

### **CAPÍTULO 3.**

## **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS - MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES DEL MATERIAL INICIAL**

---

Este capítulo contiene una descripción de las características del material inicial. En la fabricación de tubo de escape son utilizadas tiras de acero inoxidable ferrítico AISI 409 como materia prima. El material en esta condición, es el tema de estudio del presente capítulo. De manera esquemática, se presenta primeramente la composición del material, sus propiedades físicas y sus propiedades mecánicas. Posteriormente se presenta el resultado de las pruebas experimentales efectuadas sobre el material para describirlo microestructuralmente; se presentan las condiciones bajo las cuales se efectuó el análisis, así como la interpretación de las metalografías arrojadas por la prueba.

### **3. 1. Características de los Aceros Inoxidables**

La elección del material inicial en cualquier proceso de fabricación está en función de los requerimientos especificados para el producto final. Estos requerimientos son determinados de acuerdo a las funciones establecidas para el producto y a sus condiciones de operación. De este modo, las propiedades mecánicas del acero inoxidable usado en la fabricación del tubo de escape para la industria automotriz representan atributos deseados para el correcto funcionamiento del producto.

En el caso de productos planos de acero inoxidable que son fabricados a través de un proceso de rolado, generalmente, las propiedades especificadas son resistencia a la

tensión, resistencia de cedencia, porcentaje de elongación y dureza. En ocasiones, también son requeridos valores específicos de resistencia al impacto. Por su parte, en la fabricación de barras, tubos, etc., generalmente se requieren al menos valores específicos para resistencia a la tensión y resistencia de cedencia. El cumplimiento con las propiedades especificadas garantiza que el material ha sido producido correctamente y dichos valores son utilizados para determinar las cargas de trabajo y presión permisibles para poner al producto en servicio dentro de un margen de seguridad.

Al referirse al acero inoxidable no se puede considerar una única aleación, pues existe una gran familia de aleaciones contenidas bajo este tipo de acero cada uno con diferentes propiedades. Existen numerosas clasificaciones de aceros inoxidables, cada una de ellas con propiedades diseñadas de acuerdo a la aplicación. Aunque el elemento principal es el hierro, por tratarse de un acero (50% mín.); el elemento clave que diferencia al grupo de los inoxidables de los demás aceros es el cromo, el cual debe encontrarse presente en al menos 10.5% y con un límite superior de 30%. La presencia de cromo en esta aleación proporciona resistencia a la corrosión en el material, al formar una película delgada compuesta principalmente de óxido de cromo que previene la difusión del oxígeno más allá de esta película, hacia el metal base.

El acero inoxidable se clasifica en cinco grupos principales que representan cuatro distintos tipos de aleaciones basadas en sus estructuras cristalográficas características y un tipo basado en el tratamiento térmico usado [9]:

- Aceros inoxidables ferríticos
- Aceros inoxidables martensíticos
- Aceros inoxidables austeníticos

- Aceros inoxidables duplex
- Aceros inoxidables endurecidos por precipitación

### **3. 2. Características Físicas y Mecánicas del Acero Inoxidable AISI 409**

El acero inoxidable ferrítico 409 utilizado en este caso en la fabricación de tubo de escape para la industria automotriz fue introducido con el objetivo de proveer una resistencia a la oxidación y a la corrosión mejorada en comparación con los aceros al carbón. El uso final de la aleación es específicamente la industria automotriz. Otras ventajas del acero inoxidable tipo 409, además de su resistencia básica a la corrosión, son su buena manufacturabilidad y economía en su uso [10].

Desde su introducción el acero inoxidable ferrítico AISI 409 ha sido ampliamente utilizado en sistemas de extracción automotriz, tubos de escape, convertidores catalíticos, mofles, entre otros. Algunas otras aplicaciones fuera del sector automotriz son los sistemas de calefacción doméstica, termostatos, filtros de combustible, tubos para intercambiadores de calor, etc.

#### **3.2.1. Composición**

El AISI 409 al tratarse de un acero inoxidable contiene como tercer elemento principal, después del hierro y el carbono, al cromo que le proporciona la característica de resistencia a la oxidación. Otros elementos como los mencionados en la tabla 3.1 son añadidos para proporcionar propiedades tales como: resistencia a la oxidación a altas temperaturas, resistencia al ácido sulfúrico, alta ductilidad, resistencia a deformación a altas

temperaturas, resistencia a la abrasión, etc. La tabla 3.1 muestra los porcentajes en peso de los elementos que componen al acero AISI 409, en su condición de lámina recocida.

**Tabla 3.1 Composición en Peso para el Acero Inoxidable Ferrítico AISI 409 [11]**

Componente	% en Peso
Carbono, C	0.08 máx
Cromo, Cr	11.13
Hierro, Fe	86
Manganeso, Mn	1 máx
Fosforo, P	0.05 máx
Azufre, S	0.05 máx
Silicio, Si	1 máx
Titanio, Ti	0.75

### 3.2.2. Propiedades Mecánicas y Físicas

Entre las principales propiedades mecánicas definidas para el acero AISI 409 se pueden mencionar el esfuerzo a la ruptura, la resistencia a la fatiga, y la resistencia a la corrosión, entre otras. La Tabla 3.2 muestra los valores típicos para las principales propiedades mecánicas del acero inoxidable ferrítico AISI 409, en su condición de lámina recocida.

**Tabla 3.2 Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable Ferrítico AISI 409 [11]**

Propiedad Mecánica	Valor	Comentario
Dureza Brinell	131	
Dureza Knoop	146	
Dureza Rockwell B	75	
Dureza Vickers	140	
Resistencia Última a Tensión, MPa	450	
Resistencia de Cedencia a Tensión, MPa	240	a 0.2% offset
Máxima elongación de ruptura, %	25	en 50 mm
Módulo de elasticidad, GPa	200	

La Tabla 3.3 muestra los valores estándares para las principales propiedades físicas del acero inoxidable ferrítico AISI 409, en su condición de lámina recocida.

**Tabla 3.3 Propiedades Físicas del Acero Inoxidable Ferrítico AISI 409 [11]**

Propiedad Física	Valor	Comentario
Densidad, g/cc	7.8	
Resistividad eléctrica, ohm-cm	0.00006	a 20°C
CET, lineal 20°C, $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	11.7	entre 20-100°C
CET, lineal 250°C, $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	11.9	entre 20-260°C, 12.4 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ a 20-480°C
CET, lineal 500°C, $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	12.9	entre 20-650°C, 13.5 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ a 20-815°C
Capacidad Calorífica, J/g-°C	0.46	desde 0-100°C
Conductividad Térmica, W/m-K	24.9	a 95°C; 28.6 W/m-K a 540°C
Punto de Fusión, °C	1425-1510	

### 3.3. Características Microestructurales del Acero Inoxidable AISI 409

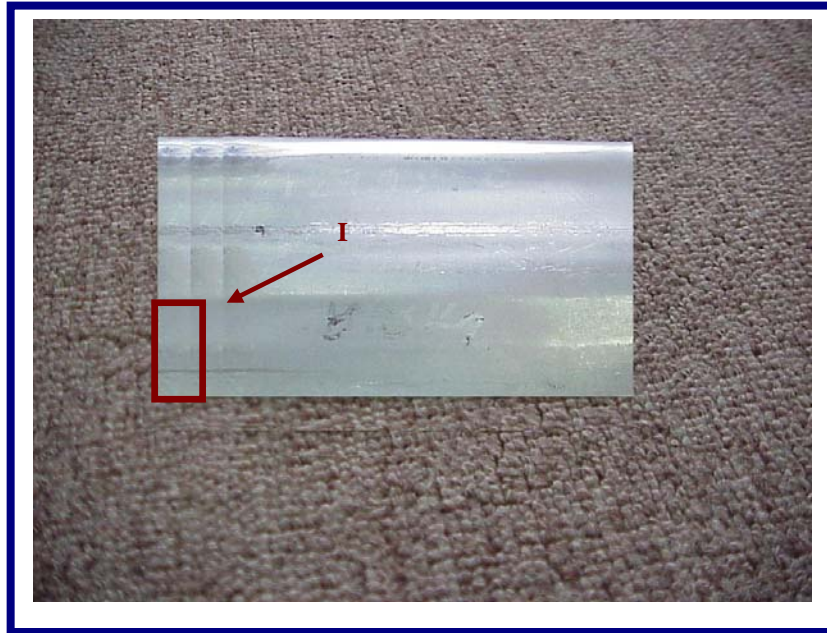
Las características deseadas en un producto dependen de su fabricación, ésto es, tanto del material utilizado como de los procesos aplicados al material; ambos aspectos determinan las propiedades mecánicas de la pieza, las cuales a su vez dependen de la constitución o microestructura del material. El acero inoxidable AISI 409 se caracteriza por una fase microestructural ferrítica simple. Tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (bcc) de hierro alfa. De acuerdo con su composición, la matriz de ferrita ( $\alpha$ ) puede tener entre 1 de cada 8 y 1 de cada 3 sustituciones por átomos de cromo. Del mismo modo, existirá un pequeño número de átomos de manganeso y de otros elementos sustituyendo

algunos átomos de hierro. Se encuentran, además, átomos de carbono presentes, algunos de los cuales toman posiciones intersticiales; algunos otros forman carburos, los cuales pueden estar presentes tanto en los granos como en las fronteras de grano [12].

Una metalografía tiene como objetivo conocer la microestructura del material, para observar los arreglos cristalinos de un metal, una sección del material debe ser observada a través de un microscopio metalográfico, no sin antes efectuar una preparación de la pieza. La técnica y equipo usado para el montaje, lijado y pulido de una muestra seccionada de acero inoxidable para una examinación metalográfica posterior, son esencialmente similares a las de todos los aceros al carbono y aleaciones de hierro. Las muestras requieren un pulido grueso, un pulido fino, un semi-acabado y un acabado a espejo previo al ataque químico. Una vez efectuados esos pasos, la muestra estará lista para ser observada bajo el microscopio y posteriormente efectuar el análisis microestructural.

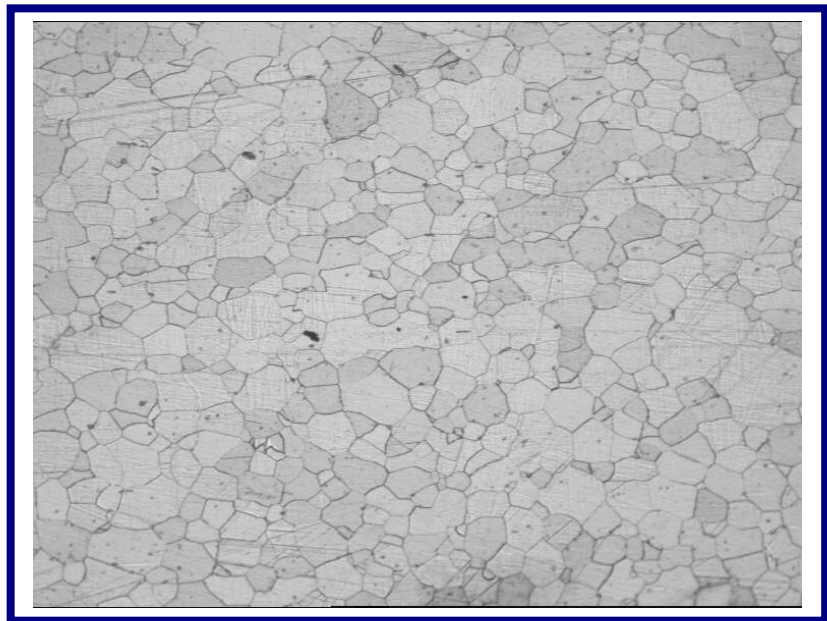
### **3. 4. Metodología del Experimento**

La microestructura en la etapa inicial de fabricación del tubo de escape fue estudiada al seleccionar una muestra de la sección transversal y una muestra de la sección longitudinal del material inicial. Cada una de estas muestras fue preparada de acuerdo con la técnica de preparación de muestras metalográficas expuesta en el Apéndice A. El criterio de selección consistió en contar con material que sirva como base para comparación contra las secciones estudiadas en procesos posteriores en la fabricación de la pieza. La sustancia de ataque utilizada fue reactivo de Vilella, cuya composición también se detalla en el Apéndice A. El tiempo de ataque de las muestras fue de 60 segundos. La escala de aumento utilizada fue de 100X. La figura 3.1 muestra la ubicación de las muestras estudiadas sobre el material inicial:

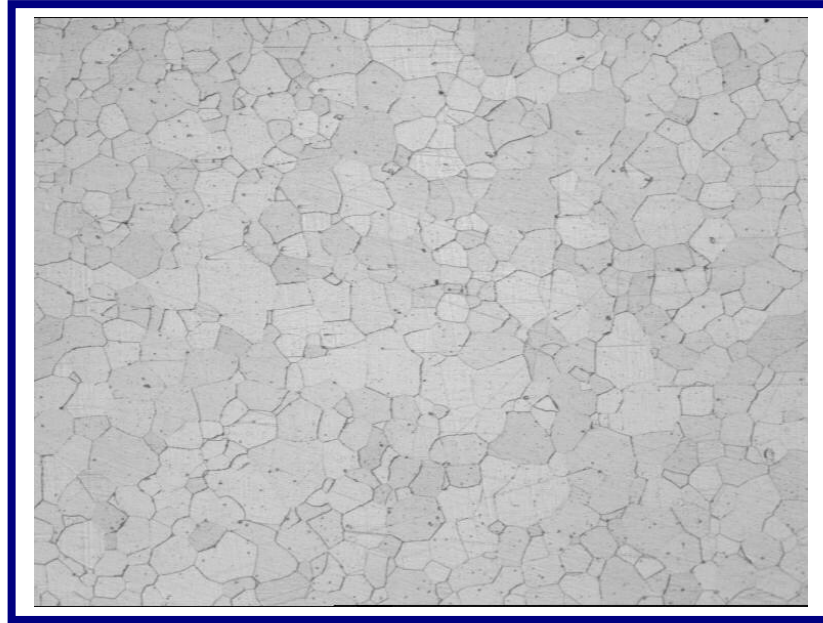


**Figura 3.1 Ubicación de Muestras Estudiadas sobre el Material Inicial**

A continuación se muestran las imágenes observadas en el microscopio para cada una de las muestras mencionadas:



**Figura 3.2 Microestructura de Muestra I1 en Sección Transversal  
Ataque con Reactivo de Vilella . 100X**



**Figura 3.3 Microestructura de Muestra I2 en Sección Longitudinal  
Ataque con Reactivo de Vilella. 100X**

En las figuras 3.2 y 3.3, tanto la sección transversal I1, como la sección longitudinal I2 presentan fronteras de grano bien definidas, con granos con formas regulares y redondeadas. Es posible distinguir la presencia de la matriz ferrítica y algunas precipitaciones de carburos.

La dureza del material inicial fue evaluada experimentalmente, obteniendo valores en escala de dureza RB. Cabe mencionar que el valor teórico de dureza Rockwell B del acero inoxidable AISI 409 es de 75. La tabla 3.4 muestra los valores de dureza medidos sobre el material inicial.

**Tabla 3.4 Dureza Rockwell B sobre Material Inicial**

Valores de Dureza	Promedio
69, 70, 69, 71, 70, 69, 70, 72, 71, 70	70.1