenita y la ausencia de transformación alotrópica (algunos aceros al enfriarlos lentamente adquieren, según la temperatura a la que estén, distintas estructuras en sus redes cristalinas y por consiguiente poseen propiedades distintas). Los tipos convencionales de aceros 18-8 a menudo se forjan a temperaturas de hasta 1260°C (2300°F). Sin embargo, el límite superior de temperatura es menor para los grados de acero con mayor aleación debido a los cambios metalúrgicos que ocurren a temperaturas más altas los cuales pueden causar roturas superficiales. La temperatura máxima es más baja para los tipos 309, 310 y 330. La adherencia a los límites máximos de temperatura es particularmente importante para la rotura de lingotes donde puede ocurrir el desgarre severo a lo largo de los límites del grano en el metal fundido si la temperatura es demasiado alta. La presencia de pequeñas cantidades de ferrita delta pueden dañar la forjabilidad de algunos tipos de aceros austeníticos particularmente en forja estampada en donde algunas de las fuerzas tangenciales de tracción son perpendiculares a la estructura de la ferrita. En los tipos 304, 309, 316, 317 y 321 es especialmente probable que se tengan cantidades significativas de ferrita y puede ser aconsejable limitar el contenido la ferrita de estos grados para aplicaciones severas de forja. La ferrita puede ser particularmente problemática en la descomposición inicial del lingote; puede ser útil un tratamiento de homogeneización aproximadamente a 1150°C (2100°F) para transformar algo de la ferrita delta a austenita antes del calentamiento a la temperatura de forja. [7]

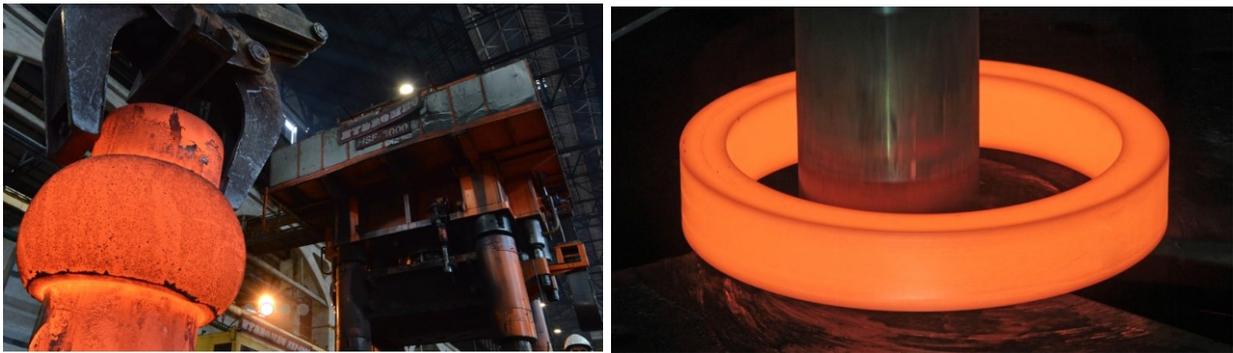


Figura 15. Proceso de forjado: piezas de acero forjadas por impacto [38], anillos de acero forjadas por rolado [39]

2.3.3. Trabajo en Frío

Las operaciones de trabajo en frío que pueden realizarse con éxito en la mayoría de los aceros inoxidable incluyen forja progresiva en frío, estirado en frío, extrusión en frío, y remachado en frío. El trabajo en frío de acero inoxidable es más difícil que el trabajo en frío del acero al carbono debido a las diferencias de resistencia y endurecimiento por trabajo; además, los requisitos de potencia son proporcionalmente mayores. [7]

Forja Progresiva en Frío

Algunos tipos de aceros son mucho más adaptables que otros a la forja progresiva en frío como resultado de las diferencias amplias en capacidades de endurecimiento por trabajo entre aceros inoxidables. Los grados más comúnmente usados para la forja progresiva en frío incluyen los tipos austeníticos 302, 304, 305, 316, 321 y 384; los ferríticos y martensíticos tipos 410, 430 y 431 pueden también trabajados de esta forma. Uno de los aceros inoxidables más utilizados para forja progresiva en frío es el UNS S30430, que es identificado por algunos ingenieros veteranos como 302 HQ. Es similar en composición a tipo 304 excepto que contiene 3 a 4% de Cu, lo que resulta en una reducción significativa en las características de endurecimiento por trabajo en frío. El acabado superficial de la pieza depende en gran medida en el acabado del alambre, lo que sugiere el uso de alambre ligeramente trefilado en lugar de recocido. La presión para el formado aumenta con la severidad de la forma y la lubricación de matrices es difícil cuando el recalado es severo. Los tipos ferrítico y martensítico de bajo en carbono se comportan como aceros al carbono o de baja aleación en la forja progresiva en frío. Las piezas fabricadas con aceros inoxidables austenítico y ferrítico se utilizan con mayor frecuencia en la condición forjada, aunque el recocido puede ser necesario si las condiciones de servicio pueden causar corrosión bajo tensión. Los tipos martensíticos son generalmente tratados térmicamente después de la forja. [7]



Figura 16. Procesos de trabajo en frío: piezas de acero forjadas progresivamente en frío^[40], trefilado en frío^[41]

2.3.4. Maquinado

Los aceros inoxidables como clase son más difíciles de maquinar que los aceros al carbono y que los aceros de baja aleación debido a su mayor resistencia y mayor endurecimiento por trabajo (naturaleza "gomosa"). Estas características requieren mayor potencia y menor velocidad de mecanizado, acorta la vida útil de la herramienta y, a veces dificultades para obtener un buen acabado en la superficie mecanizada. Existen amplias variaciones en estas características entre los diferentes inoxidables aceros. [7]

Procedimientos

Se debe prestar atención especial a los equipos en el mecanizado de aceros inoxidable para controlar los efectos de la resistencia y el endurecimiento por trabajo. Se necesitan equipos y herramientas rígidos para evitar la vibración. Se recomienda generalmente las herramientas para lanzar virutas debido a su dureza, se producen virutas fibrosas especialmente en el mecanizado de los aceros de los tipos austeníticos y ferríticos de alta aleación. Las herramientas fabricadas con aceros para alta velocidad y de carburo cementado proporcionan una vida útil aceptable en el mecanizado a velocidades de producción. Se deben tomar las siguientes precauciones para evitar el endurecimiento por trabajo. Las herramientas nunca deben solamente rozar o vitrificar sin cortar porque la superficie puede endurecerse hasta el punto de que las herramientas de corte se quemarán antes de penetrar la superficie. Se debe tener cuidado de que el endurecimiento de una operación no interfiera con el maquinado posterior. Se deben utilizar avances más grandes y velocidades más bajas que los utilizados en el mecanizado de aceros de baja aleación para minimizar el endurecimiento por trabajo. [7]

Tipo de Variaciones

Los aceros martensíticos de baja aleación y los aceros inoxidable ferríticos tienen características de mecanizado muy parecidos a los de los aceros de baja aleación, mientras que los aceros inoxidable martensíticos con alto contenido de carbono se encuentran entre los metales más difíciles de mecanizar. Los aceros inoxidable austeníticos y los aceros que endurecen por precipitación varían más ampliamente en las características de mecanizado dentro de cada clase que lo que varían los grados ferríticos y martensíticos. Las aleaciones de mecanizado libre son mecanizados más fácilmente debido a que contienen un aditivo para formar inclusiones que mejoran significativamente las características generales del mecanizado. Las estructuras de los aceros inoxidable martensítico de baja aleación y los aceros inoxidable ferríticos hacen que estos tipos sean frágiles, lo que da como resultado una viruta razonablemente de buena rotura. Sin embargo, los niveles de dureza generalmente son superiores a los de los aceros de baja aleación recocidos. Los aceros inoxidable martensíticos de baja aleación a menudo deben ser mecanizados en la condición de templado y revenido (hasta 38 HRC), lo cual produce una excelente precisión dimensional y acabado superficial. Los aceros inoxidable martensíticos con alto contenido de carbono como los tipos 420 y 440, y particularmente tipo 440C, progresivamente son más difíciles de mecanizar debido a sus altas durezas aun recocidos (hasta 240 HB) y la presencia de carburos de cromo duros y abrasivos en sus microestructuras. Los aceros inoxidable ferríticos con alto contenido de cromo como el tipo 446 son difíciles de mecanizar porque, como los tipos austeníticos, son "gomosos" y producen chips fibrosos. [7]

Los Aceros inoxidable austeníticos como los tipos 304 y 316 tienen resistencias a la tracción de 550 a 620 MPa (80 a 90 ksi) en estado recocido – el mismo rango de resistencia que el acero al carbono recocido 1050. Sin embargo, los aceros inoxidable austeníticos exhiben diferenciales mucho mayores entre rendimiento, resistencias máximas y endurecimiento por trabajo mucho mayores, particularmente las aleaciones más magras como tipos 302 y 304. La maquinabilidad de los aceros inoxidable dúplex está limitada por su alto nivel de resistencia en la condición de recocido y se consideran menos mecanizables que la mayoría de los grados austeníticos estándar. Los aceros del tipo endurecimiento por precipitación varían considerablemente en las características de mecanizado debido a las diferencias en estructura. Pueden ser ferríticos, martensítico, austenítico o bifásico, por lo que las características de mecanizado

serán en función de la estructura que existe en el momento del mecanizado. De la misma forma que los aceros del tipo martensítico, los aceros inoxidable que endurecen por precipitación a veces se mecanizan después de ser tratado térmicamente a una alta resistencia con el fin de producir piezas con tolerancias más estrechas que las que se pueden obtener mecanizado antes del tratamiento térmico. [7]

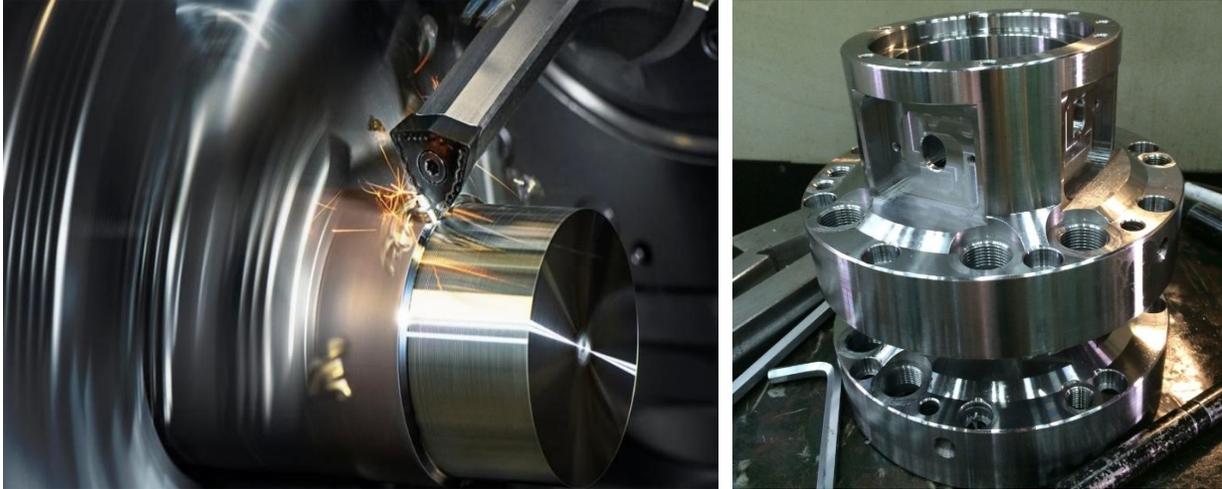


Figura 17. Procesos de maquinado: torneado de una barra de acero inoxidable [42], fresado complejo por control numérico [43]

2.3.5. Tratamientos Térmicos

Los aceros inoxidables se someten a diversos tipos de tratamiento por calor en función del tipo y de las necesidades de la aplicación. Estos tratamientos que incluyen recocido, endurecimiento y relevado de estrés, restauran las propiedades deseables como la resistencia a la corrosión y la ductilidad del metal alterada por operaciones de fabricación previas. El tratamiento térmico es a menudo realizado en atmósferas controladas para evitar efectos perjudiciales en la superficie. [7]

Recocido

Todos los tipos de aceros inoxidables pueden ser recocidos. El recocido de los aceros inoxidables de tipo austeníticos no solo recristaliza los granos y ablanda el metal, sino también solubiliza los carburos de cromo en la austenita. Debido al último efecto, el proceso a veces se denomina recocido en solución. Las temperaturas deben superar un intermedias rango para evitar la sensibilización debido a la precipitación de carburos a lo largo de los límites de los granos. Las temperaturas normales del recocido están por encima de 1040°C (1900°F), aunque algunos tipos se pueden recocer a temperaturas estrechamente controladas tan bajas como 1010°C (1850°) cuando es importante el tamaño de grano fino. El tiempo a la temperatura de recocido se mantiene corto para mantener la superficie al mínimo de escamas y controlar el crecimiento de grano que pudiera conducir a formar una superficie en forma de "piel de naranja". El

recocido de aceros inoxidable austeníticos es ocasionalmente llamado templado porque el metal debe enfriarse con rapidez, generalmente con agua para prevenir la sensibilización (excepto para tipos estabilizados y muy bajos en carbono). La precipitación de carburos de cromo puede dañar gravemente la resistencia a la corrosión porque el cromo se agota en la matriz inmediatamente adyacente a los carburos y/o porque los propios carburos pueden inducir corrosión galvánica. Por tanto, si no se utiliza enfriamiento con agua, sería necesaria una investigación exhaustiva para garantizar que la sensibilización no ocurre. Esta investigación debería tomar en cuenta la composición porque la razón de precipitación de carburo varía notablemente con la composición química: un acero del tipo 304 que contiene 0.05% de carbono puede estar libre de precipitaciones en condiciones de enfriamiento que produciría una gran sensibilización en la misma aleación que contiene 0.08% de carbono. Los aceros inoxidable austeníticos se reblandecen por recristalización a la temperatura de recocido y, a diferencia de la mayoría de los demás aceros no se endurecen por enfriamiento. [7]

Endurecimiento

Los aceros inoxidable martensíticos son endurecidos mediante austenización, temple y revenido al igual que los aceros de baja aleación. Las temperaturas a las que se realiza la austenización son normalmente de 980 a 1010°C (1800 a 1850°F) muy por encima de la temperatura crítica. La dureza después del templado aumenta con la temperatura de austenización a aproximadamente 980°C (1800°F) y luego disminuye debido a la retención de austenita. Para algunos tipos de aceros, la temperatura óptima de austenización puede depender de la subsiguiente temperatura de revenido. Se recomienda precalentar antes de austenizar para prevenir el agrietamiento en los tipos de aceros con alto contenido de carbono y en piezas con secciones intrincadas fabricadas con aceros de bajos en carbono. La práctica más común es precalentar a 790°C (1450°F) y luego se calienta a la temperatura de austenización, pero las piezas muy grandes o extremadamente intrincada a veces se precalientan sucesivamente a 540°C (1000°F) y luego a 790°C (1450°F) antes de austenizar. Los aceros inoxidable martensíticos tienen una alta templabilidad por su alto contenido en aleaciones. El enfriamiento por aire de la temperatura de austenización es generalmente adecuado para producir dureza total. A veces se usa aceite para realizar el enfriamiento, particularmente para secciones más grandes. La temperatura de revenido debe ser elegida por la combinación óptima de dureza, tenacidad y resistencia a la corrosión. Las piezas deben ser templadas tan pronto como se hayan enfriado a temperatura ambiente, especialmente si se ha usado el aceite para el templado - para evitar el agrietamiento retardado. Algunas veces las partes se refrigeran a -75°C (-100° F) antes de templar para transformar la austenita retenida particularmente donde la estabilidad dimensional es importante, como en bloques hechos de acero tipo 440C. El templado a temperaturas por encima de 510°C (950°F) debe ir seguido de enfriamiento relativamente rápido por debajo de 400°C (750°F) para evitar la fragilización de "885°F". Algunos aceros inoxidable de endurecimiento por precipitación requieren tratamientos térmicos más complicados que los tipos martensíticos estándar. Por ejemplo, el endurecimiento por precipitación de un acero del tipo puede requerir recocido, tratamiento en solución (para acondicionar la austenita para la transformación en el enfriamiento a temperatura), enfriamiento bajo cero (para completar la transformación de austenita) y envejecimiento (para endurecer la aleación). Por el contrario, los aceros del tipo martensíticos que endurecen por precipitación a menudo no requieren nada más que un simple tratamiento de envejecimiento. [7]



Figura 18. Tratamientos térmicos de aceros: temple y revenido ^[44], temple por inducción ^[45], templado en aceite ^[46]

Relevado de estrés

Soldaduras de acero inoxidable generalmente se calientan a temperaturas por debajo de la temperatura de recocido habitual para disminuir la tensión residual alta cuando el recocido completo después de la soldadura es imposible. Muy a menudo, se realiza alivio del estrés en soldaduras que son demasiado grandes o intrincadas para un recocido completo o en soldaduras con metales de diferentes consistentes de acero inoxidable austenítico soldado a aceros de aleados. El alivio del estrés a temperaturas por debajo de 400°C (750°F) es una práctica aceptable, pero da como resultado un alivio del estrés moderado. El alivio de tensión a 425 a 925°C (800 a 1700°F) reduce significativamente las tensiones residuales que, de lo contrario, podría provocar corrosión debido a las grietas generadas por tensión o inestabilidad dimensional en servicio. Una hora a las 870°C (1600°F) típicamente alivia aproximadamente 85% de las tensiones residuales. Sin embargo, aliviar el estrés en este rango de temperatura también precipita carburos en el límite de grano, lo que resulta en sensibilización que perjudica gravemente la resistencia a la corrosión en muchos medios. Los aceros inoxidables austeníticos sensibilizados son susceptibles a una corrosión por intergranular o corrosión intergranular asistida por tensión incluso en algunos medios que se consideran leve. Para evitar estos efectos, se recomienda que sea utilizado un acero inoxidable estabilizado (tipo 321, 347 o 348) o un tipo bajo en carbono (304L o 316L), particularmente cuando es requerido aliviar mucho estrés. Cuando los aceros inoxidables austeníticos han sido trabajados en frío para desarrollar una alta resistencia, un alivio de estrés a baja temperatura aumentará el límite proporcional del límite elástico (particularmente límite elástico compresivo). Normalmente se usa un tratamiento de dos horas a una temperatura de 345 a 370°C (650 a 700°F) y se pueden usar temperaturas de hasta 425°C (800°F) si no se requiere resistencia a la corrosión intercrystalina para la aplicación. Las temperaturas más altas reducirán la resistencia y sensibilizarán el metal por lo que generalmente no se utilizan para aliviar el estrés en productos trabajados en frío. La eliminación de estrés en soldaduras en acero inoxidable ferrítico o martensítico simultáneamente templarán las zonas afectadas por el calor y la soldadura en sí; además, para la mayoría tipos de aceros de estos grados, restaurarán la resistencia a la corrosión relativamente. Sin embargo, las temperaturas de recocido son relativamente bajas para estos

grados de acero y normalmente se selecciona un recocido subcrítico como tratamiento térmico para estos grados. [7]



Figura 19. Tratamientos térmicos de aceros: relevado de esfuerzos por calentamiento con inducción eléctrica [47]

2.3.6. Procesos de Unión

Los aceros inoxidables se unen comúnmente mediante soldadura con fusión de metal base, soldadura con un medio fundente (autógena) y soldadura mediante un baño fundido. La soldadura por arco es la elección abrumadora para unir acero inoxidable con acero inoxidable porque crea una junta relativamente sin hendiduras de alta eficiencia. Procedimientos y precauciones apropiadas son importantes para los diversos tipos si la resistencia a la corrosión requerida es la óptima y las propiedades mecánicas deben alcanzarse en el ensamble completo. Soldadura fuerte por lo general se prefiere para unir aceros inoxidables a metales diferentes. Los aceros inoxidables de todo tipo son soldables prácticamente usando todos los procesos de soldadura. En parte, La selección del proceso a menudo está dictada por la disponibilidad equipo. Quizás el más simple y universal es el proceso de soldadura manual por arco eléctrico (SMAW) con electrodos revestidos. Este se ha aplicado a materiales desde 1.2 mm (0.05 pulgadas) no hay límite superior de espesor. Otros procesos muy utilizados para los aceros inoxidables son soldadura por arco de gas-tungsteno (GTAW), soldadura por arco gas-metal (GMAW), sumergida soldadura por arco (SAW), soldadura por arco con núcleo Flux (FCAW) y varias formas de resistencia soldadura. La soldadura por arco de plasma (PAW), soldadura por rayo láser (LBW) y soldadura por haz de electrones (EBW). Los aceros inoxidable rara vez se unen mediante soldadura con gas. En la soldadura con oxiacetileno de aceros inoxidables se requiere una gran habilidad para controlar la atmósfera de soldadura y para prevenir la oxidación o carburación del área fundida de la soldadura. Independientemente del proceso de soldadura elegido, los factores principales que deben considerarse son (a) la resistencia a la corrosión en la soldadura y afectada por las zonas de calor; (b) estrés residual, que puede conducir para deformar, soldar agrietamiento o asegurar; y C) las propiedades mecánicas para los tipos martensíticos y ferríticos en la soldadura y zonas afectadas por el calor. Los aceros inoxidables

del tipo austeníticos son los más soldables, pero también son los aceros inoxidable que más cambian en su comportamiento comparados con aceros al carbono y aceros de baja aleación. Probablemente el factor metalúrgico más importante a considerar en la planificación de soldaduras de un acero inoxidable austenítico es la susceptibilidad a la precipitación de carburo en el límite de grano (sensibilización) a tempera moderadamente elevada. El material inmediatamente adyacente a la soldadura se calienta por encima de la temperatura de recocido y está libre de generar precipitaciones. A cierta distancia, tal vez 3 mm (1/8 in.) o más, dependiendo en los parámetros de soldadura: el metal base se calienta a 650 a 870°C (1200 a 1600°F) y pueden precipitarse los carburos en el límite de grano a pesar de estar poco tiempo a esa temperatura. La precipitación de carburo perjudica gravemente la resistencia a la corrosión en muchos medios, incluidos los ácidos más utilizados para decapado para eliminar el óxido. A pesar de la sensibilización que se produce en la región estrecha afectada térmicamente muchas soldaduras en aceros inoxidables austenítico se utilizan en la condición de soldado sin preocupaciones. [7]



Figura 20. Procesos de soldadura: soldadura eléctrica GTAW y zona afectada por el calor [48], soldadura autógena (brazing) [49], soldadura por rayo láser [50]

2.4. Trefilado de Alambre

Se entiende por trefilar a la operación de conformación en la reducción de sección de un alambre o varilla haciéndolo pasar a través de un orificio cónico practicado en una herramienta llamada hilera o mandril. Recientemente y por la influencia del inglés han surgido malas traducciones que confunden al mandril con dado. [51]

2.4.1. Características del Trefilado

El trefilado propiamente dicho consiste en el estirado del alambre en frío, por pasos sucesivos a través de hileras, dados, mandriles o dados cuyo diámetro es paulatinamente menor. Esta disminución de sección da al material una cierta acritud en beneficio de sus características mecánicas. Dependiendo de la longitud y el diámetro a trabajar, varían las reducciones que se pueden llegar a obtener mediante este proceso. A las barras de hasta 15mm de diámetro o mayores, se les suele dar una ligera pasada para mejorar el acabado superficial y las tolerancias dimensionales reduciendo su diámetro hasta 1.5mm. En otros tamaños más pequeños, se puede llegar a conseguir reducciones del 50%, y en otros alambres de hasta el 90% en pasadas sucesivas, partiendo en un estado del material de recocido y antes de que necesite un

nuevo recocido con el fin de eliminar su acritud. Se fabrican alambres de hasta 0.025 mm y menores, variando el número de hileras por los que pasa el alambre y con varios recocidos de por medio. La disminución de sección en cada paso es del orden de un 20% a un 25% lo que da un aumento de resistencia entre 10 y 15 kg/mm². Pero alcanzado cierto límite, variable en función del tipo de acero, no es aconsejable continuar con el proceso de trefilado pues, a pesar de que la resistencia a tracción sigue aumentando, se pierden otras características como la flexión. Las ventajas que aporta el trefilado propias del conformado en frío son las siguientes: buena calidad superficial, precisión dimensional, aumento de resistencia y dureza, y por supuesto la posibilidad de producir secciones muy finas. ^[51]

2.4.2. El Proceso de Trefilado

Las diferentes operaciones que se realizan durante este proceso son:

- **Recocido:** tratamiento térmico que consiste en calentar el material (hasta 1150°C en el caso del acero inoxidable) y una vez alcanzada dicha temperatura enfriarlo a temperatura ambiente. Este tratamiento tiene por objeto dar al material una estructura dúctil que permite el trefilado.
- **Decapado:** consiste en preparar y limpiar el material, eliminando el óxido que puede haberse formado en las superficies del material, en laminaciones anteriores. Normalmente se hace mediante ataques químicos y posteriormente se realiza una limpieza con agua a presión.
- **Trefilado:** los lubricantes y diferentes máquinas son los factores principales. Se suele utilizar de lubricantes especiales sólidos, aceitosos o grasos con aditivos para resistir la presión extrema.
- **Acabado:** una vez que ya ha salido el material de la hilera, se les somete a operaciones de enderezamiento, eliminación de tensiones y, a veces, algunos tratamientos térmicos para conseguir mejoras en las características mecánicas del producto. ^[51]

2.4.3. Equipo para Trefilado

Las máquinas utilizadas para realizar este proceso se denominan trefiladoras. En ellas se hace pasar el alambre a través de las hileras, como se ha descrito anteriormente. Para lograrlo el alambre se enrolla en unos tambores o bobinas de tracción (cabrestantes) que fuerzan el paso del alambre por las hileras. Estas hileras se refrigeran mediante agua o aceite y las bobinas o tambores de tracción se refrigeran normalmente con agua y aire. Las trefiladoras pueden ser de acumulación en las que no hay un control de velocidad estricto entre pasos o con brazos sensores en las que sí se controla la velocidad al mantener el palpador una tensión constante. ^[51]

2.5. Normas, Especificaciones y Estándares para el Acero Inoxidable en Alambrón

Existen múltiples estándares internacionales con sus propios designadores únicos para las propiedades químicas y mecánicas del acero. Por eso es importante comprender cómo dos de las especificaciones internacionales más importantes, JIS y los estándares AISI, se comparan entre sí. ^[52]

3. DESARROLLO

3.1. Metodología

El trabajo desarrollado se puede resumir en el siguiente diagrama de procesos en donde se muestra el resumen de las etapas que se toman bajo la nueva forma de administrar la materia prima y su aplicación.

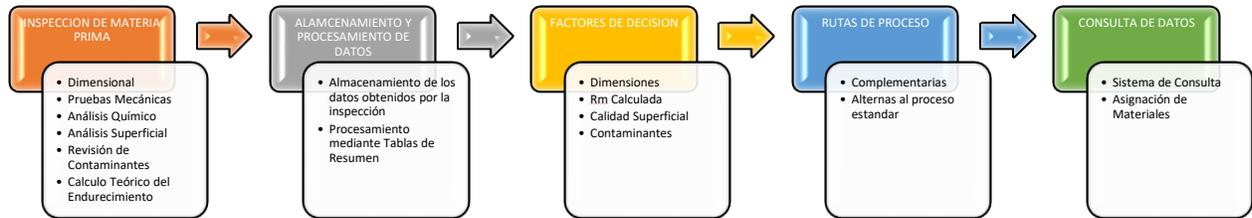


Figura 22. Etapas para la Administración de la Materia Prima. Desarrollo propio.

Se crea un archivo electrónico con el fin de administrar de forma integral todas las etapas mostradas anteriormente en la figura 22. Este archivo se mantendrá bajo uso y resguardo principal del departamento de Calidad, pero revisado y consultado por los departamentos de Planeación, Producción e Ingeniería de Procesos según sean sus necesidades.

PACKING LIST		FECHA	PROVEEDOR	GRADO	UNO	EN (Designación)	EN (Número)	COLADA	LOTE	TOT ORDEN
A258588		22-Mar-21	COGNE Acial Special	304	304BT	XSCN18-10	1.4301	C12345	L12345	2,000 Lb

# Rollos	ESPEC. (mm)	Análisis Dimensional				Pruebas Mecánicas				L. Inic	L. Fin	Alarg. [%]	Dureza [HRC]	Ø Cono (mm)	Producción
		Ø Max	Ø Min	Ø REAL	OVALIZ	Ø REAL	OVALIZ	Fuerza [Lb f]	Rm [kSi]						
1	6.0000	5.3000	5.6500	0.7000	0.2224	0.0276	380.0	97.8	20.0	25.0	25.0	36.0	4.9	25%	
2	6.0000	5.6000	5.8000	0.4000	0.2283	0.0157	390.0	95.2	20.0	24.0	20.0	32.0	4.8	32%	
3															
4															
5															
Promedio		6.0000	5.4500	5.7250	0.5500	0.2254	0.0217	385.0	96.5			22.5	34.0	4.9	28%
Desviación Std		-	0.2121	0.1061	0.2121	0.0042	0.0084	±7.1	±1.8			±3.5	±2.8	±0.1	5%
Especificaciones ASTM (A955, A490)		5.30 Min 5.70 Max		0.2800 0.2244 Max	0.2087 Min 0.0110 Max		90 kSi 620 MPa Max				14.9 Min 15.0 Max				

# Rollos	Análisis Químico (Rayos-X) o Espectrómetro													
	C		Si		Mn		P		S		N		Cr	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	0.07%	0.08%	0.00%	1.00%	0.00%	2.00%	0.000%	0.045%	0.000%	0.030%			18.0%	20.0%
2	0.07%		0.90%		1.30%		0.040%		0.030%				18.1%	
3	0.08%		0.85%		1.50%		0.041%		0.028%				18.2%	
4														
5														
Prom		0.073%		0.875%		1.480%		0.0405%		0.0290%			18.15%	
Error		0.004%		0.035%		0.141%		0.0007%		0.0014%			0.07%	

# Rollos	Cu		Mo		Nb		Ni		Al		Ti		Se		V	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1							8.0%	10.5%								

- 1 - BORRAR FORMATO
- 2 - LLENAR FORMATO
- 3 - REGISTRAR DATOS
 - 1 ROLLO
 - 2 ROLLOS
 - 3 ROLLOS
 - 4 ROLLOS
 - 5 (TODOS) ROLLOS
- 4 - ACTUALIZAR TABLAS
- 5 - GUARDAR ARCHIVO
- 6 - GENERAR PDF
- 7 - ENVIAR REPORTE

Figura 23. Archivo "Inspección de Materia Prima y Determinación de Uso". Desarrollo propio.

3.2. Inspección de la Materia Prima

Como parte del SGC (Sistema de Gestión de la Calidad) se están llevando a cabo inspecciones muestrales de la materia prima. Estas inspecciones contemplan:

- Datos de la Orden y Proveedor
- Datos del producto (colada, lote, grado, diámetro requerido)
- Inspección dimensional (diámetro y redondez)
- Análisis de elementos químicos PMI (positive material inspección) arrojando una lectura positiva o negativa
- Análisis de Rm (resistencia mecánica)
- Análisis de rugosidad

El plan de muestreo para la inspección de la materia prima es definido por la Gerencia de Calidad y está basado en las *Tablas de Muestreo MIL-STD-105e*.

Sin embargo, se implementa un registro de datos más a detallado que permite tener los datos suficientes para analizar, sugerir cambios en los procesos, rangos de utilización y la asignación más adecuada de los materiales.

Una mejora y ventaja adicional es el uso del registro electrónico de datos que permite la consulta rápida y la lectura de datos sin los errores o interpretaciones que se tiene comúnmente en los registros escritos.

De la misma forma que en los formatos anteriores, se debe mantener la información para la rastreabilidad del material.

Datos de la Orden									
PACKING LIST	FECHA	PROVEEDOR	GRADO				COLADA	LOTE	TOT ORDEN
			AISI	UNS	EN (Designación)	EN (Número)			
A3552	30-Jan-21	COGNE Acciai Speciali	308	S30800			C125862	L254645	150,000 Lb

Figura 24. Datos para rastreabilidad de los materiales. Desarrollo propio.

Es importante destacar una funcionalidad del nuevo sistema ya que cuenta con campos seleccionables y campos editables.

En el primer caso, se crearon lista de datos en cada campo cubriendo todas las opciones históricas disponibles. De esta forma se asegura el eliminar errores simples como omitir letras, crear espacios o incluir clasificaciones incorrectas.

Datos de la Orden									
PACKING LIST	FECHA	PROVEEDOR	GRADO				COLADA	LOTE	TOT ORDEN
A3552	30-Jan-21	COGNE Acciai Speciali	AISI	UNS	EN (Designación)	EN (Número)			
			308	S30800					
# Rollo	Ø ESPEC. [mm]	Ø Max [mm]	Ø Min [mm]	Ø REAL [mm]	OVALIZ. [mm]	RESISTENCIA [Lb f]			
1	5.5	5.5384	5.5081	5.5233	0.0303	308	309	309S	310
2		5.5325	5.4825	5.5075	0.0500	310S	314	316	316F
3		5.5325	5.4825	5.5075	0.0500				

Figura 25. Campos con Listas seleccionables. Desarrollo propio.

En el segundo caso, los campos editables se mantienen para ingresar directamente los datos propios y únicos del campo. P.e. el número de colada o lote.

COLADA	LOTE	TOT ORDEN
C125862	L254645	150,000 Lb

Figura 26. Campos editables. Desarrollo propio.

3.2.1. Análisis Dimensional

El sistema anterior se determinaba el diámetro real y la ovalización de los materiales con el fin de registrar dichos datos en formato físico llamado *Bitácora de Inspección* junto con los datos que identifican a la materia prima.

Estos datos, aunque útiles, resultaban difíciles de administrar debido a su formato físico e incluso más complicados de utilizar debido a los distintos estilos de escritura algunas veces resultando complicado identificar números o letras.

Por otro lado, no era posible analizar de manera simple los datos de estas pruebas, por lo que los mismos se transferían a una forma electrónica y el formato físico se mantenía en el archivo.

Figura 27. Formato “Bitácora de Liberación, Aseguramiento de Calidad”.

Los datos capturados electrónicamente son condensados en el archivo de datos llamado *Resultados de Materia Prima*. De esta forma se consultaban de forma individual realizando búsquedas y filtros.

MUESTREO DE MATERIA PRIMA													
Muestra	PROVEEDOR	FECH	GRAM	COLADA	# REAL (MM) - FI	# AJUST (mm)	# REAL (In) - FI	FIM (P)	FIM (K)	A	EWALIZACI	FRECUEN	
1	SEAKCS	10/6/2016	304#	25208	5.01809	5.00	0.1984	90.712	90.7	52	0.0029	2.96	
2	SEAKCS	10/6/2016	304#	25208	5.04698	5.00	0.1987	88.059	88.0	60	0.0042	3.60	
3	SEAKCS	10/6/2016	304#	25208	5.04698	5.00	0.1987	94.488	94.5	60	0.0032	3.23	
1	SEAKCS	10/7/2016	304#	524914	5.01809	5.00	0.1984	82.589	82.6	60	0.0049	2.48	
2	SEAKCS	10/7/2016	304#	524914	5.04698	5.00	0.1987	81.867	81.8	60	0.0027	3.50	
3	SEAKCS	10/7/2016	304#	524914	5.06254	5.00	0.2001	82.614	82.6	60	0.0036	3.59	
4	SEAKCS	10/7/2016	304#	524914	5.0546	5.00	0.1990	82.533	82.5	64	0.0056	4.21	
1	NAS	9/19/2016	315L	04897	5.51498	5.50	0.2187	88.711	88.7	50	0.0041	2.59	
2	NAS	9/19/2016	315L	04897	5.51688	5.50	0.2172	82.883	82.9	50	0.0038	2.09	
1	NAS	9/19/2016	315L	0671	5.55752	5.50	0.2188	87.128	87.1	60	0.0054	4.35	
2	NAS	9/19/2016	315L	0671	5.55244	5.50	0.2186	83.264	83.3	55	0.0029	4.26	
1	COGNE	9/9/2016	304#72	873858	5.5353	5.50	0.2195	79.181	79.2	60	0.0082	3.45	
2	COGNE	9/9/2016	304#72	873858	5.54482	5.50	0.2183	80.901	80.9	60	0.0044	3.99	
3	COGNE	9/9/2016	304#72	873858	5.57784	5.50	0.2196	80.157	80.2	58	0.0046	3.69	
1	NOVAMITAL	9/20/2016	88312	48772	5.5489	5.50	0.2185	110.169	110.2	35	0.005	4.93	
2	NOVAMITAL	9/20/2016	88312	48772	5.6515	5.50	0.2225	113.278	113.2	30	0.0042	3.61	
3	NOVAMITAL	9/20/2016	88312	48772	5.59828	5.50	0.2204	107.189	107.2	30	0.0056	4.81	
1	COGNE	9/20/2016	88312	472877	5.66928	5.50	0.2232	110.945	110.9	30	0.0064	4.91	
1	ISINOK	9/28/2016	304#	782461	5.6388	5.50	0.2220	79.596	79.6	50	0.0072	4.96	
2	ISINOK	9/28/2016	304#	782461	5.58098	5.50	0.2187	80.480	80.5	52	0.0098	4.56	
3	ISINOK	9/28/2016	304#	782461	5.61626	5.50	0.2219	81.943	81.9	60	0.0104	4.67	
1	COGNE	9/28/2016	304#72	870247	5.6642	5.50	0.2230	79.882	79.9	60	0.0086	4.94	
1	COGNE	9/28/2016	304	873898	5.76656	7.00	0.2664	83.926	83.9	60	0.0036	3.54	
2	COGNE	9/28/2016	304	873898	5.70306	6.50	0.2639	84.244	84.2	60	0.0048	4.2	
3	COGNE	9/28/2016	304	873898	5.73608	6.50	0.2652	84.434	84.4	60	0.0016	4.79	
1	COGNE	9/18/2016	307#	872725	5.82102	5.50	0.2213	87.692	87.7	60	0.0056	4.52	
2	COGNE	9/18/2016	307#	872725	5.81584	5.50	0.2211	87.564	87.6	62	0.0054	4.52	
3	COGNE	9/18/2016	307#	872725	5.82102	5.50	0.2213	86.808	86.8	60	0.0056	3.95	
4	COGNE	9/18/2016	307#	872725	5.81086	5.50	0.2209	88.532	88.5	60	0.0054	4.51	
1	COGNE	9/19/2016	304#72	873898	5.4956	5.50	0.2140	83.629	83.6	60	0.0048	4.11	
2	COGNE	9/19/2016	304#72	873898	5.5245	5.50	0.2175	80.582	80.6	60	0.0106	3.72	

Figura 28. Archivo "Muestreo de Materia Prima, Aseguramiento de Calidad".

Se realiza el cambio para seguir con estas inspecciones, pero documentarlas de forma detallada para que se mantenga el registro.

El cambio involucra contar con los detalles dimensionales o inclusive muestra cálculos de promedios y desviaciones estándar al realizar la captura de datos para que dé una idea general al Inspector que realiza las pruebas de la tendencia central y dispersión de los datos en las muestras. Ambos datos, valores obtenidos al realizar las pruebas mecánicas y el resumen de estos se mantienen en un archivo electrónico único.

# Rollo	Análisis Dimensional						
	Ø ESPEC. [mm]	Ø Max [mm]	Ø Min [mm]	Ø REAL [mm]	OVALIZ. [mm]	Ø REAL [pulg]	OVALIZ. [pulg]
1	5.5	5.5384	5.5081	5.5233	0.0303	0.2175	0.0012
2		5.5325	5.4825	5.5075	0.0500	0.2168	0.0020
3		5.5325	5.4825	5.5075	0.0500	0.2168	0.0020
4		5.5325	5.4825	5.5075	0.0500	0.2168	0.0020
5		5.4952	5.4825	5.4889	0.0127	0.2161	0.0005
Prom		5.5262	5.4876	5.5069	0.0386	0.2168	0.0015
Desv		0.0175	0.0114	0.0247	0.0168	0.0010	0.0007

Figura 29. Tabla: Datos para captura del *Análisis Dimensional*. Elaboración Propia.

3.2.4. Análisis Superficial

Se tiene una sección en donde un se reporta la rugosidad superficial $Ra_{[\mu m]}$ (ASME B46.1-2019) y se agregan nuevos campos para indicar defectos superficiales y cuantificar el grado del defecto.

La rugosidad superficial está relacionada por un lado a mantener un arrastre adecuado de lubricante principalmente en las primeras etapas de un trefilado múltiple y por otro lado también puede provocar un contacto directo entre al acero a trefilar y el dado utilizado como matriz creando una abrasión y desgaste prematuro.

Análisis Superficial							
# Rollo	Ra[mm]	Hacia Adentro de la Superficie	Profund. Defecto [mm]	Hacia Afuera de la Superficie	Altura Defecto [mm]	Interno Expuesto en la Superficie	Longitud Defecto [mm]
1	2.96	Raspones	0.25		0.35		10.0
2	2.96	Raspones Golpes	0.25	Bigote	0.35	Fractura expuesta	10.0
3	2.96		0.25	Bigote	0.35	Fractura expuesta	10.0
4	2.96		0.25	Bigote	0.35	Fractura expuesta	10.0
5	2.96		0.25	Bigote	0.35	Fractura expuesta	10.0
Prom	2.96		0.250		0.350		10.00
Desv	-		-		-		-

Figura 33. Tabla: Rugosidad y Análisis Superficial. Elaboración Propia.

3.2.5. Revisión de contaminantes

La presencia de contaminantes en la superficie del acero provoca que estos se “impregnen” o se recalquen al trefilar el acero haciendo muy difícil o casi imposible su remoción.

Entre los contaminantes más comunes esta la presencia de oxido en la superficie y algunas veces corrosión. La diferencia radica en el grado de penetración y el origen.

Se puede tener presencia de oxido debido al contacto con superficies contaminadas o algún tipo de oxidación superficial en los grados menos resistentes a la corrosión.

De esta forma, es importante conocer cuando un material tiene presencia de contaminantes ya que, de presentarlos, se deberá considerar agregar algunas etapas de limpieza previa.

Estas etapas de limpieza pueden incluir: lavado a presión, lavado en solución ácida caliente y abrasión mecánica.

Revisión de Contaminantes			
Oxidación o Contaminación con Oxido	Area [%]	Otros Contaminantes	Area [%]
	6%		6%
Manchas de oxido	6%	Grasa	6%
	6%	Grasa	6%
Manchas de oxido	6%	Grasa	6%
Oxidacion	6%	Grasa	6%
Picaduras	6%		6%
	0%		0%

Figura 34. Tabla: Revisión de Contaminantes”. Desarrollo propio.

3.3. Almacenamiento de Registros de Inspección

El almacenamiento de datos se realiza una vez que se han ingresado todos los datos requeridos en la inspección de la materia prima. Para ello se presiona alguno de los botones con los números del 1 al 5 (Figura 35), ya que se considera que en las combinaciones posibles de materiales en un mismo contenedor o en un mismo embarque se podría requerir inspeccionar de 1 a 5 rollos de alambρόn o muestras.



Figura 35. Almacenamiento de datos de la inspección. Desarrollo propio.

Los datos se almacenan en una tabla diseñada con este fin. Aunque no es lo más recomendable, es posible también revisar y consultar los registros almacenados e inclusive editarlos para realizar correcciones (Figura 36). Los datos pueden ser filtrados y buscados.

Base de Datos

Datos Orden										Dimensional										Mecanica			
ROLLO MUESTRA	PROVEEDOR	PACKING LIST	FECHA	GRADO	COLADA	COL + Ø ESPEC	GRADO + Ø ESPEC + COL + PRODV	LOTE	Tot Orden (Lb)	Ø ESPEC (mm)	Ø Max (mm)	Ø Mn (mm)	Ø REAL (mm)	DIF ØE-ØR (mm)	ACPT. (5%)	OVALIZ. (mm)	ACPT. (5%)	Ø REAL (µm)	Ø DIFER. (µm)	OVALIZ. (µm)	Fuerza (Lb/f)	RM (KSI)	A B
1	COGNE Acacia Special	A259598	22-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	6.0000	5.3000	5.6500	+0.150		0.0276		0.2224	+0.0059	0.0276	380	98	
2	COGNE Acacia Special	A259598	22-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	6.0000	5.6000	5.8000	+0.300		0.0157		0.2283	+0.018	0.0157	390	95	
3	COGNE Acacia Special	A259598	22-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	0.0000	0.0000		#VALUE!							-		
4	COGNE Acacia Special	A259598	22-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	0.0000	0.0000		#VALUE!							-		
5	COGNE Acacia Special	A259598	22-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	0.0000	0.0000		#VALUE!							-		

Datos Orden										Dimensional										Mecanica			
ROLLO MUES	PROVEEDOR	PACKING	FECH	GRAD	COLAD	COL + Ø ESPEC	GRADO + Ø ESPEC + C	LOTE	Tot Or (Lb)	Ø ESPEC (mm)	Ø M (mm)	Ø Mn (mm)	Ø REAL (mm)	DIF ØE-ØR (mm)	ACPT. (5)	OVALIZ. (mm)	ACPT. (5)	Ø REAL (µm)	Ø DIFER. (µm)	OVALIZ. (µm)	Fuer (Lb)	RM (K)	A B
1	COGNE Acacia Special	A259598	19-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	6.0000	5.3000	5.6500	+0.150		0.0276		0.2224	+0.0059	0.0276	380	98	
1	COGNE Acacia Special	A259598	19-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	6.0000	5.3000	5.6500	+0.150		0.0276		0.2224	+0.0059	0.0276	380	98	
2	COGNE Acacia Special	A259598	19-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	6.0000	5.6000	5.8000	+0.300		0.0157		0.2283	+0.018	0.0157	390	95	
3	COGNE Acacia Special	A259598	19-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	0.0000	0.0000		#VALUE!							-		
1	COGNE Acacia Special	A259598	19-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	6.0000	5.3000	5.6500	+0.150		0.0276		0.2224	+0.0059	0.0276	380	98	
2	COGNE Acacia Special	A259598	19-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	6.0000	5.6000	5.8000	+0.300		0.0157		0.2283	+0.018	0.0157	390	95	
1	COGNE Acacia Special	A259598	19-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	6.0000	5.3000	5.6500	+0.150		0.0276		0.2224	+0.0059	0.0276	380	98	
1	COGNE Acacia Special	A259598	19-Mar-21	304	C12345	C12345-5.5	304-5.5mm-C12345-COGN	L12345	2,000	5.50	6.0000	5.3000	5.6500	+0.150		0.0276		0.2224	+0.0059	0.0276	380	98	

Figura 36. Hoja con la Base de Datos de los registros de inspección. Desarrollo propio.

3.4. Consulta de Datos Almacenados

Los datos almacenados se condensan en tablas con los registros correspondientes a los datos de trazabilidad de los materiales. En la figura 37 se puede observar un ejemplo de una de las tablas resumen en donde la agrupación se realiza considerando: grado de acero, diámetro, colada y proveedor.

<i>Dimensional</i>					
X COLADA	Ø ESPECIFICACION	Ø REAL	Ø ESPEC VS REAL	Ø OVALIZACION	
COL+ Ø ESPEC	Average of Ø ESPEC.	Average of Ø REAL	Average of DIF ØE-ØR	Average of OVALIZ.	
1.4370-5.5mm-HE21782-HANWA	5.50	5.56	0.061	0.099	
1.4370-5.5mm-S38530-SEAH	5.50	5.57	0.066	0.135	
1.4370-5.5mm-S38531-SEAH	5.50	5.61	0.106	0.119	
1.4370-5.75mm-872040-COGNE	5.75	5.65	-0.101	0.051	
1.4370-5.75mm-S38531-SEAH	5.75	5.63	-0.124	0.132	
1.4462-5.75mm-950167-NOVAMETAL	5.75	5.65	-0.097	0.589	
1.4462-7.75mm-65940-NOVAMETAL	7.75	7.67	-0.079	0.056	
1.4567-4.75mm-60529-NOVAMETAL	4.75	4.66	-0.092	0.005	
1.4567-5.5mm-61679-NOVAMETAL	5.50	5.58	0.080	0.122	
1.4828-5.5mm-O5543-PANCHMAHAL	5.50	5.57	0.074	0.261	
1.4829-5.5mm-62193-NOVAMETAL	5.50	5.62	0.121	0.147	
1.4829-5.5mm-64306-NOVAMETAL	5.50	5.60	0.096	0.091	
1600-5.5mm-47613-NOVAMETAL	5.50	5.58	0.075	0.203	
1600-5.5mm-QX926-LINCON ELECTRIC	5.50	5.62	0.121	0.071	
17-7-5.5mm-553135-PRECISION METAL	5.50	5.55	0.055	0.218	
17-7-5.5mm-553650-PRECISION METAL	5.50	5.60	0.100	0.113	
17-7-5.5mm-E88324-HANWA	5.50	5.60	0.101	0.056	
17-7-5.5mm-E88324-STAINLESS STEEL	5.50	5.57	0.070	0.135	

Figura 37. Tabla resumen para las características dimensionales del alambrcn. Desarrollo propio.

La consulta de datos se realiza mediante una hoja diseada con este fin. En esta hoja se seleccionan los datos de algun alambrcn en especfico.

Determinación de Uso
(Alambrcn)
TREFILADOS INOXIDABLES DE MÉXICO, S.A. DE C.V.

Selección del Material

GRADO	Ø ESPEC.(mm)	COLADA	LOTE	PROVEEDOR
316	5.50	780580	(blank)	COGNE
316L	4.00	900349	L12345	APERAM ALLOYI
1.4462	4.50	10747	L1825463	APERAN LINCOLN
1.4567	4.75	25208	L254645	COGNE Accial Speciali

Determinación por Desviación Dimensional

ID	Diametro [mm]				Usos Recomendados	Ovalización [mm]		
	Espe	Toleran	Real	Distribución Gráfica		Oval	Distribución Gráfica	Usos Recomendados
316-5.5mm-780580-COGNE	5.50	5.3	5.55		Centrado en la de tolerancia: - Uso regular	0.05		Uso normal

Determinación por Propiedades Mecánicas

ID	Propiedad	Spec	Por Colada		Distribución Gráfica	Usos Recomendados	Historica del Grado		
			Max	Min			Max	Min	Max
316-5.5mm-780580-COGNE	Resistencia Mecánica Última	90	84	84		Uso normal para redrav. Los valores mas bajos del limite favorecen la fabricaci3n de redrav en diametros pequenos. Calcular la Pm para 3rdenes controlas.	84	84	
	% de Alargamiento	40	52	52		Alargamiento alto favorece la reducci3n de area	52	52	
	% de Reducci3n de Area	40%				Indicador de la capacidad de reducci3n de area			

Figura 38. Tabla para consulta de datos. Desarrollo propio.

La selección del alambro se realiza median parámetros de búsqueda por medio de selectores ligados a tablas resumen. Al seleccionar los datos de trazabilidad de un acero, se puede filtrar todos los registros para lograr un registro condensado que muestra los datos de una combinación única. En la figura 39 se puede observar una combinación de grado de acero, diámetro y colada mostrando el molino que fabricó el material (algunas veces se muestra el distribuidor o representante si fue adquirido el material por este medio).

The screenshot shows a software interface for material selection. It has five main columns: GRADO, Ø ESPEC. [mm], COLADA, LOTE, and PROVEEDOR. Each column has a list of options and a search icon. The selected values are: GRADO: 316, Ø ESPEC. [mm]: 5.50, COLADA: 780580, LOTE: (blank), and PROVEEDOR: COGNE.

Figura 39. Selectores para los datos del alambro. Desarrollo propio.

3.5. Factores de Decisión para el Uso de los Materiales

A continuación, se muestran los cálculos de los factores o características que se consideran en los materiales y la forma en la que deberán ser procesados. Los materiales que cumplen con las características y están centrados en la tolerancia simplemente se mencionan como un proceso regular.

Para los materiales que presentan variaciones significativas o que incluso se encuentran fuera de las normas pero que es posible trabajarlos, se mencionan las principales recomendaciones para ello.

Algunas de las condiciones que pueden llegar a presentar algunos materiales también hace no recomendable o imposible el realizar el proceso de trefilado o comprometer la calidad y aceptación de los productos. Para esos casos también se menciona dicha aseveración.

Un punto importante que se debe mencionar es que muchas de estas recomendaciones, si no es que la mayor parte de ellas” se han recolectado basadas en las experiencias de fabricación, en los problemas que se han tenido y las soluciones que se han tomado. Esto es lo que se podría conocer como el “know how” de los Operadores y Supervisores. De esta forma se entiende que conforme se vaya revisando y validando este conocimiento, seguramente habrá cambios que se deberán ir ajustando.

3.5.1. Basados en Las Dimensiones

El primer criterio que se deberá considerar en el uso de un alambro en general son sus dimensiones generales: diámetro y redondez (conocida en nuestra compañía como ovalización).

Determinación por Desviación Dimensional									
ID	Diámetro [mm]					Ovalización [mm]			
	Ø Espec	Toleran	Real	Distribución Gráfica	Usos Recomendados	⊕ Oval	Distribución Gráfica	Usos Recomendados	
316-5.5mm-780580-COGNE	5.50	MIN 5.3 MAX 5.7	REAL 5.55 DIF. 0.05		⊕ Centrado en la de tolerancia: - Uso regular	REAL 0.05 MAX 0.28		Usos normal	

Figura 40. Selectores para los datos del alambro. Desarrollo propio.

Según especificación estándar ASTM A555 en la Tabla 2^[53] se tienen los valores de tolerancias permitidas. Los valores de los registros son comparados con las tolerancias para determinar su conformidad y desviación. Esto se realiza de forma numérica y gráfica para una interpretación más simple.

De esta forma y dependiendo la variación que se tenga, se generan las sugerencias de uso y las recomendaciones necesarias si son requeridas.

Se debe mencionar que para calcular el cambio en la resistencia mecánica del acero y por consiguiente su disminución en la capacidad de ser trefilado interviene la reducción de área la cual se calcula usando los diámetro inicial y final. De esta forma, la capacidad de un alambroón se ve afectada por la variación en su diámetro inicial e inclusive en su forma circular u ovoide.

3.5.2. Basados en las Propiedades Mecánicas Determinadas

En nuestra compañía se utiliza la Resistencia Mecánica Última/Máxima (Tensión de ingeniería más alta desarrollada en un material antes de la rotura. Normalmente, los cambios en el área debido a la carga que cambia y al estrangulamiento se descartan para determinar la resistencia máxima ^[54]) como variable principal de control en las propiedades mecánicas de los aceros. Este uso se ha generalizado, sin embargo, también se calculan otras propiedades mecánicas cuando los instrumentos de medición, las observaciones y los cálculos las pueden determinar. Para este caso se tienen el porcentaje de alargamiento y el porcentaje de reducción de área.

De estas dos, se usa de forma más común el porcentaje de alargamiento. La medición del porcentaje de reducción de área se realiza de forma esporádica, pero se está proponiendo ya que se considera como un indicador directo de la capacidad de trefilado.

En la figura 41 se observan las tres características mecánicas mencionadas. Se hace la aclaración que aún no se cuentan con datos suficientes para al menos colocar un valor de referencia en el porcentaje de reducción de área. Aun que se tiene más datos para el porcentaje de alargamiento, aún faltan más para cubrir la mayor parte de los grados de acero.

Determinación por Propiedades Mecánicas												
ID	Propiedad	Spec	Por Colada		Distribución Gráfica	Usos Recomendados	Historica del Grado					
316-5.5mm-780580-COGNE	Resistencia Mecánica Última	90	DESV	PROM	84	MIN	84	DESV	PROM	84	MIN	84
		Max				MAX	84				MAX	84
	% de Alargamiento	40	DESV	PROM	52	MIN	52	DESV	PROM	52	MIN	52
		Min				MAX	52				MAX	52
	% de Reducción de Área	40%	DESV	PROM		MIN		DESV	PROM		MIN	
		Min				MAX					MAX	

Figura 41. Selectores para los datos del alambroón. Desarrollo propio.

3.5.3. Resumen de la Composición Química

Aunque los aceros deben cumplir las normas que indican por porcentajes de elementos y los elementos químicos que deben contener, los aceros presentan variaciones dentro de esas tolerancias que deben ser

revisadas algunas veces. Inclusive mediante el análisis de la composición química y sus variaciones se puede asegurar que no se tienen mezclas de aceros o cumplir algún requerimiento específico de algún Cliente.

En un futuro también se tiene contemplado utilizar esta composición química y sus variaciones para poder predecir en alguna medida el comportamiento del acero en los procesos.

En la figura 42 se puede observar la tabla en donde se muestra el resumen de la composición química de un acero y se compara los límites establecidos por los estándares ASTM.

Determinación por Composición Química																
ID	C		Si		Mn		P		S		N		Cr		Cu	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
316-5.5mm-780580-COGNE	0.00%	0.08%	0.00%	1.00%	0.00%	2.00%	0.00%	0.045%	0.000%	0.030%	0.00%	0.00%	16.0%	18.0%	0.00%	0.00%
	Mo		Nb		Ni		Al		Ti		Se		V			
	2.00%	3.00%	0.00%	0.00%	10.0%	14.0%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%		

Figura 42. Composición química de un acero comparado con sus tolerancias según los estándares.

Los valores de en las tolerancias están cargados en la tabla “Grados de Acero” mostrada en la figura 43. Esta tabla tiene la capacidad de ir agregando más grados de acero junto con sus tolerancias en la composición química, así como algunas de sus propiedades mecánicas.

AISI		UNS	EN	Norma	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Al	Ti	Se	V	Rm max	Type	Alarg	RedA
			Designación	Numero	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	kSI	[%]	[%]
[Serie 20]																							
2040			X10CrNi18-8	1.4571	0.10%	2.00%	6.50%	8.50%	0.040%	0.015%	16.00%	18.00%	2.00%	3.50%	1.00%								
4231			X10CrNi18-8	1.4621	0.05%	2.00%	6.50%	8.50%	0.035%	0.010%	16.00%	18.00%	2.00%	3.50%	1.00%								
[Serie 30]																							
302	S30200	X10CrNi18-8	1.4310		0.15%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		17.00%	19.00%			8.00%	10.00%				95	555	Austenítico	
303	S30300	X8CrNiS18-8	1.4305		0.15%	1.00%	2.00%	0.200%	0.150%		17.00%	19.00%		0.80%	8.00%	10.00%							
303Se	S30303	X8CrNiS18-8	1.4305		0.15%	1.00%	2.00%	0.200%	0.150%		17.00%	19.00%		0.80%	8.00%	10.00%			0.15%				
304	S30400	X5CrNi18-10	1.4301 EN 10088		0.08%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		18.00%	20.00%			8.00%	10.50%				90	520	Austenítico	
304 (CH2)	S30400	X5CrNi18-10	1.4301		0.08%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		18.00%	20.00%			8.00%	10.50%							
304H	S30409	X5CrNi18-10	1.4571		0.04%	1.00%	0.75%	2.00%	0.045%	0.030%	0.09%	18.00%	20.00%		8.00%	10.50%							
304Cu	S30403	X5CrNiCu18-10	1.4571		0.04%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%	0.11%	17.00%	19.00%		3.00%	8.50%	10.50%							
304L	S30403	X2CrNi18-8	1.4307 EN 10088		0.03%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		18.00%	20.00%			8.00%	12.00%				90	520	Austenítico	
304LN	S30403	X2CrNi18-8	1.4307		0.03%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%	0.10%	18.00%	20.00%			8.00%	10.50%							
S30430	S30430	X5CrNi18-10	1.4301		0.08%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		17.00%	19.00%	3.00%	4.00%	8.00%	10.00%							
304N	S30401	X5CrNi18-10	1.4301		0.08%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%	0.10%	18.00%	20.00%			8.00%	10.50%				88	505	Austenítico	
304V	S30409	X5CrNi18-10	1.4301		0.08%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		18.00%	20.00%			8.00%	10.50%							
307	S30900	X6CrNi21-12	1.4303		0.12%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		17.00%	19.00%			10.50%	13.00%				85	505	Austenítico	
307Cu	S30903	X6CrNiCu21-12	1.4303		0.12%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%	0.15%	17.00%	19.00%		0.15%	10.50%	13.00%							
308	S30800	X6CrNi19-11	1.4308		0.08%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		19.00%	21.00%			10.00%	12.00%							
309	S30900	X15CrNi25-12	1.4828 EN 10088		0.20%	2.00%	2.00%	0.045%	0.030%		22.00%	24.00%			12.00%	15.00%							
309S	S30908	X15CrNi25-12	1.4833		0.08%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		22.00%	24.00%			12.00%	15.00%							
310	S31000	X12CrNi20-10	1.4310		0.25%	1.50%	2.00%	0.045%	0.030%		24.00%	26.00%			18.00%	22.00%							
310S	S31008	X12CrNi20-10	1.4310		0.08%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		24.00%	26.00%			18.00%	22.00%							
314	S31400	X15CrNi25-21	1.4841		0.25%	1.50%	3.00%	2.00%	0.045%	0.030%	23.00%	26.00%			19.00%	22.00%							
316	S31600	X5CrNiMo16-8	1.4401		0.08%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		16.00%	18.00%		2.00%	3.00%	10.00%	14.00%			90	520	Austenítico	
316F	S31603	X5CrNiMo16-8	1.4401		0.08%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		16.00%	18.00%		1.75%	2.50%	10.00%	14.00%						
316H	S31609	X5CrNiMo16-8	1.4401		0.04%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		16.00%	18.00%		2.00%	3.00%	10.00%	14.00%						
316L	S31603	X5CrNiMo16-8	1.4401		0.03%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		16.00%	18.00%		2.00%	3.00%	10.00%	14.00%			85	505	Austenítico	
316Ti	S31635	X5CrNiTi16-8	1.4571		0.03%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		16.00%	18.00%		2.00%	2.50%	11.00%	12.50%						
317	S31700	X6CrNiMo20-10	1.4571		0.08%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		18.00%	20.00%		3.00%	4.00%	11.00%	15.00%						
317L	S31703	X6CrNiMo20-10	1.4571		0.03%	1.00%	2.00%	0.045%	0.030%		18.00%	20.00%		3.00%	4.00%	11.00%	15.00%						

Figura 43. Tabla “Grados de Acero”.

3.5.4. Basados en la Calidad Superficial y los Contaminantes

Se ha encontrado que la calidad superficial en el alambro impacta y refleja en gran medida la calidad superficial de un alambre trefilado.

Se hacen dos divisiones, una de ellas es la rugosidad del alambre que realiza el proveedor del acero (molino) al hacer el decapado ácido. Un alambre liso es difícil de trefilar ya que disminuye el arrastre de lubricante y se pierde la película muy rápidamente o al incrementar la velocidad. Por otro lado, un alambre muy rugoso dañará muy rápidamente los herramientas para el trefilado o si la reducción de área es baja, quedarán marcas del decapado después de trefilar.

Mediante la experiencia de trabajo se ha encontrado que una rugosidad optima se encuentra en el valor de $Ra_{[\mu m]}=3.5$ y que el proceso es capaz de aceptar un rango de $Ra_{[\mu m]}=2.0$ a 5.0 siempre que se ajusten algunos parámetros como: limpieza ácida, cantidad de sal depositada, tiempo desde la deposición salina, velocidad de trefilado y el uso de lubricantes de mayor adherencia.

La segunda división se refiere a los “defectos superficiales”. Es decir, aquello que no es deseable tener, pero que se llega a presentar y es importante controlar.

Se puede observar en la figura 44 que se contemplan una serie de condiciones no deseables y se menciona como manejarlas.

Determinación por Análisis Superficial										
ID	Propiedad	Espec	Toleran	Por Colada		Distribución Gráfica	Usos Recomendados	Historica del Grado		
304-5.5mm-C12345-COGNE Aciaal Speciali	Rugosidad (Ra)	MIN	2.0	DESV PROM	3.7		Uso normal.	DESV PROM	3.7	
		MAX	5.0	MIN	3.7			MAX	3.8	
			DESV PROM	0.04	MAX	3.8				
	Defecto	Genero	Tipo	Dimension		Usos Recomendados / Procesos Alternos Requeridos				
	Defectos Superficiales	Hacia Adentro de la Superficie	Raspones	Profund. Defecto (mm)	3.7	RASPONES: Si la reducción de área es mayor que la profundidad del raspon, se debe reparar con mototool y piedra abrasiva suave. No usar con reducciones pequeñas. Considerar retirar la parte dañada y soldar nuevamente antes de trefilar.				
		Hacia Afuera de la Superficie	Bigote	Altura Defecto (mm)	3.7	GOLPES: Si la reducción de área es mayor que la profundidad del golpe, se debe reparar con mototool y piedra abrasiva suave. No usar con reducciones pequeñas (<15%). Considerar retirar la parte dañada y soldar nuevamente antes de trefilar.				
		Interno Expuesto en la Superficie	Fractura expuesta	Longitud Defecto (mm)	4	BIGOTE: Si es pequeño se puede trefilar con reducciones altas, si es grande se deberá quitar usando algun medio abrasivo. No trefilar sin retirar en caso de ser grande ya que se produzcan laminaciones.				
		Superficie	Otras deformidades	Defecto (mm)	3.7	OTRAS DEFORMIDADES: Revisar si son reparables por algun medio abrasivo.				
		Desprendimiento	Manchas de óxido	Area [%]	4	FRACTURA: Las fracturas no son aceptables en ningun caso.				
		Oxidación o Contaminación con Oxido	Picaduras	Area [%]	4	Calidad deberá evaluar si se puede usar parte del material o no y el procesos de inspección especial que se deberá seguir.				
Grasa		Polvo	Area [%]	4	DESPRENDIMIENTO:					
Polvo		Lodo	Area [%]	4						
Grasa										
Lodo										

Figura 43. Tabla” Determinación del Análisis Superficial”.

3.6. Rutas de Proceso Complementarias y Alternativas

Se tiene contemplado llevar a cabo procesos complementarios o rutas de procesos para complementar, minimizar y cuando sea posible corregir aquellas características o sus variaciones de forma que permitan procesar los materiales de una forma alternativa.

Esta forma no siempre será la más rápida, la más eficiente o la más económica; sino que están enfocada en aumentar la capacidad de procesar los materiales que presenten estas complicaciones. Sin embargo, habrá materiales que sean determinados desde la inspección recibo como materiales cuyos defectos hacen imposible el trefilado o dichos defectos no son corregibles (p.e. fracturas).

Se tienen contemplado formalizar el uso de los procesos siguientes, los cuales se deberán agregar a las rutas de procesos establecidas conforme se detecten materiales que les aplique:

1. Lavado con agua a presión
2. Lavado con ácido ligero
3. Retrabajo abrasivo manual
4. Reacondicionamiento abrasivo mecánico de la superficie
5. Revestimiento y secado en línea
6. Pre calentamiento

De los anteriores ya se están realizado del 1 al 3 debido a su facilidad y bajo costo. Sin embargo, los procesos del 4 al 6 requiere una inversión en equipo adicional que se está cotizando y se propondrá como parte de la inversión para el año siguiente.

3.7. Documentos del SGC Relacionados

Una vez que se termine la evaluación de este sistema, se hagan las correcciones pertinentes se harán las modificaciones a los documentos oficiales del Sistema de Gestión de Calidad con el fin que el uso, seguimiento y actualización de este sistema que formalmente establecido.

4. CONCLUSIONES

Anteriormente el sistema de inspecciones de la materia prima contemplaba solo realizar pruebas para determinar algunas de las características generales, creaba registros en papel y un registro muy sencillo en una hoja de cálculo. Este sistema, por un lado, no proporcionaba información suficiente para asignar los materiales de forma eficiente a los procesos. Además, al desconocer las condiciones específicas de los materiales, era difícil e ineficiente el tratar estos materiales de forma particular.

Por otro lado, la información almacenada en papel era completamente impráctica de manejar y la hoja de cálculo la mayor parte del tiempo no estaba actualizada o disponible.

Ahora con el uso de esta metodología se están realizando la mayor parte de las pruebas necesarias (dimensionales, mecánicas, químicas, físicas) de la forma que ayudan a determinar las condiciones en las que un material se recibe en la planta. Las pruebas que se hacen se deben registrar de forma detallada en la mayoría de las características que favorecen o afectan el trefilado de alambre. El registro de la información se mantiene de forma electrónica, fácil de consultar cuando se va a asignar a las órdenes de producción y muestra las condiciones específicas de cada material comparadas contra los estándares o contra datos de mejores datos históricos cuando no existe algún estándar de referencia.

Cuando se consulta el estado de un material en particular se obtiene también de esta forma las indicaciones de las operaciones complementarias necesarias que se deberán realizar para utilizar los materiales con variaciones. P.e. “lavar el material con solución desengrasante, para materiales manchados con grasa”.

Estas indicaciones se revisan y se programan como procesos complementarios desde la planificación de la orden y su ejecución. Se debe hacer la aclaración que los datos necesarios para este fin se irán recolectando conforme lleguen más materiales y conforme se revaliden los materiales que ya se tienen.

Actualmente se está revisando los documentos del Sistema de Gestión de Calidad con el fin de actualizarlos e incluir esta metodología como parte de los procesos estándares de la compañía.

Se están usando materiales de diversas fuentes desde hace ya meses o tal vez años con la intención de mejorar el desempeño económico de la compañía; sin embargo, su uso se ha incrementado aún más en los últimos meses. Esto permitirá de inmediato recolectar datos que permitan hacer estudios de tendencias y correlaciones. Además, se podrá validar las mejores prácticas y valores de control no experimentales.

Por otro lado, todo nuevo sistema y cambio en la forma de realizar una actividad toma tiempo en llevarse a cabo de forma estable y sistemática. Es por ello, que los resultados más representativos del beneficio de este sistema de reflejarán conforme se agreguen más y más datos.

5. PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del proyecto se encontraron algunos aspectos que será necesario mejorar y de los cuales se hace la propuesta a la Dirección.

Primeramente, el equipo de Pruebas Universales (para hacer las pruebas de tensión deformación) para este rango de diámetros solamente es capaz de arrojar como resultado el dato de carga máxima, pero no tiene la capacidad de arrojar los datos de carga y deformación durante la prueba, no cuenta con un extensómetro ni es capaz de ir midiendo la reducción del diámetro de la probeta.

La adquisición de un equipo adecuado podría dar información adicional valiosa como el Módulo de Elasticidad, el exponente y coeficiente de endurecimiento y permitiría trazar toda la curva Tensión – Deformación. Cabe mencionar que la Compañía cuenta con esta clase de equipos modernos para rangos de alambre menores, por lo que una opción menos conveniente pero más económica sería maquinar las probetas hasta llevarlas a un rango que pueda ser manejado por otra máquina.

Como segundo punto se deberán estudiar y estandarizar los procesos adicionales de forma que se determine las mejores prácticas y valores de proceso; determinando valores de control y mejores prácticas.

El tercer punto es poder integrar equipos de permitan hacer los procesos de “lijado superficial” y “revestimiento salino” en línea en conjunto con un “precalentador por inducción eléctrica” con el fin de determinar de forma experimental el beneficio en el grado de reducción o el ahorro en herramientas. Se estará presentando esta propuesta a la Dirección como parte de la inversión del año siguiente.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Catálogo de Productos*, Trefilados Inoxidables de México, Huamantla, TLX, México, 2020, pp. 6-11.
- [2] *Steel Glossary*, American Iron and Steel Institute (AISI) Archivado el 19 de octubre de 2008 en la Wayback Machine. (en inglés)
- [3] Tabla Periódica.Org, “*Elementos Periódicos*”, [En línea] Fecha de consulta 26 octubre 2020. Disponible en: <https://www.tablaperiodica.org/cromo/>
- [4] Mecasink Mecanizados de Precision, “*Capa-Pasiva-PAG*”, [En línea] Fecha de consulta 26 octubre 2020. Disponible en: <https://www.mecanizadossinc.com/mecanizado-acero-inoxidable/capa-pasiva-pag/>
- [5] Valbruna México. *Historia del Acero Inoxidable*. [En línea] Fecha de consulta: 2 octubre 2020. Disponible en: <http://valbruna.com.mx/historia-del-acero-inoxidable/>
- [6] British Stainless Steel Association. Making the Most of Stainless Steel. [En línea] Fecha de consulta: 20 marzo 2014. Disponible en: http://www.bssa.org.uk/about_stainless_steel.php?id=31
- [7] Metals Handbook, Desk Edition 2nd Ed., “Stainless Steels” Chapter”, [Pag 363-364]
- [8] SAE International. “*Metals & Alloys in the Unified Numbering System, 13th Edition*”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.sae.org/publications/books/content/hs-1086/2017/>
- [9] Steel Number. “*Equivalent Grades, Steel Worldwide Equivalent Grades*”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: http://www.steelnumber.com/en/equivalent_grades_eu.php
- [10] Prodermer, “*Aceros Inoxidables – Diagrama de Schaeffler*”, [En línea] Fecha de consulta: 06 Noviembre 2020, Disponible en: <https://prodermet.com/materiales-que-soldamos>
- [11] Thinsen Krups Fortinox, “*Productos Inoxidables*”, [En línea] Fecha de consulta: 06 Noviembre 2020, Disponible en: <http://www.tkfortinox.com/img/productos/inoxidables/>
- [12] Sumelinca. “*Turbinas de Vapor (Generación eléctrica)*”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <http://www.sumelinca.com/4.html>
- [13] Möven, “*Fábrica de Cubiertos de Acero Inoxidable en México*”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.moven.com.mx/tag/fabrica-de-cubiertos-de-acero-inoxidable-en-mexico/>
- [14] Basso S.A., “*Catálogo de Productos*”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <http://3bcatalogo.basso.com.ar/>
- [15] Geister, “*Catálogo*”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.geister.com/catalogs-es/>
- [16] SKF, “*Rodamientos de bolas a rótula*”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.skf.com/mx/products/rolling-bearings/ball-bearings/self-aligning-ball-bearings>
- [17] Ingersollrand, “*Brochure Compresores Serie-R*”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.ingersollrand.com/content/dam/ir-products/documentlibrary/Brochure/IRITS-0515-037%20SP%20LA%20201603%20NextGen%20R-Series%2030-37%20kW%20LR.pdf>
- [18] Sacome, “*Tubular Heat Exchangers / Shell and Tube Heat Exchanger*”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.sacome.com/en/tubular-heat-exchangers/>
- [19] Valbruna, “*Aceros Inoxidables Austeníticos*”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <http://valbruna.com.mx/clasificacion-de-los-acero-inoxidables/aceros-inoxidables-austeniticos/>
- [20] Arquitectura+Acero, “*Aceros Inoxidables*”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/materiales/aceros-inoxidables>

- [21] Lee Springs, “Resortes de Catálogo & Hechos a la Medida”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.leespring.mx/es>
- [22] Wilson Stainless, “Conexiones Fundidas”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://wilsonstainless.com/conexiones-fundidas/>
- [23] Hans Hydraulic & Pneumatic Systems, “Parker High Pressure Thermoplastic Hydraulic Hose”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.hanshydraulics.com/parker-high-pressure-thermoplastic-hydraulic-hose.html>
- [24] Nutec Bickley, “Instalación de 17 hornos de alta y baja temperatura”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.nutecbickley.com/es/proyectos-recientes-y-casos-de-exitos/instalacion-de-17-hornos-alta-baja-temperatura>
- [25] Valbruna México. “Aceros Inoxidables Duplex”. [En línea] Fecha de consulta: 06 noviembre 2020. Disponible en: <http://valbruna.com.mx/clasificacion-de-los-acero-inoxidables/aceros-inoxidables-duplex/>
- [26] AAEMI Training, “Oil and Gas”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.aaemitraining.com/course/oil-and-gas/>
- [27] Wonder Latvia, “Pulp and Paper”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.wonderware.lv/solutions/pulp-and-paper/>
- [28] Concepto Definición, “Petroquímica”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://conceptodefinicion.de/petroquimica/>
- [29] Precision Machined Products Association, “Dimensional Contraction of 17-4 PH Stainless Steel”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://pmpaspeakingofprecision.com/2012/02/28/dimensional-contraction-of-17-4-ph-stainless-steel/>
- [30] InterEmpresas, Aeronautica, “Proceso robusto de mecanizado de piezas de turbomaquinaria”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/137726-Proceso-robusto-de-mecanizado-de-piezas-de-turbomaquinaria.html>
- [31] Manufacturing Guide, “Deep Drawing”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.manufacturingguide.com/en/deep-drawing>
- [32] Esteves Group, “Shape Dies”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.estevesgroup.com/products/wire-drawing-dies/shaping-dies>
- [33] EuroRolls S.p.a., “Welded Tube”. [En línea] Fecha de consulta: 02 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.eurolls.com/en/products/rolls-accessories-tube-industry/welded-tube>
- [34] Vollrath Manufacturing Services, “Deep Draw Stamping and Annealing in Action”. [En línea] Fecha de consulta: 03 diciembre 2020. Disponible en: <https://vollrathmanufacturing.com/OEM-Capabilities/Deep-Draw-Stamping-Annealing>
- [35] Precision Kidd Steel Compani, Inc., “Custom Engineered Special Steel Profile Shapes”. [En línea] Fecha de consulta: 03 diciembre 2020. Disponible en: https://www.precisionkidd.com/special_shapes.htm
- [36] Cogne Acciai Speciali S.p.a., “Prodotti, Stainless Steel Bars, Cold Drawn, ”. [En línea] Fecha de consulta: 03 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.cogne.com/en/prodotti/barre-inox/>
- [37] MFL Group, “Mario Frigerio, Market’s Benchmark ”. [En línea] Fecha de consulta: 03 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.mflgroup.com/EN/brand/mario-frigerio>
- [38] Cogne Acciai Speciali S.p.a., “Semifinished Product”. [En línea] Fecha de consulta: 03 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.cogne.com/en/prodotti/prodotti-semifiniti-inox/>
- [39] FRISA, “Anillos Rolados”. [En línea] Fecha de consulta: 03 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.frisa.com/es/productos/anillos-rolados.html>

- [40] Arcelor Mittal, *"Product Application: Cold Heading"*. [En línea] Fecha de consulta: 03 diciembre 2020. Disponible en: <https://barsandrods.arcelormittal.com/productsapplications/2755/coldheading>
- [41] Profiles Inc., *"Capabilities"*. [En línea] Fecha de consulta: 03 diciembre 2020. Disponible en: http://www.profiles-inc.com/capabilities_coldrawing.html
- [42] Maquinados y Cobres Especiales, *"Acero Inoxidable"*. [En línea] Fecha de consulta: 03 diciembre 2020. Disponible en: https://www.mcemty.com/articulo.php?a_id=3
- [43] Ju Feng Special Steel, *"Servicio de Fresado CNC"*. [En línea] Fecha de consulta: 04 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.ifs-steel.com/es/OEM-service/Servicio-de-fresado-CNC/OEM-CNC-milling.html>
- [44] Temples Industriales Alcalá, S.L., *"Temple y Revenido"*. [En línea] Fecha de consulta: 04 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.templesindustrialescalca.es/temple-y-revenido/>
- [45] Temples Industriales Alcalá, S.L., *"Temple por Inducción"*. [En línea] Fecha de consulta: 04 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.templesindustrialescalca.es/temple-por-induccion/>
- [46] India Mart, *"Quenching Oil"*. [En línea] Fecha de consulta: 04 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.indiamart.com/proddetail/quenching-oil-15261074473.html>
- [47] HLQ INDUCTION EQUIPMENT CO., LTD, *"Induction Preheating and Post Welding"*. [En línea] Fecha de consulta: 04 diciembre 2020. Disponible en: <https://dw-inductionheater.com/Post-Welding-Stress-Relieving.html>
- [48] Welding Answers, *"Rainbow Colors in Stainless Steel Welding"*. [En línea] Fecha de consulta: 04 diciembre 2020. Disponible en: <https://weldinganswers.com/rainbow-colors-in-stainless-steel-welding/>
- [49] CX Magazine, *"Soma Fab's stainless steel Triple Cross disc brake cyclocross bike"*. [En línea] Fecha de consulta: 04 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.cxmagazine.com/soma-fabrications-triple-cross-stainless-cyclocross-2014/soma-fabs-stainless-steel-triple-cross-disc-brake-cyclocross-bike-cyclocross-magazine-2>
- [50] Laserline GmbH, *"Keyhole laser welding - the method"*. [En línea] Fecha de consulta: 04 diciembre 2020. Disponible en: <https://www.laserline.com/en-int/keyhole-welding/>
- [51] Carlos Vila Pastor, Fernando Romero Subirón, Gracia M. Bruscas Bellido y Julio Serrano Mira, Tecnología Mecánica: Metrología y procesos de conformado de metales sin arranque de viruta". Colección «Materiales» de la UJI, n.º 233.
- [52] MiSUMi Mech Lab, *"A Standard Comparison: JIS vs. AISI/UNS"*, [En línea] Fecha de consulta: 26 October 2020, Disponible en: <https://blog.misumiusa.com/jis-standard-steel-vs-aisi-sae-uns-material-equivalent/>
- [53] ASTM International, Designation: A 555/A 555M – 97, *"Standard Specification for General Requirements for Stainless Steel Wire and Wire Rods"*. American National Standard, 1997.
- [54] Illinois Tool Works Inc. (Instron®), *"Glosario: Resistencia Máxima"*, [En línea] Fecha de consulta: 25 Marzo 2021, Disponible en: <https://www.instron.com.ar/es-ar/our-company/library/glossary/u/ultimate-strength>