

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño de un proceso térmico para la mejora mecánica de tubos industriales de  
acero.

INGE-3132

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Materiales**

Presentado por:

Christian Guillermo Narvaez Saavedra

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

## Dedicatoria

---

El presente proyecto se lo dedico a mis padres, Christian Narvaez y Arellis Saavedra, a mis abuelos, Guillermo Saavedra y Carmen López, a mi tío, Guillermo Saavedra y a mis hermanos, Gabriel Narvaez e Isaías Narvaez, por haber sido el pilar fundamental durante mi etapa académica y profesional. Este logro es producto de su sacrificio, dedicación y apoyo hacia mí.

## Agradecimientos

---

Mi más sincero agradecimiento a los profesores de la carrera de IMAT, quienes contribuyeron en la adquisición de los conocimientos necesarios para realizar este proyecto, especialmente, para la profesora Demis Cabrera, quien fue mi guía como mi tutora en la elaboración de este trabajo.

Mi más sincero agradecimiento a la empresa facilitadora del tema y equipos para realizar los ensayos. En especial, a la jefa del departamento de Calidad y al Ingeniero a cargo del laboratorio técnico de calidad por su predisposición y ayuda.

## Declaración Expresa

---

Yo, Christian Guillermo Narvaez Saavedra, acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 19 de enero del 2025.

  
\_\_\_\_\_  
Christian Guillermo Narvaez Saavedra

## **Evaluadores**

---

Julian Peña Estrella, MSc.

**Profesor de Materia**

---

Demis Adriana Cabrera Alava, MSc.

**Tutor de proyecto**

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar y evaluar un proceso de tratamiento térmico aplicado a tubos de acero galvanizado soldados, con el fin de incrementar su confiabilidad mecánica y reducir la ocurrencia de fallas durante un proceso posterior de trefilado. Se plantea como hipótesis que un tratamiento térmico subcrítico de alivio de tensiones permite homogenizar el comportamiento mecánico del material, atenuando el historial previo de deformación plástica y endurecimiento por trabajo en frío, particularmente en zonas críticas como el cordón de soldadura y la zona afectada por el calor.

El desarrollo se realizó mediante la aplicación de distintos tratamientos térmicos en un rango de temperaturas entre 275 °C y 325 °C y diferentes tiempos de permanencia, empleando un horno de calentamiento controlado. La evaluación del material se llevó a cabo mediante ensayos metalográficos, mecánicos y análisis estadístico de los resultados, complementados con modelos de estimación predictiva.

Los resultados mostraron que el tratamiento reduce las gradientes microestructurales y mejora la homogeneidad del tubo, disminuyendo significativamente la probabilidad de falla durante un proceso de trefilado. Finalmente, se concluye que la condición de 300 °C durante 30 minutos representa el mejor equilibrio entre resistencia y ductilidad, siendo técnica, estadística y económicamente viable para su implementación industrial.

**Palabras Clave:** Alivio de tensiones residuales; Endurecimiento por deformación; Ductilidad; Homogeneidad microestructural.

## ***Abstract***

*The present study aims to design and evaluate a heat treatment process applied to welded galvanized steel tubes to improve their mechanical reliability and reduce the occurrence of failures during a subsequent drawing process. The working hypothesis states that a subcritical stress-relief heat treatment enables a more homogenous mechanical response by attenuating the previous history of plastic deformation and work hardening, particularly in critical regions such as the weld seam and the heat-affected zone.*

*The experimental development was carried by applying different heat treatment conditions within a temperature range between 275 °C and 325 °C and varying holding times, using controlled heating furnace. The material response was assessed through metallographic and mechanical testing, complemented by statistical analysis and predictive estimation models.*

*The results demonstrated that the heat treatment effectively reduced microstructural gradients and improved mechanical homogeneity throughout the tube, significantly decreasing the likelihood of failure during the drawing operation. It is therefore concluded that the heat treatment condition of 300 °C for 30 minutes provides the most favorable balance between strength and ductility, being technically, statistically and economically suitable for industrial implementation.*

*Keywords: Residual stress relief; Strain hardening; Ductility; Microstructural homogeneity.*

## *Índice general*

Capítulo 1	18
1. Introducción	18
1.1. Descripción del problema	19
1.2. Justificación del problema	19
1.3. Objetivos	20
1.3.1. Objetivo general	20
1.3.2. Objetivos específicos	20
1.4. Marco teórico	21
1.4.1. Los aceros	21
1.4.2. Procesos de manufactura	22
1.4.3. Soldadura	23
1.4.3.1. Microestructura post-soldadura	25
1.4.4. Tratamientos térmicos	26
1.4.5. Propiedades mecánicas	27
1.4.6. Técnicas de caracterización y ensayos mecánicos	29
Capítulo 2	31
2. Metodología	31
2.1. Descripción general del estudio	31
2.2. Selección y preparación de muestras	31

2.3.	Ensayos mecánicos	32
2.3.1.	Ensayo de tracción	32
2.3.2.	Ensayo de abocardado	33
2.4.	Caracterización metalográfica	34
2.4.1.	Preparación de las probetas	34
2.4.2.	Observación y análisis	35
2.5.	Ensayo de tracción de probetas No Tratadas	35
2.6.	Metalografía de las muestras No Tratadas	37
2.6.1.	Muestra 1	37
2.6.2.	Muestra 2	38
2.6.3.	Muestra 3	39
2.7.	Tratamiento térmico y ensayos mecánicos.	40
2.7.1.	Tratamiento térmico 1.	41
2.7.2.	Tratamiento térmico 2.	43
2.7.3.	Tratamiento térmico 3.	46
2.7.4.	Tratamiento térmico 4.	47
2.7.5.	Tratamiento térmico 5.	48
2.7.6.	Tratamiento térmico 6.	49
2.7.7.	Tratamiento térmico 7.	50
2.8.	Herramientas de visualización	50

Capítulo 3	51
3. Análisis de resultados	51
3.1. Análisis mecánico	51
3.2. Análisis estadístico.	57
3.2.1. Prueba F	57
3.2.2. Coeficiente de variación	58
3.2.3. Modelos lineales simples	58
3.2.4. Influencia del tratamiento térmico en la elongación	59
3.2.5. Influencia del tratamiento térmico en la resistencia a la tracción	60
3.2.6. ANOVA	60
3.2.7. Modelos RSM	60
3.2.8. Discusión estadística/metalúrgica	63
3.3. Estimación numérica con Python	63
3.4. Decisión	66
3.5. Análisis económico	67
Capítulo 4	72
4. Conclusiones y recomendaciones	72
4.1. Conclusiones	72
4.2. Recomendaciones	73
Referencias	74



## **Abreviaturas**

ASTM American Society for Testing and Materials

INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

## Simbología

°C    grados Celsius

Hz    Hercio

kW    kilowatts

mm    Milímetro

MPa    Megapascal

V    Voltaje

## Índice de figuras

FIGURA 1: PROCESO DE CONFORMADO DE LOS TUBOS [2]	23
FIGURA 2: DIAGRAMA DE FASES PARA ACEROS [18]	27
FIGURA 3: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN [1].	28
FIGURA 4: EFECTO DEL ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN [1]	29
FIGURA 5: PROBETAS	32
FIGURA 6: ENSAYO DE TRACCIÓN	33
FIGURA 7: ENSAYO DE ABOCARDADO	34
FIGURA 8: PROBETAS PARA METALOGRAFÍA	34
FIGURA 9: VISUALIZACIÓN METALOGRÁFICA	35
FIGURA 10: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE LA MUESTRA 1	36
FIGURA 11: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MUESTRA 2	36
FIGURA 12: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MUESTRA 3	37
FIGURA 13: METALOGRAFÍA MUESTRA 1	37
FIGURA 14: METALOGRAFÍA MUESTRA 1	37
FIGURA 15: METALOGRAFÍA MUESTRA 1	38
FIGURA 16: METALOGRAFÍA MUESTRA 2	38
FIGURA 17: METALOGRAFÍA MUESTRA 3	39
FIGURA 18: METALOGRAFÍA MUESTRA 3	39
FIGURA 19: METALOGRAFÍA MUESTRA 3	40
FIGURA 20: METALOGRAFÍA MUESTRA 3	40
FIGURA 21: TRATAMIENTO TÉRMICO 1	41

FIGURA 22: METALOGRAFÍA MUESTRA 1 TT	41
FIGURA 23: METALOGRAFÍA MUESTRA 1 TT	42
FIGURA 24: METALOGRAFÍA MUESTRA 1 TT	42
FIGURA 25: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MUESTRA 1 TT	43
FIGURA 26: TRATAMIENTO TÉRMICO 2	43
FIGURA 27: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MUESTRA 2 TT	44
FIGURA 28: METALOGRAFÍA MUESTRA 2 TT	44
FIGURA 29: METALOGRAFÍA MUESTRA 2 TT	45
FIGURA 30: METALOGRAFÍA MUESTRA 2 TT	45
FIGURA 31: TRATAMIENTO TÉRMICO 3	46
FIGURA 32: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MUESTRA 3 TT	46
FIGURA 33: TRATAMIENTO TÉRMICO 4	47
FIGURA 34: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MUESTRA 4 TT	47
FIGURA 35: TRATAMIENTO TÉRMICO 5	48
FIGURA 36: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MUESTRA 5 TT	48
FIGURA 37: TRATAMIENTO TÉRMICO 6	49
FIGURA 38: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MUESTRA 6 TT	49
FIGURA 39: TRATAMIENTO TÉRMICO 7	50
FIGURA 40: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN MUESTRA 7 TT	50
FIGURA 41: ELONGACIÓN SEGÚN CONDICIÓN DE TRATAMIENTO	52
FIGURA 42: FLUENCIA SEGÚN CONDICIÓN DE TRATAMIENTO	53
FIGURA 43: TRACCIÓN SEGÚN CONDICIÓN DE TRATAMIENTO	53
FIGURA 44: FLUENCIA SEGÚN TRATAMIENTO	54

FIGURA 45: RESISTENCIA A LA TRACCIÓN SEGÚN TRATAMIENTO	55
FIGURA 46: ELONGACIÓN SEGÚN TRATAMIENTO	56
FIGURA 47: SUPERFICIE DE RESPUESTA: FLUENCIA	61
FIGURA 48: RESPUESTA (FLUENCIA) SEGÚN FACTORES	61
FIGURA 49: SUPERFICIE DE RESPUESTA (ELONGACIÓN)	62
FIGURA 50: RESPUESTA (ELONGACIÓN) SEGÚN FACTORES	62
FIGURA 51: SUPERFICIE DE RESPUESTA (TRACCIÓN)	62
FIGURA 52: RESPUESTA (TRACCIÓN) SEGÚN FACTORES	63
FIGURA 53: ESTIMACIÓN COMPORTAMIENTO DE LA FLUENCIA A 300°C	64
FIGURA 54: ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA ELONGACIÓN A 300°C	65
FIGURA 55: MODELO 3D ELONGACIÓN	66
FIGURA 56: MODELO 3D FLUENCIA	66

## Índice de tablas

TABLA 1: CANTIDAD DE PROBETAS PARA ENSAYOS	32
TABLA 2: RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN	51
TABLA 3: FLUJO DE CAJA USD	69

# Capítulo 1

## 1. Introducción

El acero es uno de los materiales más utilizados en la industria debido a su alta resistencia mecánica, versatilidad y facilidad de manufactura. Su combinación de propiedades lo convierten en un material aplicable a la construcción civil, automotriz, fabricación de componentes sometidos a esfuerzos mecánicos severos, como tuberías de transporte de fluidos. En estos sistemas, el acero depende de su composición química, procesos de conformado, soldabilidad y tratamientos térmicos [1].

Entre las múltiples aplicaciones del acero, la fabricación de tubos soldados conforma gran parte de la industria metalmecánica. Estos materiales son utilizados para la conducción de gases, líquidos y otros fluidos bajo presión, además de emplearse en estructuras industriales y sistemas de distribución. Su proceso de manufactura, basado en la transformación de aceros laminados hasta obtener geometrías tubulares por procesos de deformación plástica, ha permitido el desarrollo de líneas de producción continuas. Sin embargo, las diversas etapas involucradas en la fabricación -como el conformado, soldadura y tratamientos térmicos- pueden influir directamente en el desempeño del material durante el servicio [2].

En este contexto, el control metalúrgico dentro de la manufactura de tubos de acero permite describir la influencia de la composición química, control de temperaturas, velocidades de proceso y aplicación de tratamientos térmicos para conseguir una característica específica en cuanto a la relación microestructura-propiedades. A su vez, permite prevenir fallos por tensiones residuales, pérdida de

ductilidad o zonas con diferencia resistencia y dureza, afectando el desempeño del tubo durante su operación [3].

La motivación de este estudio surge de la necesidad de optimizar el comportamiento del material al aplicarse un tratamiento térmico, para mejorar sus propiedades mecánicas sin comprometer las especificaciones de servicio, contribuyendo al control de calidad.

### **1.1. Descripción del problema**

Asegurar el correcto funcionamiento de tuberías para aplicaciones de fluidos es un parámetro crítico en su comercialización, ya que un proceso de manufactura inadecuado puede comprometer directamente la integridad mecánica del material. La falta de control en aspectos como la formación del cordón de soldadura y el comportamiento de la zona afectada por el calor (ZAC) genera fallas prematuras que disminuyen la confiabilidad del producto y elevan riesgos de accidentes durante su servicio. Estas condiciones no solo afectan la seguridad en el uso final, sino también representan pérdidas económicas para la empresa por devoluciones, desviaciones y deterioro de los materiales. Actualmente, la ausencia de un proceso de tratamiento térmico estandarizado que elimine tensiones residuales y mejore la homogeneidad microestructural impide garantizar un desempeño mecánico óptimo en los tubos de acero ofrecidos.

### **1.2. Justificación del problema**

La presencia de fallas en cordones de soldadura y zonas adyacentes refleja deficiencias en las propiedades del material entregado. Estas fallas pueden estar

relacionadas con tensiones residuales, heterogeneidad en la microestructura y baja tenacidad, producto del área soldada y proceso de conformado del tubo. Actualmente, la empresa produce 45.70 toneladas de acero mensuales [4], de las cuales aproximadamente 6.92% [5] se desperdician en el conformado de tubos, lo que representa cerca de 3.16 toneladas de material perdido en cada producción.

Por tal razón, la implementación de un tratamiento térmico adecuado, como el recocido, normalizado o el revenido, permitirá mejorar la estabilidad estructural del acero, incrementando su resistencia al agrietamiento y reduciendo la concentración de esfuerzos, de tal manera que la empresa elevará la calidad de su producto, asegurando el cumplimiento de estándares industriales, alineándose con principios de mejora continua y competitividad.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Diseñar un proceso de tratamiento térmico para tubos de acero que incremente sus propiedades mecánicas y reduzca la ocurrencia de fallas en las zonas críticas del material.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Analizar las fallas presentadas en el cordón de soldadura y ZAC mediante ensayos metalográficos y mecánicos.
- Identificar parámetros de tratamientos térmicos adecuados (temperatura, tiempo y medio de enfriamiento) para mejorar la homogeneidad estructural.

- Evaluar la respuesta del material tratado mediante ensayos de tracción y metalografía.
- Establecer un protocolo reproducible y escalable para la manufactura industrial de tubos.
- Evaluar, mediante la aplicación de técnicas estadísticas, la significancia de los resultados obtenidos en el proceso productivo.

## **1.4. Marco teórico**

### **1.4.1. Los aceros**

Los aceros son aleaciones principalmente de hierro (Fe) y carbono (C), cuyo contenido de este último generalmente varía entre 0,02% y 2,0% en peso.

Dependiendo de su composición química, se clasifican en aceros de bajo, medio y alto carbono, así como aceros aleados, inoxidable y para herramientas [1]. En función de su tratamiento térmico y su composición, estas aleaciones pueden desarrollar una amplia gama de propiedades microestructurales y mecánicas, que determinan su comportamiento durante un servicio.

El diagrama de fases hierro-carbono  $Fe - Fe_3C$ , constituye una herramienta para comprender las transformaciones que experimentan los aceros durante los tratamientos térmicos. A partir de este diagrama se pueden predecir las microestructuras resultantes -ferrita, perlita, bainita o martensita- y, por ende, las propiedades mecánicas que adquiere el material tras los ciclos de calentamiento y enfriamiento [1].

Los aceros presentan un rango de aplicaciones industriales, que incluyen los sectores de la construcción, automotriz, doméstico y energético. En particular, los

tubos de acero soldados se emplean ampliamente en el transporte de fluidos -como agua, gas, petróleo y otros hidrocarburos- debido a su combinación de resistencia, ductilidad, soldabilidad y tenacidad [6] [7].

En condiciones normales de entrega, la microestructural de estos aceros se compone típicamente de una mezcla de ferrita y perlita fina [8], que proporciona un equilibrio entre resistencia y ductilidad. La ferrita se encarga de contribuir a la deformación plástica y tenacidad, mientras que la perlita -constituida por láminas de ferrita y cementita- aporta a la resistencia mecánica [1].

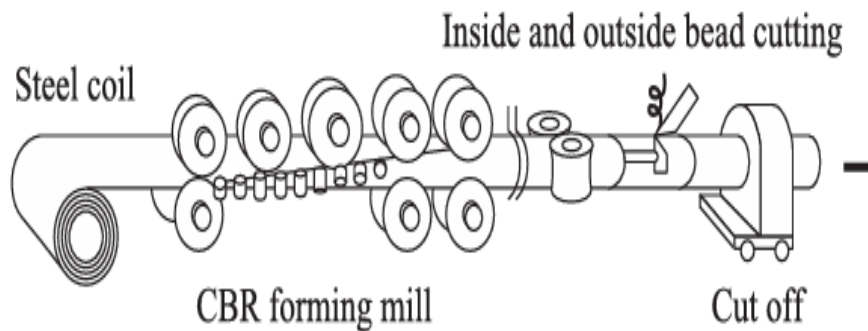
En caso de tuberías sometidas a presión interna, como gasoductos o líneas de transporte de fluidos, se consideran la resistencia mecánica frente a esfuerzos circunferenciales y resistencia a la fatiga, dado que las paredes del tubo se someten a cargas cíclicas debido a las variaciones de presión interna, lo que puede inducir la nucleación y propagación de grietas en zonas de concentración de esfuerzos [3] [9].

#### **1.4.2. Procesos de manufactura**

Los tubos de acero pueden fabricarse mediante dos procesos de producción: tuberías sin costura y tuberías soldadas. Las primeras se obtienen a partir de la perforación de un tocho sólido o una colada continua, mientras que las segundas se fabrican a partir de flejes o láminas planas que son conformadas y soldadas longitudinalmente [10].

Las tuberías soldadas por resistencia eléctrica (ERW) son ampliamente utilizadas para la conducción de fluidos, tanto en oleoductos terrestres como en sistemas de transporte de agua y gas. Este proceso de fabricación es continuo y lineal, abarcando desde la alimentación del fleje hasta el corte del tubo, como se observa en la figura 1. Inicialmente, el fleje de acero se desenrolla y se conduce a través de una serie de rodillos conformadores, los cuales van otorgándole gradualmente una

curvatura circular. Durante esta etapa, la lámina experimenta una deformación plástica controlada, que aumenta progresivamente hasta que los bordes del fleje se aproximan y quedan en contacto, listos para la soldadura longitudinal [11].



**Figura 1:** *Proceso de conformado de los tubos [2]*

La unión de los bordes se realiza mediante el proceso de soldadura por resistencia eléctrica, en el cual una corriente pasa a través de la zona de contacto entre los extremos del acero, generando calor por efecto Joule. Este calentamiento localizado eleva la temperatura del material hasta un rango de fusión parcial o coalescencia sólida, formando la unión metalúrgica sin requerir material de aporte [11] [2]. El exceso de material se elimina mediante desbaste mecánico.

Sin embargo, durante las etapas de conformado y soldadura, el acero es sometido a sucesivos ciclos de carga y descarga, que alteran su comportamiento esfuerzo-deformación, donde se induce el efecto Bauschinger, que se traduce en una disminución del límite elástico al invertir la dirección de la deformación, que eleva la resistencia, pero reduce la ductilidad del material [12].

### **1.4.3. Soldadura**

La soldadura es un proceso de unión permanente mediante el cual dos o más piezas metálicas se enlazan por coalescencia, generando una continuidad metalúrgica

entre los materiales base. Este proceso puede involucrar o no material de aporte y se realiza con la aplicación de calor, presión o una combinación de ambos [13].

Los procesos de soldadura pueden clasificarse en [14]:

- Soldadura por fusión: donde el material base se funde parcial o totalmente, como en los procesos de arco eléctrico y soldadura por láser.
- Soldadura en estado sólido: donde la unión se produce por difusión o deformación plástica sin llegar a la fusión, como en la soldadura por fricción o por resistencia.
- Soldadura por presión: combina calor y esfuerzo mecánico, como en la soldadura por puntos o por rodillos.

La soldadura por resistencia eléctrica (ERW), es un proceso que aprovecha la energía térmica generada por el paso de corriente eléctrica a través del material base, donde la unión se produce por el contacto producido bajo una presión controlada. El calor producido por el efecto Joule eleva la temperatura del material conductor hasta un rango próximo a la fusión, permitiendo la unión metalúrgica sin necesidad de material de aporte [13].

Las uniones soldadas presentan concentraciones de esfuerzos que pueden inducir fracturas si no se aplica un tratamiento térmico posterior a la unión. Los cordones de soldadura tienden a actuar como concentradores de esfuerzos, en zonas donde la altura del cordón es excesiva, como en la capa superficial. Además, suelen presentar tensiones residuales generadas por el enfriamiento desigual, producto de las transformaciones bruscas de fases o recristalización de estas. Defectos como poros, inclusiones de escoria, grietas en caliente, falta de coalescencia también favorecen a la iniciación de grietas [15].

Estos defectos pueden generarse por un control inadecuado de los parámetros del proceso, tales como voltaje, corriente, velocidad de avance y velocidad de enfriamiento. Además de las discontinuidades propias del cordón, se presenta una región adyacente denominada zona afectada por el calor (ZAC). Esta zona se forma debido a las altas tasas de calentamiento y enfriamiento que ocurren durante la soldadura, provocando modificaciones en la microestructura del material en las áreas próximas al cordón [16].

#### **1.4.3.1. Microestructura post-soldadura**

Tras la soldadura, la microestructura típica de los aceros al carbono presenta una mezcla heterogénea de ferrita, perlita y, en algunos casos, bainita o martensita en la ZAC. En esta zona, el material experimenta transformaciones metalúrgicas que dependen de la temperatura alcanzada y del tiempo de exposición térmica. En aceros de bajo carbono, es común observar una refinación de granos ferríticos y una formación localizada de perlita o bainita, lo que modifica las propiedades mecánicas en comparación con el material base. Esto se debe a que, durante el enfriamiento, la microestructura de la ZAC se transforma en una estructura nueva, la cual depende de la rapidez de enfriamiento [1]. Por otro lado, el cordón de soldadura puede presentar una microestructura más heterogénea, compuesta por ferrita poligonal o ferrita acicular.

Estas variaciones estructurales influyen directamente en la resistencia, ductilidad y tenacidad del tubo. La presencia de tensiones residuales en las regiones cercanas al cordón puede representar puntos críticos bajo condiciones de servicio, especialmente en sistemas a presión cíclica o fluctuante [3].

#### 1.4.4. Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos (TT) son procesos controlados de calentamiento y enfriamiento que modifican la microestructura de los metales con el fin de ajustar sus propiedades mecánicas. Los TT se utilizan para la eliminación del deformado en frío, control del endurecimiento por dispersión o mejorar la maquinabilidad [1].

El tratamiento térmico para recristalización, el cual se utiliza para eliminar el efecto del deformado en frío en aceros con menos de 0.25%C, se denomina recocido intermedio, el cual se efectúa de 80 a 170°C. El recocido y normalizado se utilizan para recristalizar el material, con la diferencia de que el primero radica en un enfriamiento lento, mientras que el segundo en un enfriamiento más rápido (al aire). Este cambio en el tamaño de grano de la perlita afecta directamente a la resistencia mecánica y ductilidad del material. Un enfriamiento lento y perlita gruesa provoca una resistencia mecánica baja y excelente ductilidad [1].

En aceros soldados para conducción de fluidos, los tratamientos más empleados son:

- Recocido: reduce tensiones internas y refina el tamaño de grano, mejorando la ductilidad.
- Normalizado: busca homogeneizar la microestructura ferrítico-perlítica y eliminar irregularidades producidas por la soldadura.

En las tuberías conformadas por soldadura EWR, el TT se aplica debido a las altas tensiones residuales y a la ZAC generadas durante el proceso de conformado total. Estas zonas pueden presentar microestructuras no homogéneas que provocan anisotropías mecánicas al disminuir la resistencia mecánica del material. Por tanto, aplicar un tratamiento térmico posterior, como recocido, provoca el alivio de tensiones y

recristalización parcial, lo cual reduce las gradientes de dureza y recupera la ductilidad global del tubo [14].

En aceros galvanizados, el tratamiento térmico también influye en la microestructura y desempeño del recubrimiento de zinc. Un recocido a altas temperaturas durante periodos cortos de tiempo mejora la adherencia y deformabilidad superficial. Sin embargo, a altas temperaturas y tiempos largos, provoca la formación de subcapas intermetálicas de Fe-Zn, grietas y poros [17].

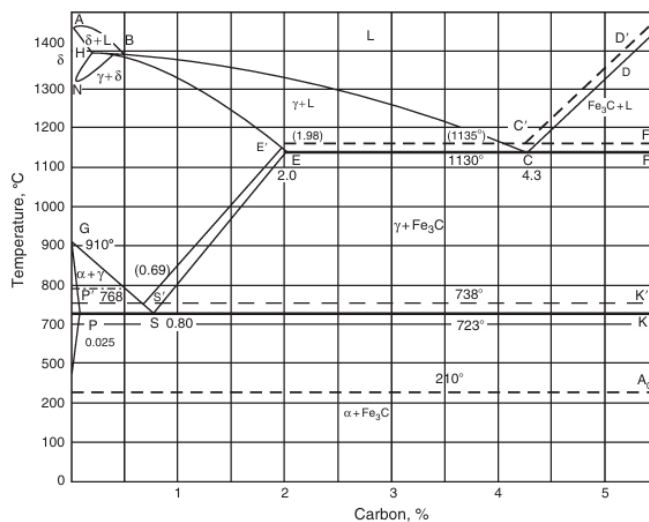


Figura 2: Diagrama de fases para aceros [18]

Cualquier tratamiento térmico por debajo de la temperatura de recristalización se considera subcrítico [18].

#### 1.4.5. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los aceros dependen directamente de la composición química del acero, del proceso de conformado, de la microestructura final obtenida y, para tubos soldados, del cordón y ZAC.

Para tubos soldados que transportan fluidos se consideran propiedades como límite elástico, resistencia a la tracción, ductilidad, tenacidad y dureza. Estas características describen el comportamiento de un material cuando se somete a la

acción de fuerzas externas. Las propiedades determinan la capacidad del material para resistir deformaciones, fracturas o fallas bajo diversas condiciones de carga [3].

El comportamiento esfuerzo-deformación se define como la respuesta de un material ante la aplicación de cargas axiales. Inicialmente, el material presenta un comportamiento elástico en el cual la deformación desaparece al retirar la carga, el cual se describe por la ley de Hooke, donde el esfuerzo es proporcional a la deformación a través del módulo de elasticidad. Cuando la carga aplicada supera el límite elástico, el material entra en la región plástica, caracterizada por deformaciones permanentes asociadas al momento de dislocaciones en la red cristalina [19]. La máxima carga que puede soportar un material antes de fracturarse corresponde a la resistencia a la tracción, mientras que la elongación total y reducción del área miden su capacidad de deformación plástica [3]. La curva esfuerzo-deformación se presenta en la figura 2.

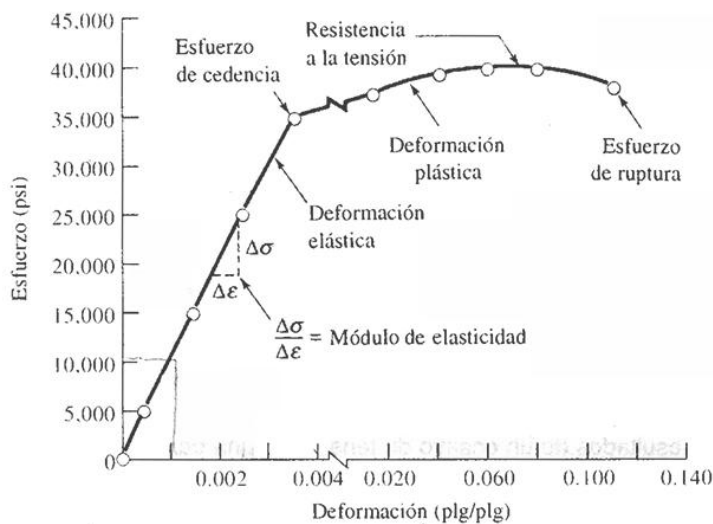
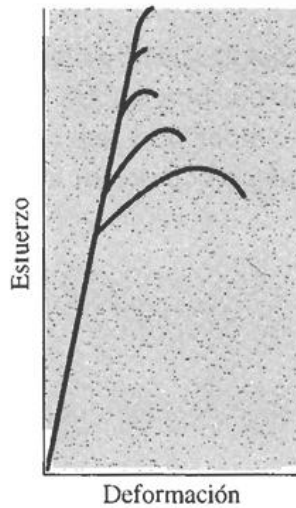


Figura 3: Curva esfuerzo-deformación [1].

Aunque, por el proceso de conformado del material, la densidad de dislocaciones aumenta, provocando una interacción entre ellas, elevando la resistencia del material a nuevas deformaciones, debido al endurecimiento por deformación, el

cual incrementa la resistencia a la tracción y la reducción de ductilidad [3]. El fenómeno se observa en la figura 3.



**Figura 4:** Efecto del endurecimiento por deformación [1]

Las fases de ferrita y perlita determinan el equilibrio entre resistencia y ductilidad. Un tamaño de grano mayor o distribución irregular pueden disminuir la resistencia a la fractura. La relación Hall-Petch establece que el límite elástico aumenta al disminuir el tamaño de grano [1].

La tenacidad representa la capacidad de un material para absorber la energía antes de fracturarse, mientras que la dureza es una medida indirecta de la resistencia del material a la deformación plástica localizada y al desgaste. En los aceros, la dureza se correlaciona con la resistencia a la tracción [3].

#### **1.4.6. Técnicas de caracterización y ensayos mecánicos**

Las técnicas de caracterización y ensayos mecánicos sirven para comprender la relación entre la microestructura de los aceros y sus propiedades mecánicas.

La caracterización microestructural permite identificar las fases, tamaño de grano, productos de transformación e incluso recubrimiento del galvanizado. Los

ensayos mecánicos determinan las propiedades del material, como la resistencia, ductilidad y dureza.

Entre las técnicas de caracterización de los aceros se encuentra la microestructura óptica. Esta técnica consiste en observar la microestructura del acero mediante un microscopio óptico de reflexión, después de un proceso de preparación superficial que incluye montaje metalográfico, desbaste grueso, desbaste fino, pulido y ataque químico [1]. Esta técnica permite determinar el tamaño de grano ferrítico, distribución de fases y defectos microestructurales producto del conformado o de la soldadura. También permite observar la zona de interfase entre el recubrimiento de zinc por el galvanizado y el sustrato.

Los ensayos mecánicos permiten cuantificar las propiedades que definen la capacidad de un material para resistir cargas externas.

El ensayo de tracción es el método utilizado para determinar propiedades como límite elástico, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y elongación total. El ensayo se aplica realizando una carga axial creciente a una probeta normalizada hasta su fractura, según los lineamientos de la norma ASTM E8 [1]. Posterior a un tratamiento térmico, el ensayo permite cuantificar la recuperación de ductilidad y la disminución de resistencia asociada a la recristalización.

El ensayo de dureza describe la resistencia a la penetración o a la deformación plástica localizada [1]. Los ensayos incluyen Rockwell (ASTM E18), Vickers (ASTM E384) y Brinell (ASTM E10).

# Capítulo 2

## 2. Metodología

### 2.1. Descripción general del estudio

El presente trabajo experimental se desarrolló con el objetivo de evaluar la influencia de un tratamiento térmico sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de tubos de acero galvanizado producidos mediante soldadura por resistencia eléctrica. Para ello, se seleccionaron muestras provenientes de tres lotes de producción distintos, los cuales se denominaron de manera confidencial Muestra 1, Muestra 2 y Muestra 3. El enfoque metodológico combina técnicas de caracterización mecánica (ensayos de tracción y abocardado) y caracterización metalográfica (análisis microestructural y determinación del tamaño de grano), antes y después del tratamiento térmico.

### 2.2. Selección y preparación de muestras

De cada lote de producción se recolectaron probetas para la realización de los ensayos correspondientes. Se obtuvieron 21 probetas por muestra, distribuidas en la tabla 2.1.

Muestra	Codificación	Tratada térmicamente	Condición de TT: T (°C) - t (min)	Número de probetas para ensayos		
				Metalografía	Tracción	Abocardado
1	muestra_1	No	0 °C - 0 min	6	3	3
2	muestra_2	No	0 °C - 0 min	6	3	3
3	muestra_3	No	0 °C - 0 min	6	3	3
1_TT	muestra_1_TT	Si	300 °C - 30 min	6	3	3
2_TT	muestra_2_TT	Si	275 °C - 45 min	6	3	3

<b>3_TT</b>	muestra_3_TT	Si	325 °C - 15 min	6	3	-
<b>4_TT</b>	muestra_4_TT	Si	275 °C - 15 min	-	3	-
<b>5_TT</b>	muestra_5_TT	Si	325 °C - 45 min	-	3	-
<b>6_TT</b>	muestra_6_TT	Si	300 °C - 15 min	-	3	-
<b>7_TT</b>	muestra_7_TT	Si	300 °C - 45 min	-	3	-
Total de probetas:				36	30	15

**Tabla 1:** Cantidad de probetas para ensayos

La obtención de las probetas metalográficas se realizó mediante una cortadora de hilo con una altura de corte de 10 mm, tomando secciones a lo largo de la longitud del tubo con el fin de analizar la uniformidad del material.



**Figura 5:** Probetas

## **2.3. Ensayos mecánicos**

### **2.3.1. Ensayo de tracción**

El ensayo de tracción se efectuó siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E8, empleando tres probetas del producto terminado luego del proceso de manufactura, para cada una de las tres muestras. Las probetas fueron maquinadas

conforme a las dimensiones establecidas por la norma y los resultados de carga y deformación fueron registrados mediante el sistema digital de adquisición de datos.

A partir de los datos obtenidos, se elaboraron las curvas esfuerzo-deformación utilizando el lenguaje de programación Python, para su posterior análisis.



**Figura 6:** *Ensayo de tracción*

### **2.3.2. Ensayo de abocardado**

El ensayo de abocardado se aplicó con el propósito de evaluar la ductilidad local y el comportamiento del material en la zona de deformación plástica. Este ensayo se realizó conforme a la norma NTE INEN 133, utilizando tres probetas por muestra.

Posteriormente, las superficies de fractura obtenidas fueron analizadas visualmente, evaluando la morfología de la fractura.



*Figura 7: Ensayo de abocardado*

## **2.4. Caracterización metalográfica**

### **2.4.1. Preparación de las probetas**

Las probetas destinadas al análisis metalográfico fueron preparadas según la norma ASTM E3, utilizando montaje metalográfico en baquelita.

El análisis químico se realizó mediante una solución de nital al 2%, con el fin de revelar la estructura ferrítica y la ZAC.



*Figura 8: Probetas para metalografía*

### 2.4.2. Observación y análisis

Las micrografías se obtuvieron mediante microscopía óptica, capturando diferentes zonas del tubo para evaluar la homogeneidad del grano.

El tamaño de grano promedio se determinó utilizando el software ImageJ.

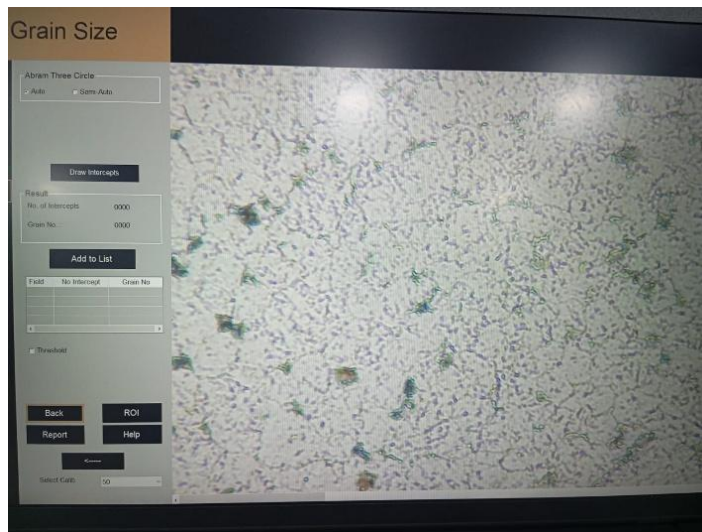


Figura 9: Visualización metalográfica

### 2.5. Ensayo de tracción de probetas No Tratadas

Se realizaron nueve ensayos de tracción correspondientes a las tres muestras por lote de las probetas no tratadas térmicamente, con el fin de obtener un punto de inicio con el cual determinar el desempeño mecánico del material sin ser tratado y obtener una comparación luego de la aplicación del tratamiento térmico. Las gráficas de esfuerzo vs deformación se presentan a continuación.

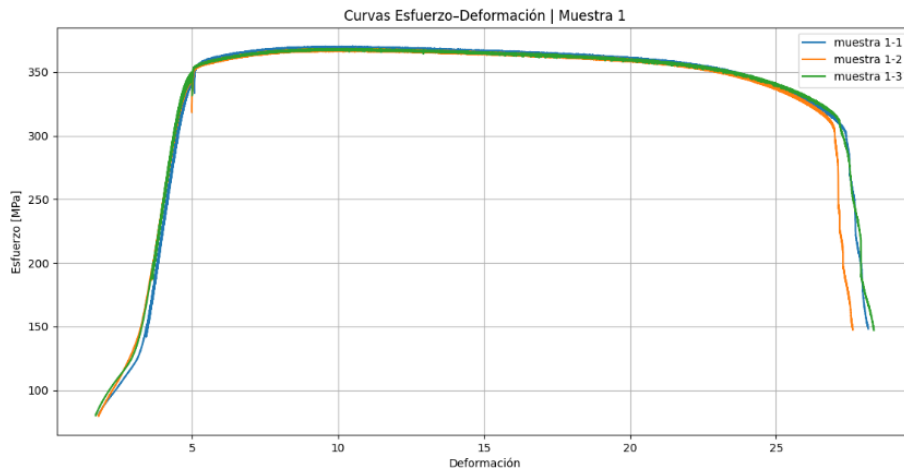


Figura 10: Curva esfuerzo-deformación de la muestra 1

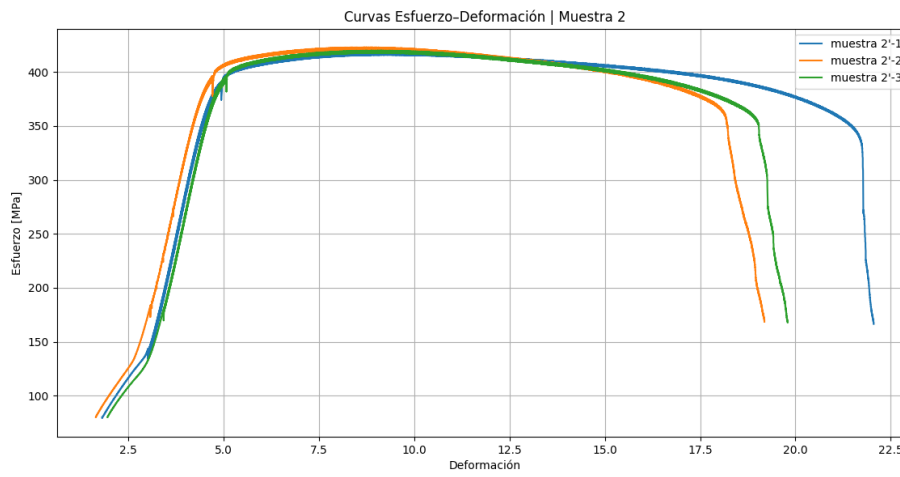
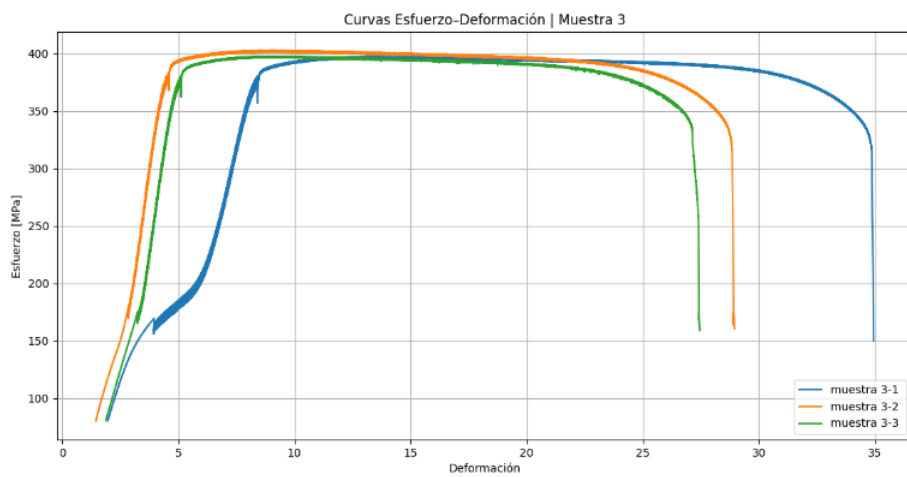


Figura 11: curva esfuerzo-deformación muestra 2

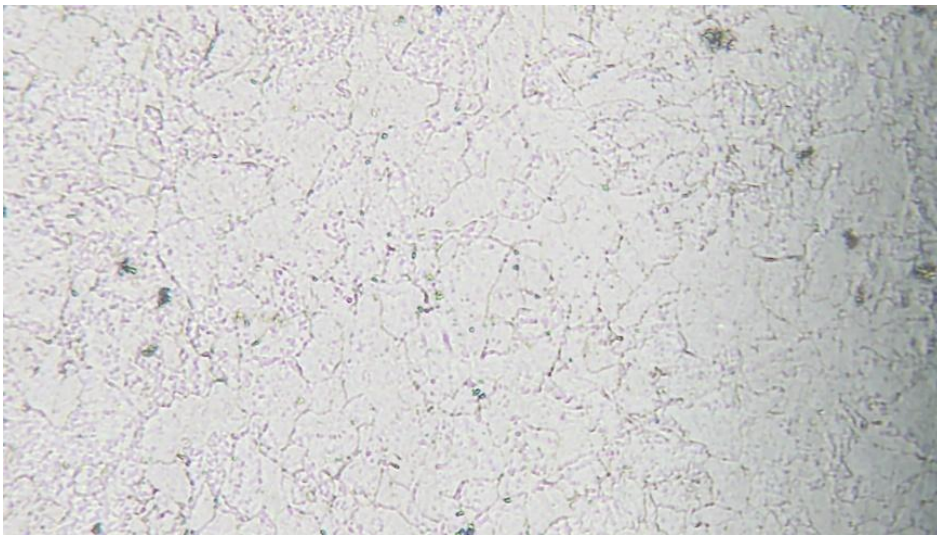


**Figura 12:** *curva esfuerzo-deformación muestra 3*

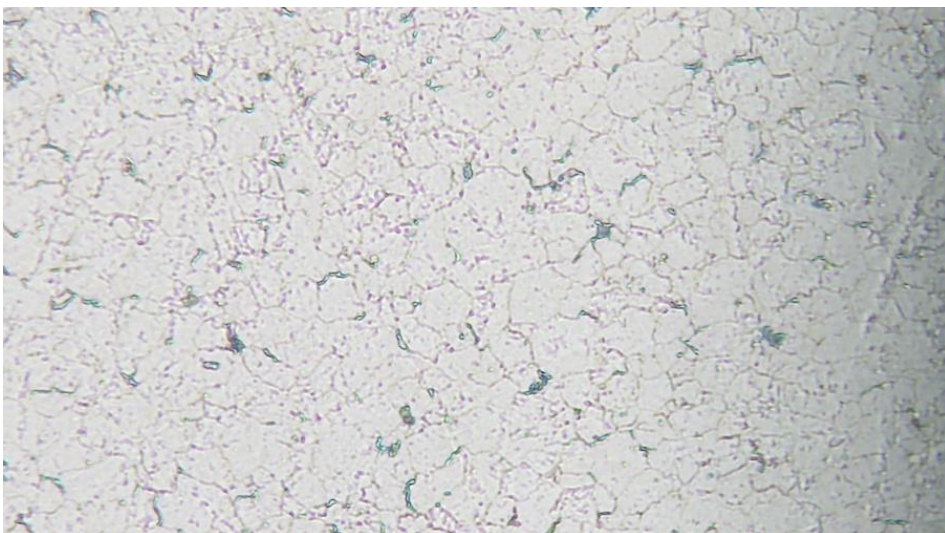
## **2.6. Metalografía de las muestras No Tratadas**

En esta sección se presentan los resultados del ensayo metalográfico a las probetas no tratadas térmicamente para determinar su comportamiento microestructural y evaluar la distribución que de los granos.

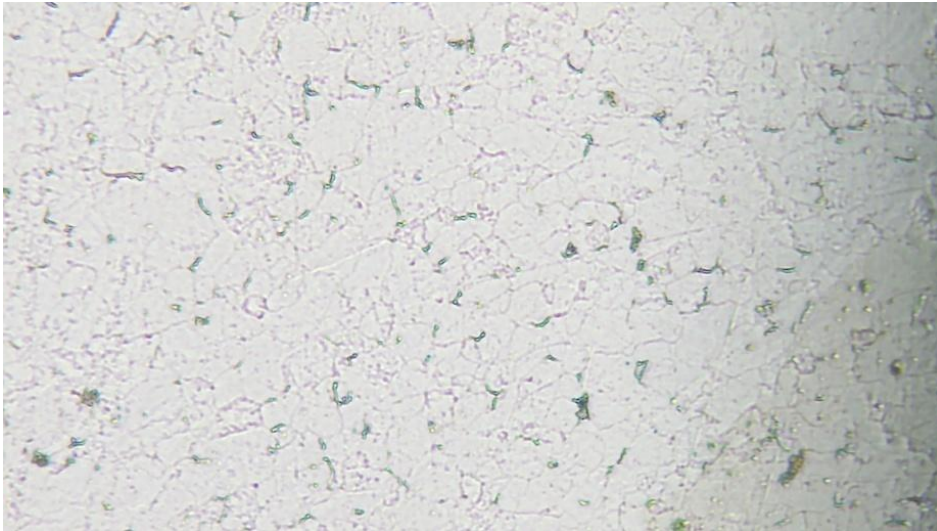
### **2.6.1. Muestra 1**



**Figura 13:** *metalografía muestra 1*

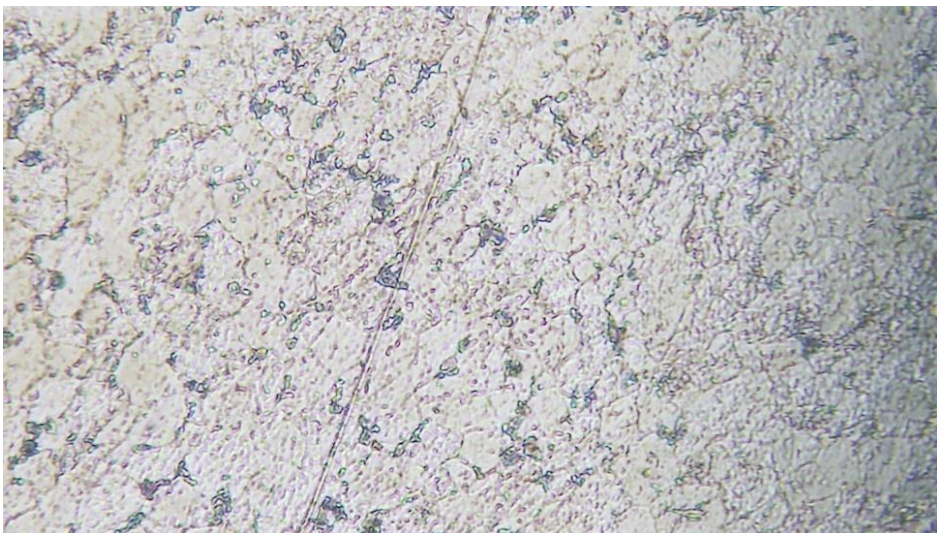


**Figura 14:** *metalografía muestra 1*

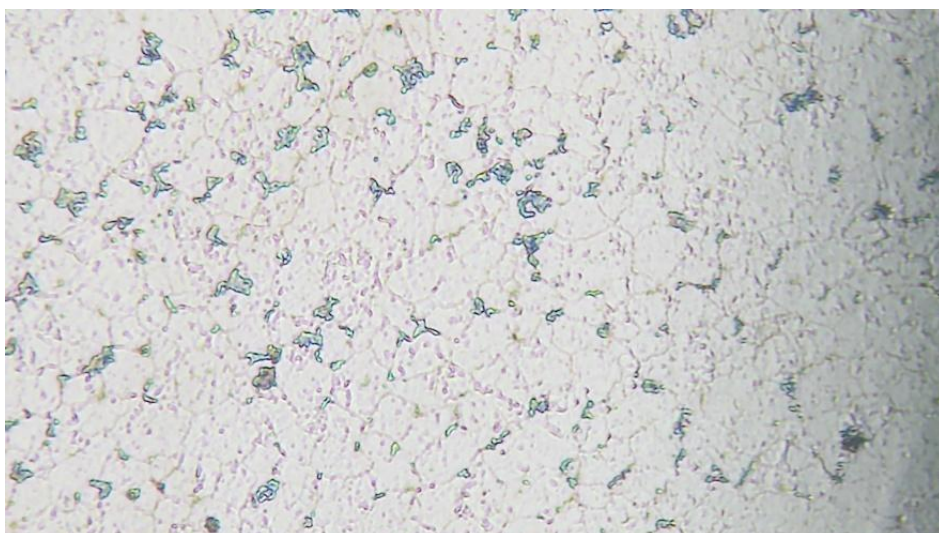


**Figura 15:** *metalografía muestra 1*

### **2.6.2. Muestra 2**

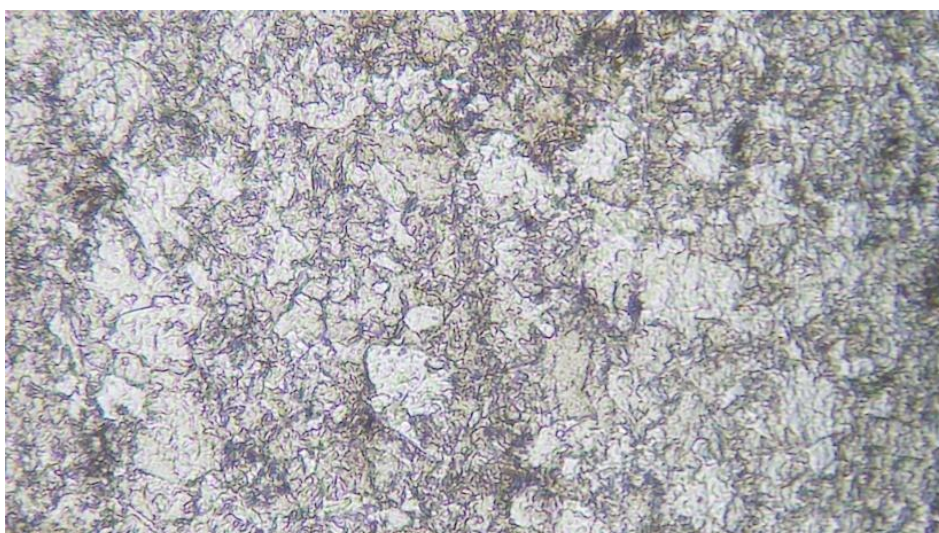


**Figura 16:** *metalografía muestra 2*

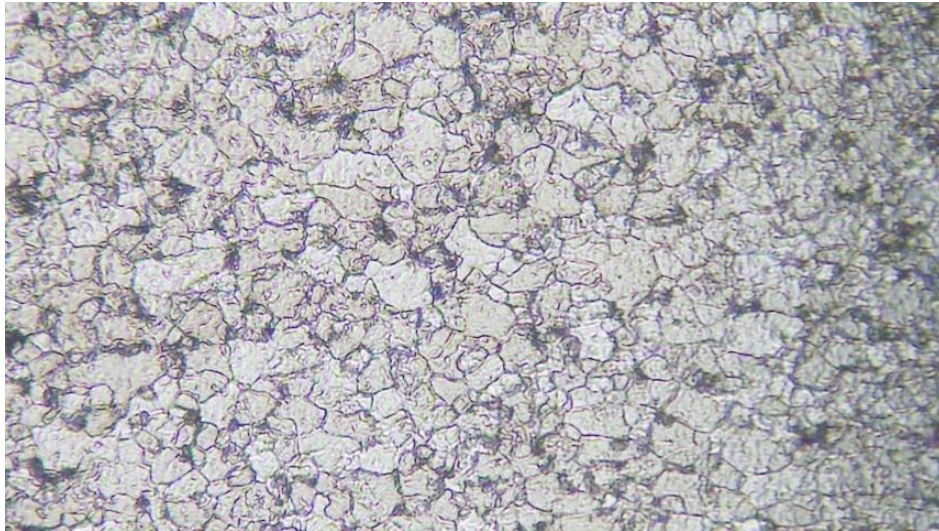


**Figura 17:** *metalografía muestra 3*

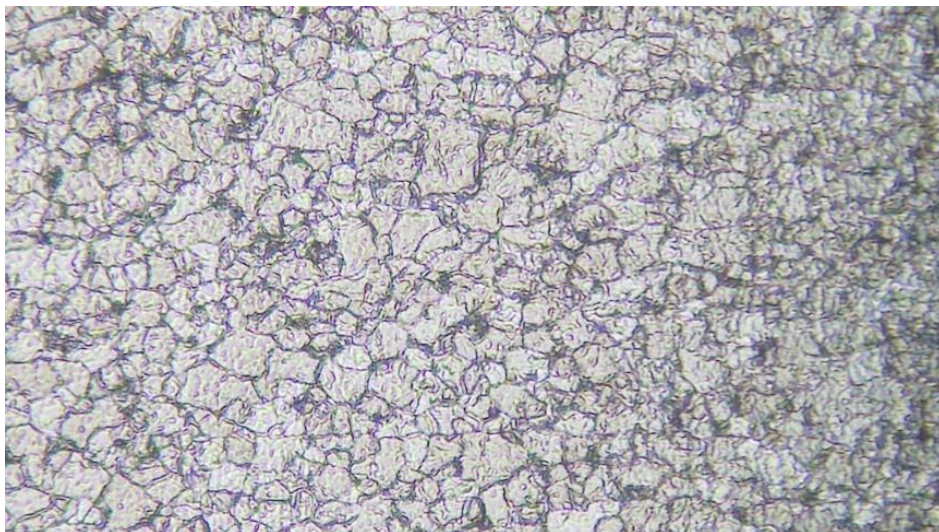
### **2.6.3. Muestra 3**



**Figura 18:** *metalografía muestra 3*



**Figura 19:** *metalografía muestra 3*



**Figura 20:** *metalografía muestra 3*

## **2.7. Tratamiento térmico y ensayos mecánicos.**

En esta sección se adjuntan los siete tratamientos térmicos realizados a las probetas con el objetivo de cubrir de manera eficiente el rango operativo de temperatura y tiempo relevante para el proceso industrial, sin incurrir a un número excesivo de ensayos, de tal forma que se optimizaron recursos. Esta cantidad permitió evaluar las combinaciones representativas de temperatura baja, media e intermedia (275, 300, 325 °C) y tiempos cortos, intermedios y prolongados (15, 30, 45 min), lo que permitió analizar tendencias, efectos individuales y combinados de ambas

variables. Asimismo, este número de TT fue suficiente para identificar regiones de estabilidad mecánica, evaluar el alivio de tensiones residuales y tendencias en cuanto a las respuestas de las propiedades mecánicas (fluencia, tracción y elongación) de acuerdo con los factores estudiados (temperatura y tiempo).

### 2.7.1. Tratamiento térmico 1.

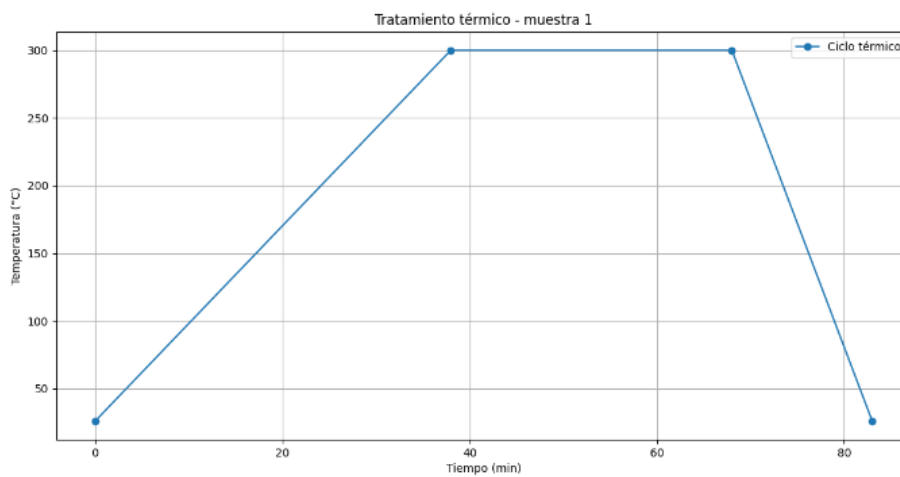


Figura 21: Tratamiento térmico 1

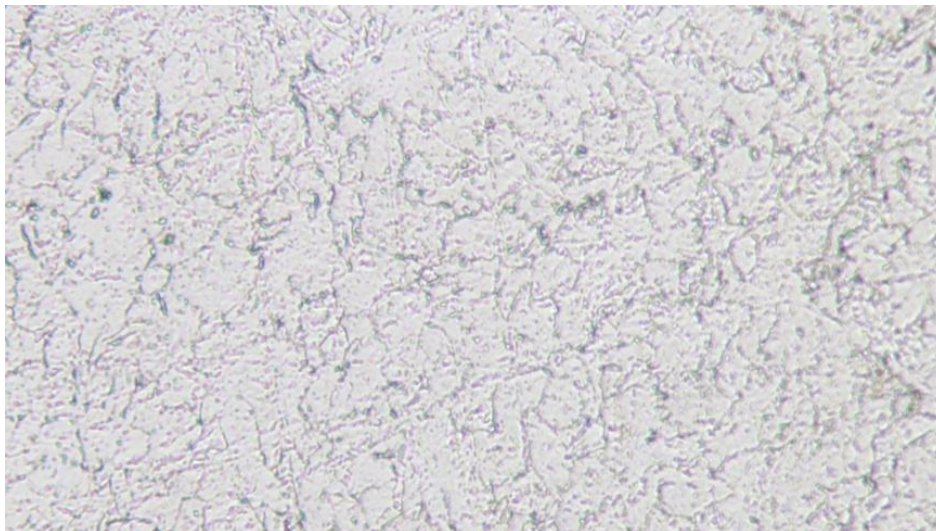
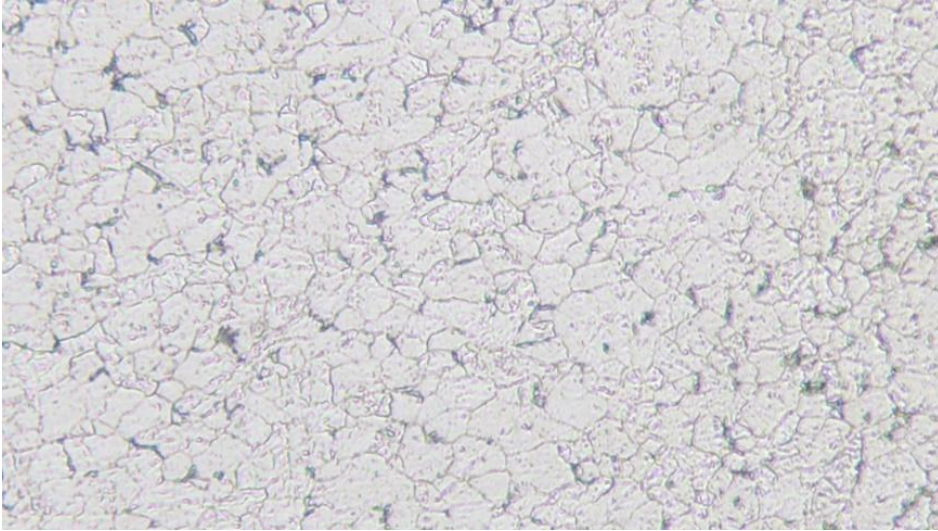
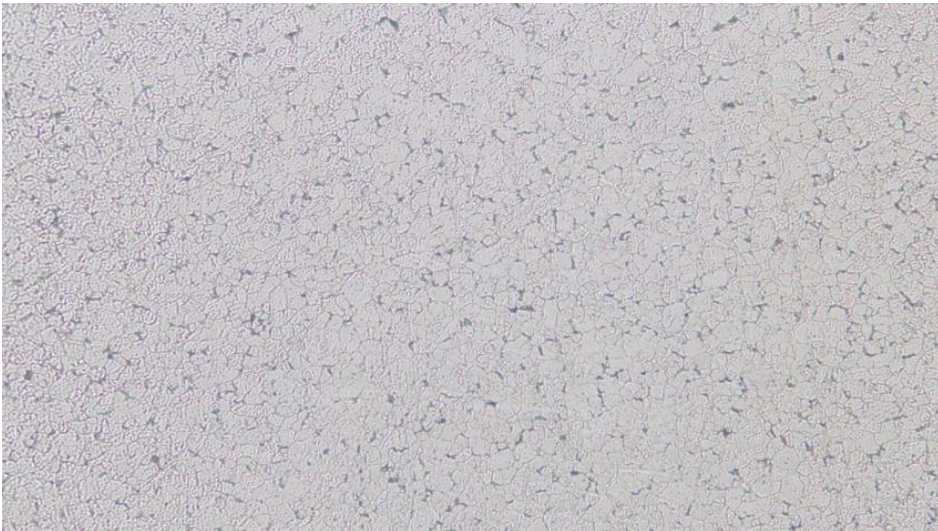


Figura 22: metalografía muestra 1 TT



**Figura 23:** *metalografía muestra 1 TT*



**Figura 24:** *metalografía muestra 1 TT*

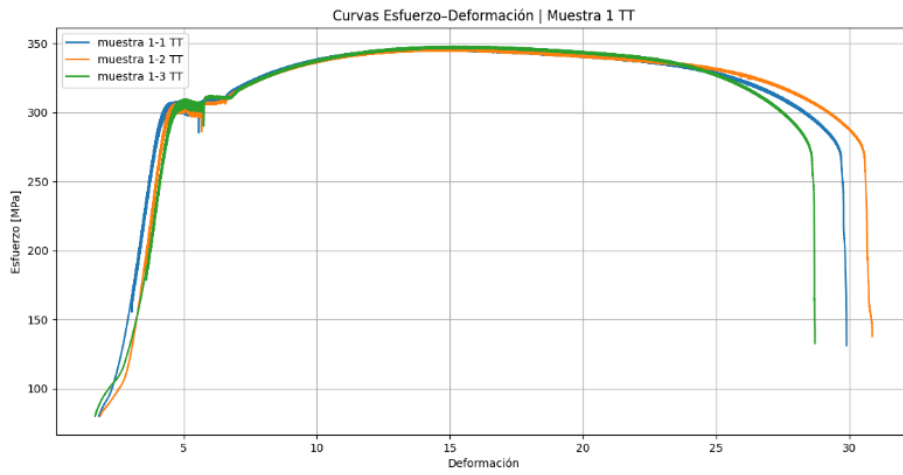


Figura 25: curva esfuerzo-deformación muestra 1 TT

### 2.7.2. Tratamiento térmico 2.

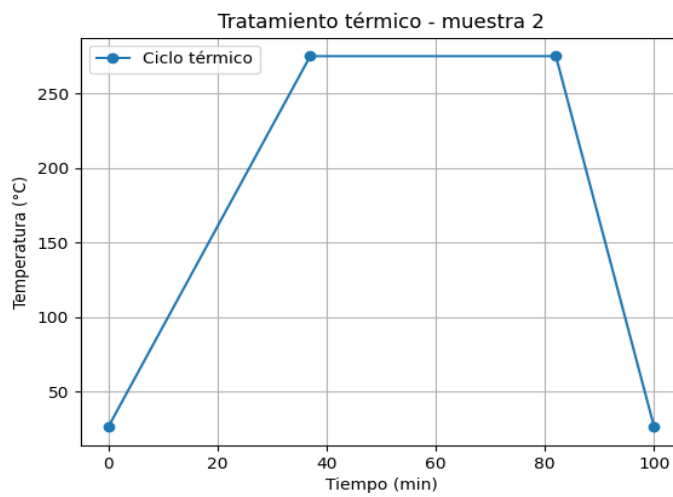


Figura 26: Tratamiento térmico 2

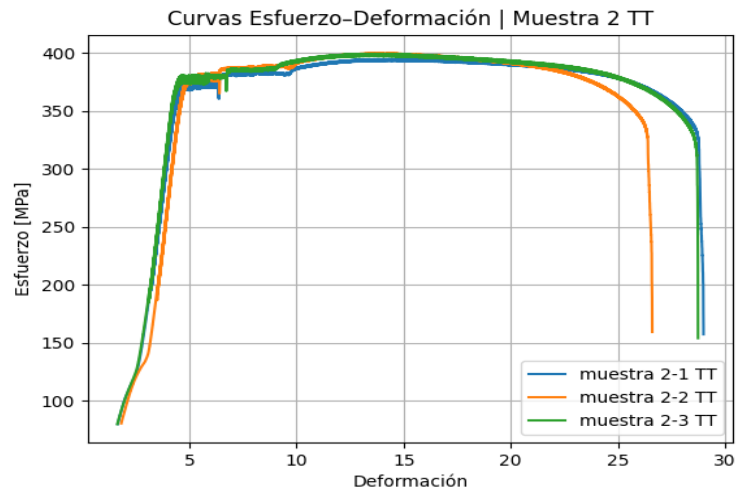


Figura 27: curva esfuerzo-deformación muestra 2 TT

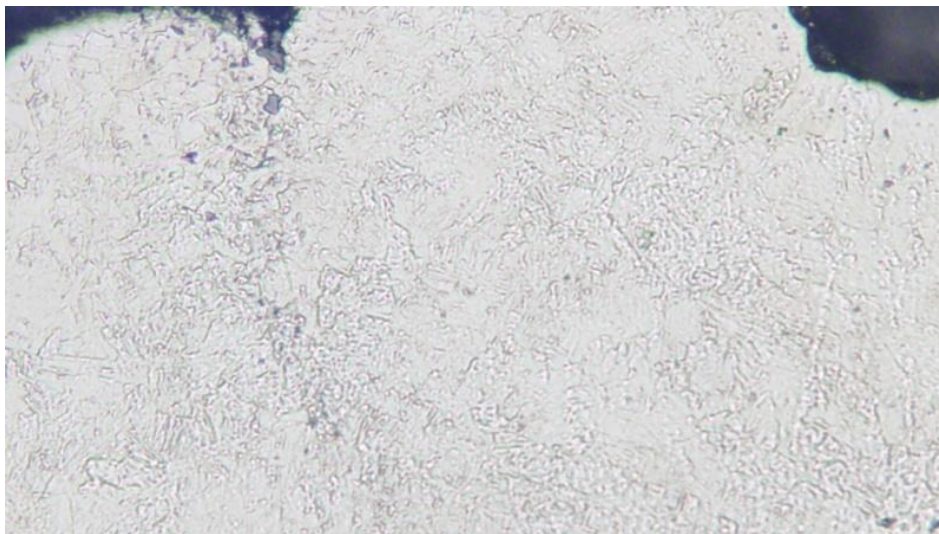
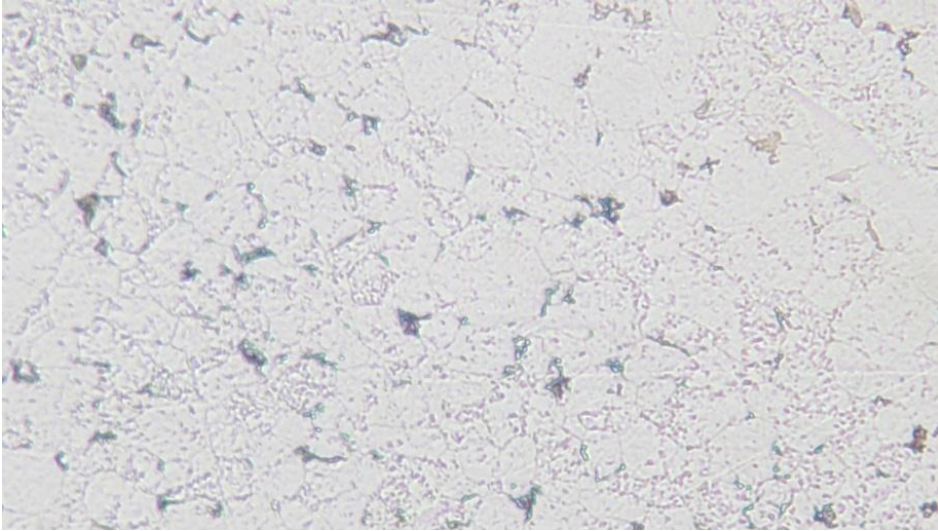
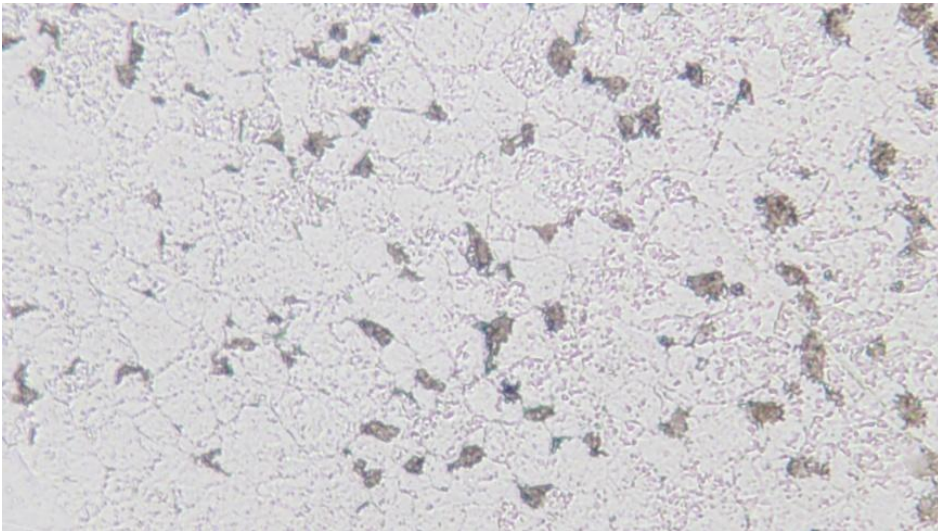


Figura 28: metalografía muestra 2 TT



**Figura 29:** *metalografía muestra 2 TT*



**Figura 30:** *metalografía muestra 2 TT*

### 2.7.3. Tratamiento térmico 3.

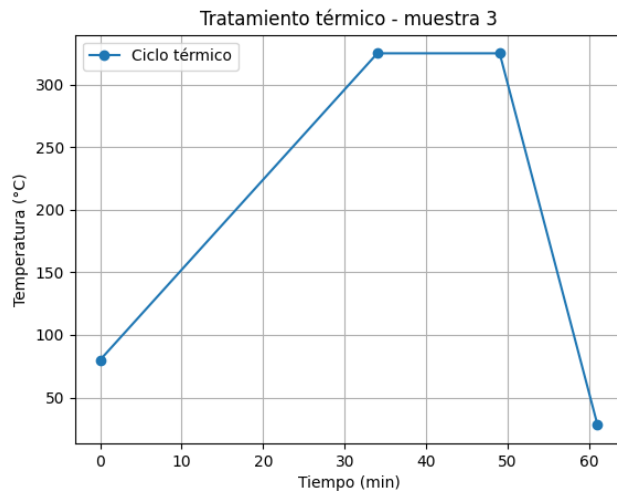


Figura 31: Tratamiento térmico 3

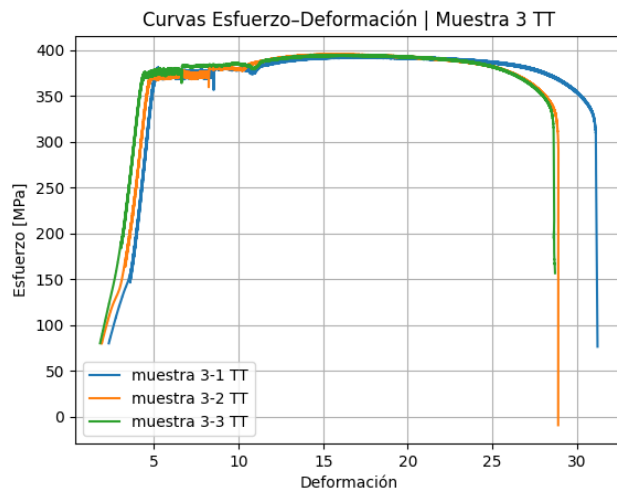


Figura 32: curva esfuerzo-deformación muestra 3 TT

#### 2.7.4. Tratamiento térmico 4.

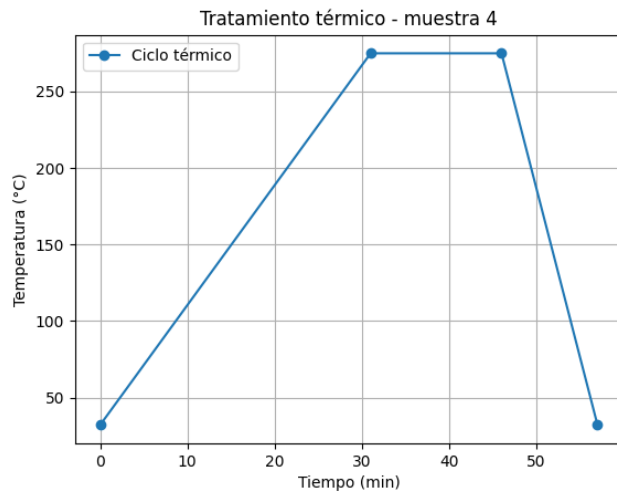


Figura 33: Tratamiento térmico 4

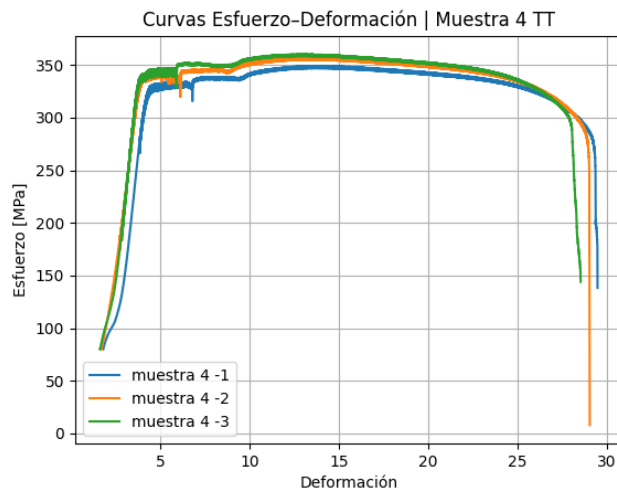


Figura 34: Curva esfuerzo-deformación muestra 4 TT

### 2.7.5. Tratamiento térmico 5.

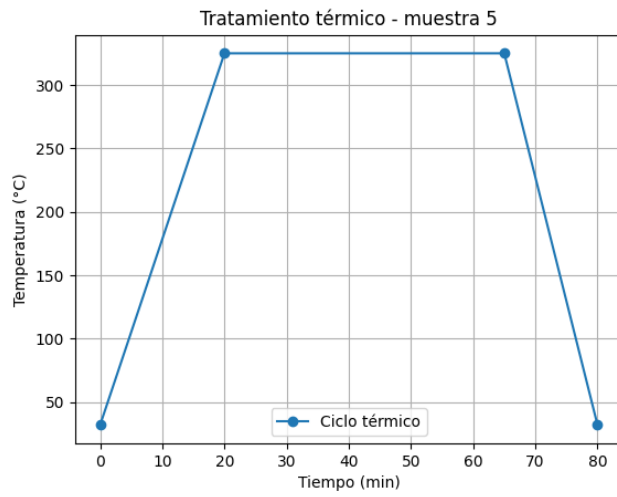


Figura 35: Tratamiento térmico 5

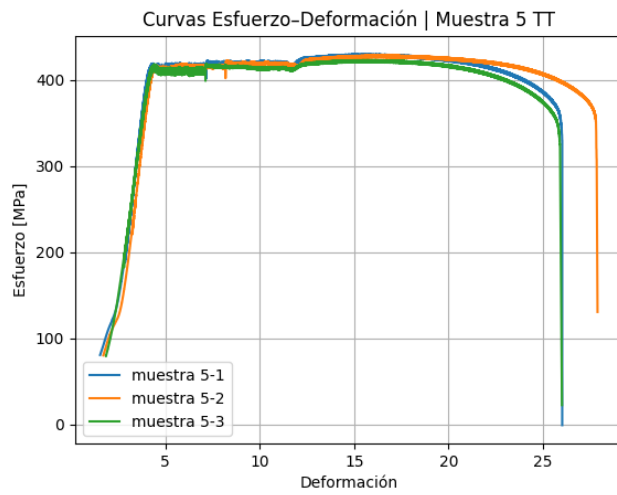


Figura 36: Curva esfuerzo-deformación muestra 5 TT

### 2.7.6. Tratamiento térmico 6.

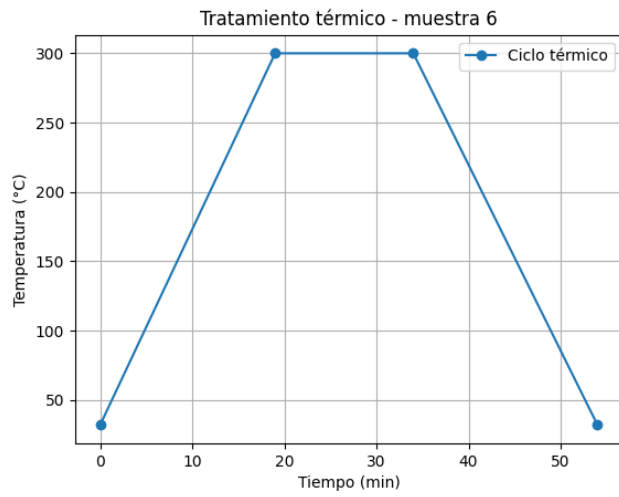


Figura 37: Tratamiento térmico 6

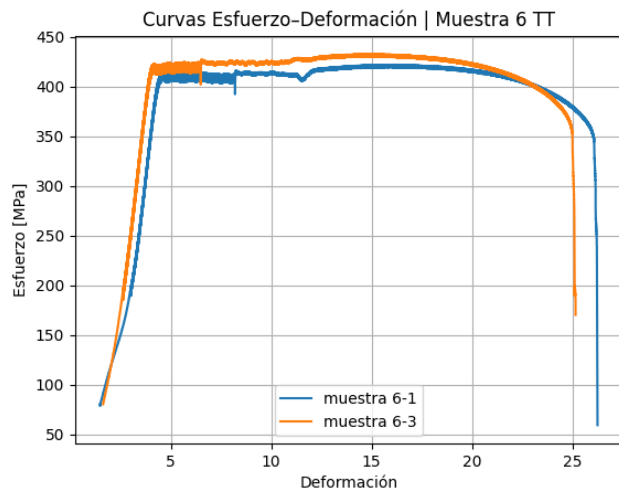


Figura 38: Curva esfuerzo-deformación muestra 6 TT

### 2.7.7. Tratamiento térmico 7.

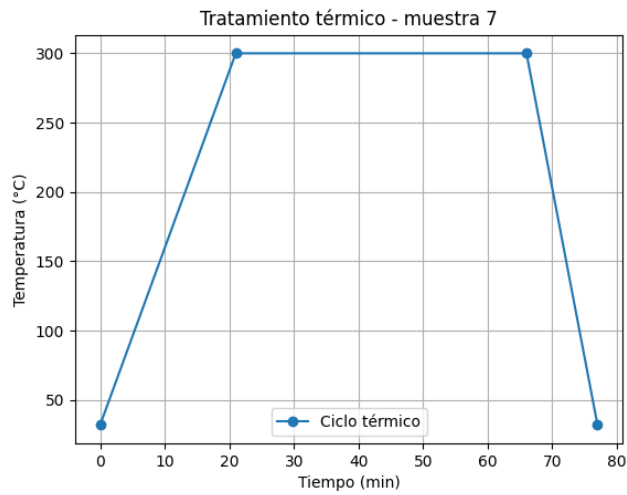


Figura 39: Tratamiento térmico 7

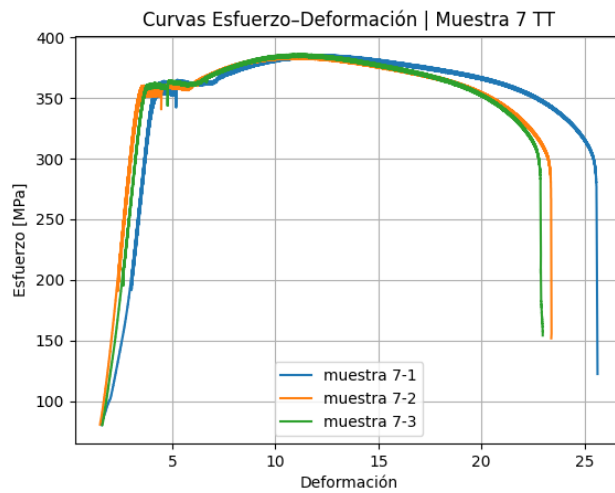


Figura 40: Curva esfuerzo-deformación muestra 7 TT

## 2.8. Herramientas de visualización

Para los cálculos y gráficos estadísticos se utilizó el software de código abierto R junto con RStudio; mientras que para el desarrollo de modelos matemáticos, tales como estimaciones y la generación de curvas, se empleó Visual Studio Code (VS Code) utilizando el lenguaje de programación Python.

## Capítulo 3

### 3. Análisis de resultados

#### 3.1. Análisis mecánico

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de tracción.

Muestra	Fluencia (Mpa)	Traccion (Mpa)	Elongacion (%)	Abocardado (mm)
muestra_1	340,07 ± 8,62	369,17 ± 1,15	24,15 ± 0,38	27,73 ± 0,31
muestra_2	386,05 ± 6,27	418,33 ± 2,67	16,84 ± 4,4	21,31 ± 0,62
muestra_3	373,77 ± 2,55	399,33 ± 3,00	25,11 ± 2,53	23,35 ± 3,16
muestra_1_TT	297,77 ± 6,58	346,87 ± 1,20	22,72 ± 2,60	24,95 ± 0,13
muestra_2_TT	377,73 ± 1,65	397,9 ± 2,78	23,09 ± 1,17	24,83 ± 0,34
muestra_3_TT	373,7 ± 1,9	394,77 ± 0,97	24,39 ± 1,31	NA
muestra_4_TT	335,5 ± 6,45	356,4 ± 6,22	25,31 ± 1,07	NA
muestra_5_TT	410,9 ± 4,58	426,9 ± 3,67	21,87 ± 0,34	NA
muestra_6_TT	413,4 ± 6,65	427,5 ± 7,57	21,52 ± 1,03	NA
muestra_7_TT	356,2 ± 3,71	385,6 ± 0,61	21,28 ± 1,00	NA

Tabla 2: Resultados del ensayo de tracción

Las muestras sin TT presentan gran dispersión en cuanto a los valores obtenidos en sus propiedades mecánicas, con incluso el valor más bajo en elongación. Esto se puede explicar por el proceso de conformado en frío a los cuales se ha sometido el material, donde la distribución de deformación plástica y tensiones residuales no es completamente homogénea [20].

Desde un punto de vista mecánico:

- La fluencia varía entre 340 y 386 MPa, indicando distintos niveles de endurecimiento por deformación.

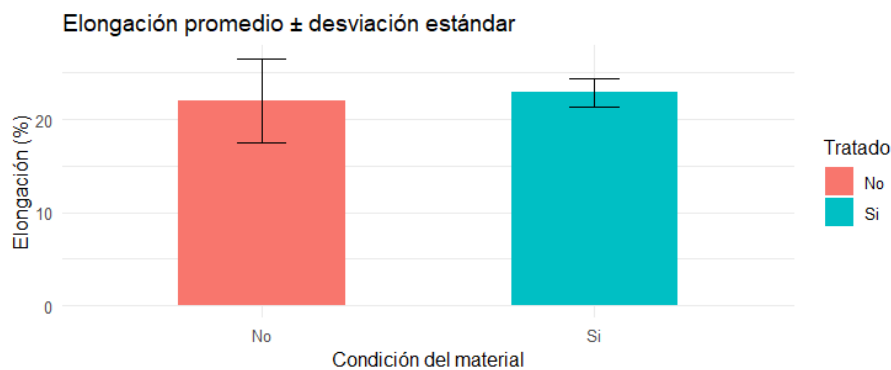
- La elongación presenta valores desde 16.8 % hasta 25.1 %, lo cual evidencia que algunas muestras tienen una capacidad limitada de deformación plástica uniforme.

- El abocardado alcanza los valores más altos en esta condición (hasta 27.7%), lo que indica que, pese a la dispersión, el material sin tratar conserva una elevada capacidad de deformación localizada [21].

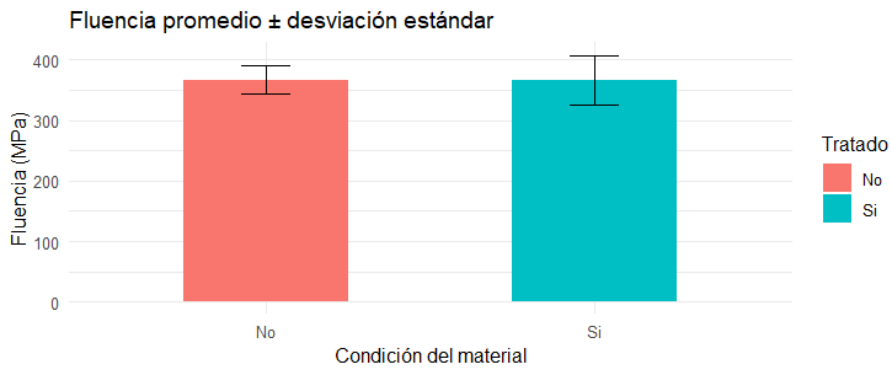
Es decir, el material sin tratamiento térmico conserva una alta densidad de dislocaciones y tensiones internas. Esto produce:

- Resistencia relativamente elevada en algunos casos.
- Comportamiento mecánico inconsistente.

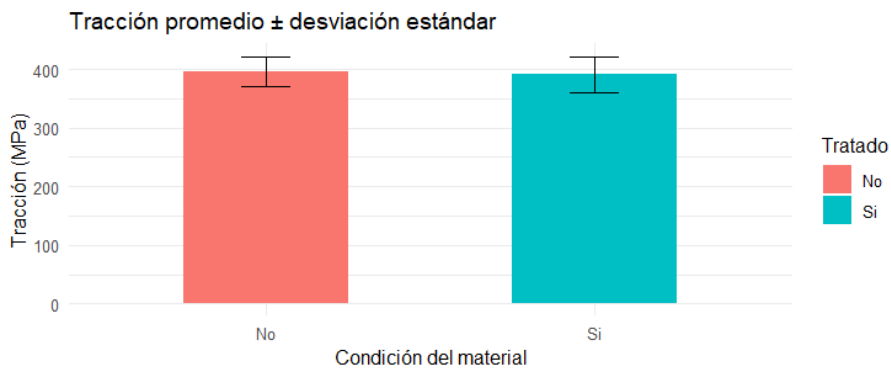
Al comparar las muestras tratadas térmicamente con las no tratadas, se observa que el tratamiento térmico no induce una tendencia simple, sino que modifica las propiedades en función de la combinación específica de una temperatura y un tiempo.



**Figura 41:** Elongación según condición de tratamiento



**Figura 42:** *Fluencia según condición de tratamiento*



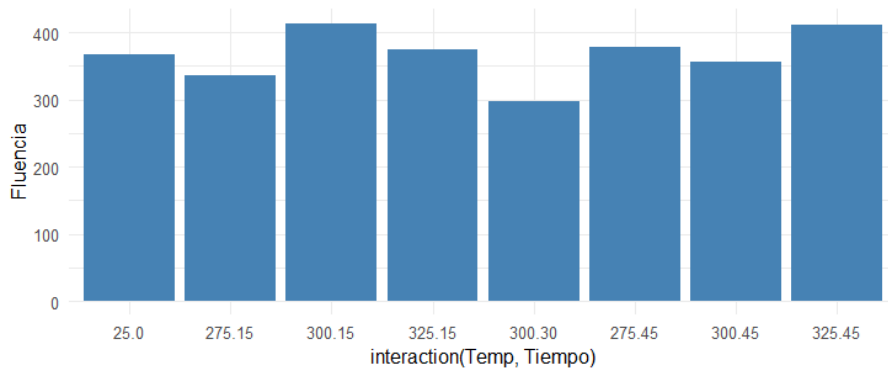
**Figura 43:** *Tracción según condición de tratamiento*

Desde el punto de vista mecánico, el tratamiento térmico actúa principalmente mediante:

- Alivio de tensiones residuales.
- Recuperación microestructural.
- Redistribución de dislocaciones.

Sin embargo, en la metalografía realizada en las muestras tratadas térmicamente, comparadas con las muestras no tratadas, se observa que no existe un cambio microestructural en cuanto a la distribución y tamaño de grano. El comportamiento se observa similar en ambos casos, por lo cual se entiende que el tratamiento térmico no actúa como proceso de recristalización (lo cual se espera por las bajas temperaturas que

alcanza), sino que su resultado va dirigido al alivio de tensiones residuales y redistribución de dislocaciones [22].

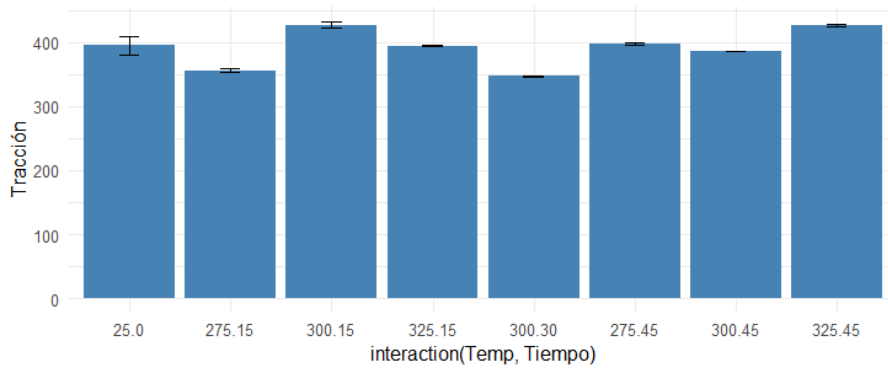


**Figura 44:** *Fluencia según Tratamiento*

En el caso de la fluencia, como se observa en la figura de arriba, se observa un comportamiento no monótono con la temperatura y el tiempo. El valor más bajo de fluencia se obtiene a 300°C – 30 min, mientras que los valores más altos aparecen a 300°C – 15 min y 325°C – 45 min. Finalmente, los tratamientos a igual temperatura, pero distinto tiempo generar respuestas opuestas.

En otras palabras, a tiempos cortos, el tratamiento térmico puede aliviar tensiones sin eliminar completamente el endurecimiento por deformación (fluencia alta). A tiempos intermedios, se produce un alivio más efectivo, aunque hay reducción de fluencia. A tiempos y temperaturas largos, parece ocurrir una estabilización que mantiene o incluso incrementa resistencia [23].

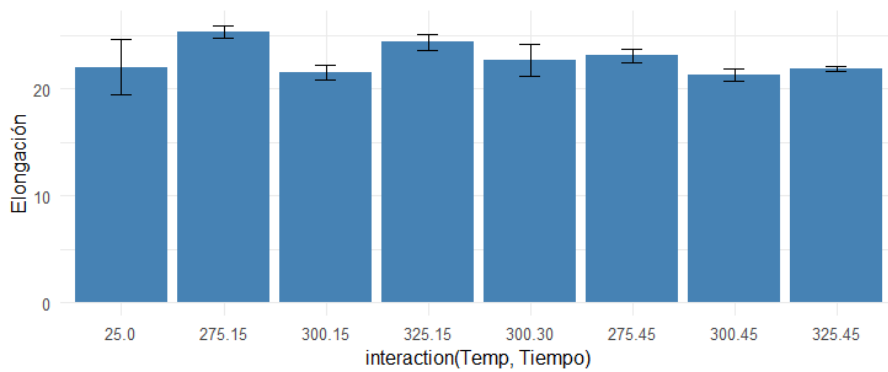
A continuación, se presenta el comportamiento de la resistencia a la tracción.



**Figura 45:** Resistencia a la tracción según Tratamiento

La resistencia última a la tracción sigue tendencias similares a la fluencia, pero con menor sensibilidad. Los valores más altos se obtienen a 300-325 °C con tiempos cortos. Los valores más bajos aparecen en condiciones donde la fluencia también es baja. Esto se espera dado que, la resistencia a la tracción por definición está asociada a la capacidad máxima del material antes de la estricción y depende de la densidad de dislocaciones y la capacidad de endurecimiento por deformación durante el ensayo [1]. El tratamiento térmico puede reducir o conservar esta capacidad dependiendo de cuánto alivie el estado de deformación previa, por lo que es menos sensible a ciertos tratamientos a diferencia de la fluencia [24].

En cambio, la elongación es la propiedad que muestra la respuesta mecánica más clara (y relevante dado la finalidad del diseño). Esta respuesta se observa en la siguiente figura.



**Figura 46:** *Elongación según Tratamiento*

La elongación está directamente relacionada con la capacidad de deformación plástica uniforme, la estabilidad frente a la estricción y la redistribución de tensiones. En tiempos prolongados se puede reducir la elongación al favorecer una recuperación excesiva o la pérdida de capacidad de endurecimiento por deformación durante el ensayo. Se puede observar que el tratamiento térmico puede reducir la ductilidad si no se controla adecuadamente el tiempo, aun cuando la resistencia se mantiene elevada [25].

Finalmente, con respecto al abocardado, se observa que el tratamiento térmico puede reducir ligeramente el abocardado máximo, sin embargo, este homogeniza la respuesta y eso reduce el riesgo de fallas locales impredecibles.

Para procesos de manufactura posteriores al conformado del tubo, como aquellos que se realizan por deformación plástica en frío, tales como el trefilado, se entiende que el tratamiento térmico alivia las tensiones residuales y redistribuye la deformación localizada, lo cual permite la deformación plástica sin fallas locales [26].

## **3.2. Análisis estadístico.**

### **3.2.1. Prueba F**

Los resultados del var.test permiten evaluar si el tratamiento térmico logra uno de sus objetivos industriales clave: homogenizar el comportamiento mecánico.

Para la fluencia se obtuvo un valor F de 0.335 y un p-value de 0.5447, por lo cual no se detectan diferencias estadísticamente significativas entre las varianzas de fluencia y del material tratado y no tratado. Desde el punto de vista estadístico, el TT no reduce de forma significativa la dispersión de la fluencia [27], lo que sugiere que esta propiedad sigue estando influenciada por variaciones subestructurales no completamente controladas por el tratamiento aplicado.

Para la tracción se obtuvo un valor  $F = 0.6296$  y un  $p\text{-value} = 0.8707$ , por lo cual tampoco se observan diferencias significativas en la variabilidad de la resistencia a la tracción. Esto refuerza la idea de que la tracción, al ser una propiedad dominada por el endurecimiento global y no por mecanismos locales, no es el mejor indicador de eficiencia del TT.

Finalmente, la elongación presenta un valor  $F = 8.97$  y un  $p\text{-value} = 0.03148$ . Aquí se detecta diferencia estadísticamente significativa entre las varianzas. El tratamiento térmico modifica significativamente la dispersión de la elongación, que es la propiedad más sensible a:

- Alivio de tensiones
- Recuperación
- Estabilidad de deformación plástica

Desde el punto de vista estadístico, el TT es eficiente principalmente en controlar la ductilidad del material, más que en la resistencia.

### **3.2.2. Coeficiente de variación**

Los coeficientes de variación (CV) representan la estabilidad relativa de las propiedades [28]. Los coeficientes obtenidos fueron:

- Fluencia: 11.2%
- Tracción: 8.0%
- Elongación: 6.6%

La elongación presenta la menor variabilidad relativa, reforzando que es la propiedad mejor controlada por el TT.

La fluencia es la más dispersa, lo cual concuerda con la falta de significancia de los modelos lineales simples.

Estos resultados indican que el proceso productivo presenta una buena estabilidad mecánica global, y que las variaciones introducidas por el tratamiento térmico se manifiestan principalmente en la capacidad de deformación plástica del material, más que en su resistencia.

### **3.2.3. Modelos lineales simples**

Los modelos lineales simples o el análisis de regresión lineal simple aplicado a la resistencia a la fluencia mostró que ni la temperatura ni el tiempo, considerados de manera aislada, presentan una influencia estadísticamente significativa dentro del rango estudiado ( $p > 0.1$  en ambos casos). Los bajos valores de  $R^2$  (13.4 % para temperatura y 2.8 % para tiempo) indican que estas variables explican solo una fracción limitada de la variabilidad total de la fluencia [29].

Al considerar simultáneamente la temperatura y tiempo en un modelo múltiple, el  $R^2$  ajustado se mantiene bajo (6.38 %), lo que confirma que la fluencia no responde de manera lineal simple a estas variables dentro del dominio experimental. Este resultado es consistente con la evidencia microestructural, que no mostró cambios de fase, sugiriendo que la fluencia está gobernada por mecanismos complejos de alivio de tensiones y no por transformaciones estructurales dominadas por la temperatura.

#### **3.2.4. Influencia del tratamiento térmico en la elongación**

A diferencia de la fluencia, la elongación mostró una dependencia significativa con el tiempo de tratamiento térmico. El modelo de regresión  $\text{Elongación} \sim \text{Tiempo}$  arrojó un coeficiente negativo estadísticamente significativo ( $p = 0.0263$ ), indicando que un aumento en el tiempo de permanencia conduce a una reducción en la elongación.

Este resultado sugiere que tiempos prolongados favorecen la recuperación y la reorganización de dislocaciones, reduciendo la capacidad de deformación plástica uniforme del material. La temperatura, por sí sola, no mostró un efecto significativo, lo que indica que, dentro del rango estudiado, su influencia es secundaria frente al tiempo.

El modelo múltiple confirmó esta tendencia, donde el tiempo mantuvo su significancia estadística ( $p = 0.0259$ ), mientras que la temperatura no resultó significativa. Este comportamiento explica por qué, experimentalmente, tratamientos a menor temperatura, pero con mayor tiempo mostraron cambios más notorios en elongación que tratamientos a mayor temperatura y menor tiempo.

### **3.2.5. Influencia del tratamiento térmico en la resistencia a la tracción**

En el caso de la resistencia última a la tracción, el análisis mostró una dependencia estadísticamente significativa con la temperatura ( $p= 0.0430$ ), mientras que el tiempo no resultó significativo. Esto indica que la tracción es más sensible al nivel térmico alcanzado que a la duración del tratamiento.

El modelo múltiple mostró una tendencia consistente, con un  $R^2$  del 27.3 %, lo que representa una capacidad explicativa moderada. Este comportamiento puede atribuirse a la activación térmica de mecanismos de recuperación que afectan la resistencia máxima sin modificar de manera apreciable la microestructura observable.

### **3.2.6. ANOVA**

El análisis ANOVA factorial permitió evaluar simultáneamente los efectos de la temperatura, tiempo y su interacción. Para la fluencia y la tracción, tanto los factores principales como la interacción resultaron altamente significativos ( $p < 0.001$ ), lo que indica que la respuesta mecánica depende de la combinación específica de temperatura y tiempo, y no únicamente de cada variable por separado [30].

En el caso de la elongación, tanto la temperatura como el tiempo resultaron significativos, pero la interacción no lo fue. Esto sugiere que la ductilidad responde de manera más aditiva a las variables de proceso, mientras que la resistencia está más influenciada por efectos combinados.

### **3.2.7. Modelos RSM**

Las superficies de respuesta construidas para fluencia, tracción y elongación mostraron bajos valores de  $R^2$  ajustado y ausencia de significancia estadística.

Además, la falta de error puro impidió una evaluación formal del ajuste del modelo [31].

Estos resultados indican que, aunque la metodología de superficie de respuesta es adecuada, el número de ensayos y su distribución no son suficientes para construir modelos predictivos y confiables. No obstante, las superficies obtenidas permiten identificar regiones de estabilidad y sirven como herramientas exploratorias para la visualización de tendencias dentro del dominio experimental.

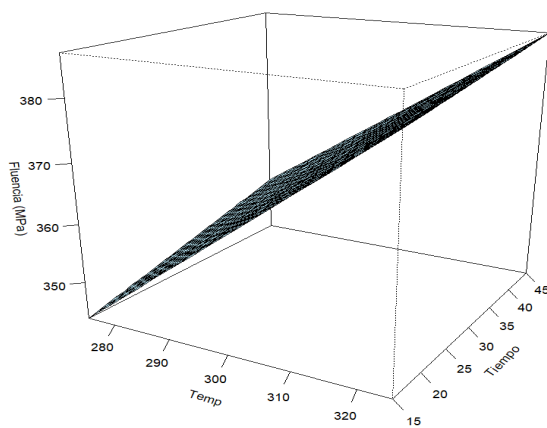


Figura 47: Superficie de respuesta: Fluencia

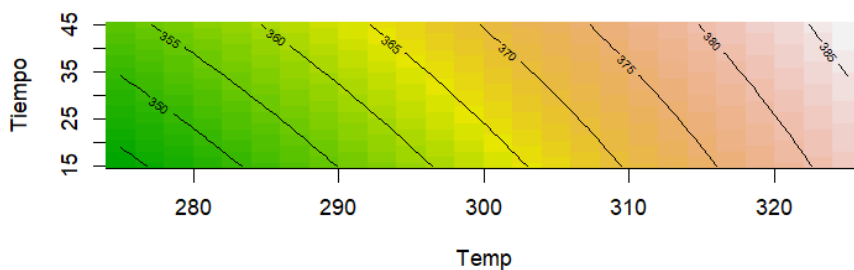


Figura 48: Respuesta (Fluencia) según factores

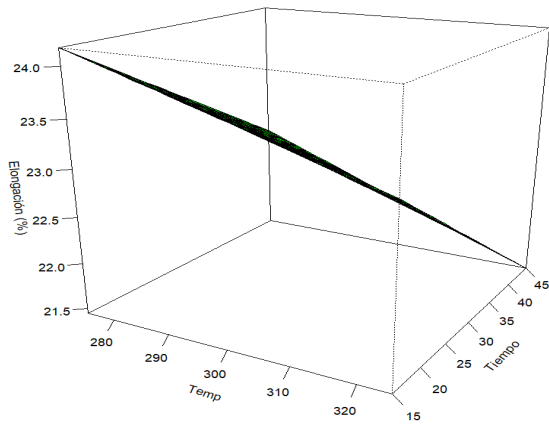


Figura 49: Superficie de respuesta (Elongación)

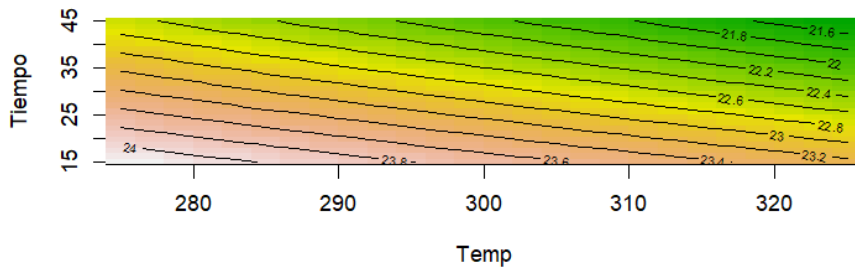


Figura 50: Respuesta (Elongación) según factores

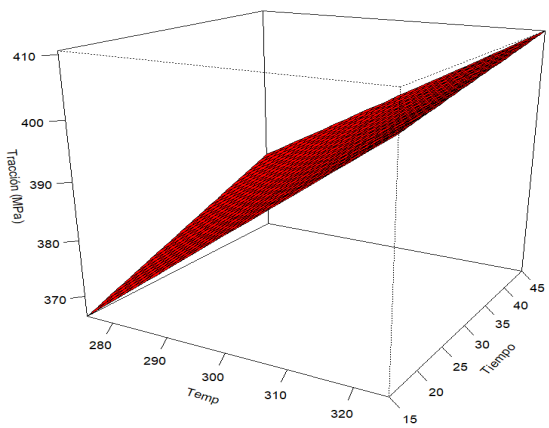


Figura 51: Superficie de respuesta (Tracción)

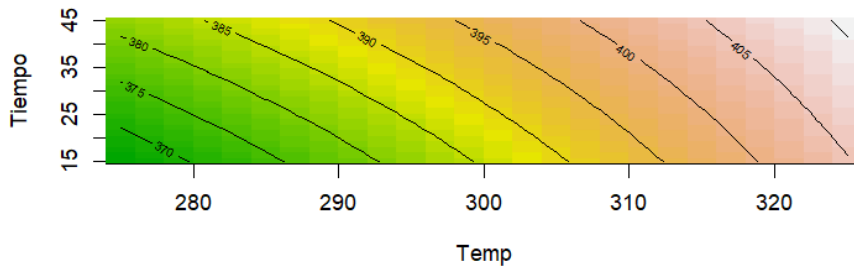


Figura 52: Respuesta (Tracción) según factores

### 3.2.8. Discusión estadística/metalúrgica

La ausencia de cambios microestructurales observables, combinada con la evidencia estadística, confirma que el tratamiento térmico actúa principalmente mediante alivio de tensiones residuales y recuperación subestructural. Este efecto resulta suficiente para mejorar la respuesta del material durante procesos posteriores de conformado, como el trefilado, sin comprometer significativamente la resistencia mecánica.

Desde una perspectiva industrial, los resultados indican que es posible ajustar el tratamiento térmico para mejorar la estabilidad del material, sin introducir una dispersión excesiva en sus propiedades mecánicas, lo que contribuye a la reducción de desperdicio y fallas durante la manufactura.

### 3.3. Estimación numérica con Python

Con Python se consiguió una estimación numérica dentro del dominio experimental. Las curvas de estimación obtenidas para la fluencia, la resistencia a la tracción y la elongación evidencia un comportamiento no monótono frente a las variables del proceso.

La fluencia muestra variaciones suaves, pero no lineales, sugiriendo que el tratamiento térmico induce mecanismos competitivos entre el alivio de tensiones internas y la posible recuperación microestructural parcial. Este comportamiento concuerda con la ausencia de tendencias lineales significativas observadas en los modelos estadísticos.

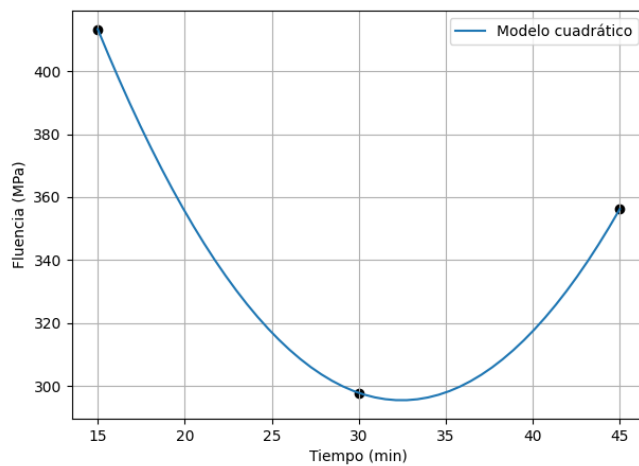
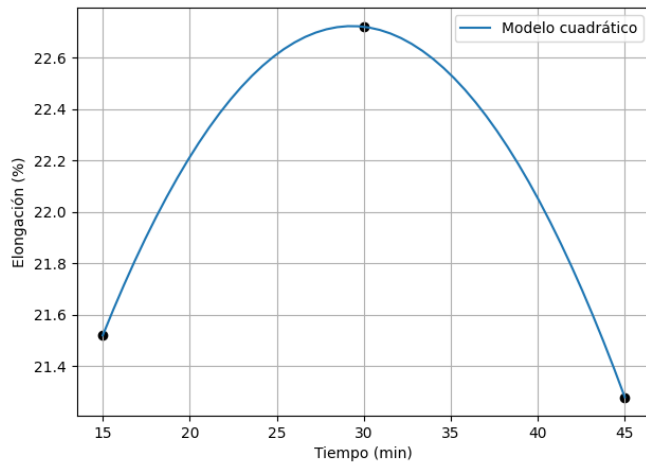


Figura 53: Estimación comportamiento de la fluencia a 300°C

En el caso de la elongación, las estimaciones numéricas revelan una mayor sensibilidad al tiempo de tratamiento que a la temperatura, especialmente para tiempos prolongados. Esta tendencia coincide con los resultados obtenidos mediante regresión y ANOVA, donde el tiempo mostró un efecto estadísticamente significativo sobre la ductilidad. Desde el punto de vista mecánico, esto puede asociarse a una reducción progresiva de la capacidad de deformación uniforme cuando el material es sometido a tratamientos más extensos, posiblemente debido a la disminución del endurecimiento por deformación efectivo.



**Figura 54:** Estimación del comportamiento de la elongación a 300°C

Las superficies tridimensionales estimadas para las propiedades mecánicas, construidas en función de la temperatura y tiempo, permiten visualizar de manera clara la ausencia de un óptimo definido dentro del dominio experimental. En lugar de un máximo o mínimo pronunciado, las superficies presentan regiones relativamente planas y transiciones suaves, lo que indica una baja sensibilidad local de las propiedades frente a pequeñas variaciones de los parámetros del tratamiento térmico. Esto concuerda con los modelos de RSM desarrollados en R, los cuales mostraron puntos estacionarios fuera del dominio experimental y superficies de tipo silla, confirmando la naturaleza exploratoria del análisis.

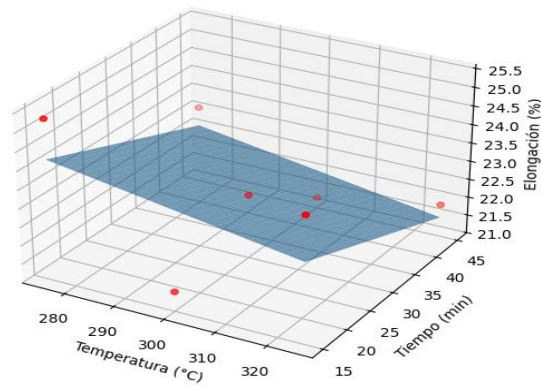


Figura 55: Modelo 3D Elongación

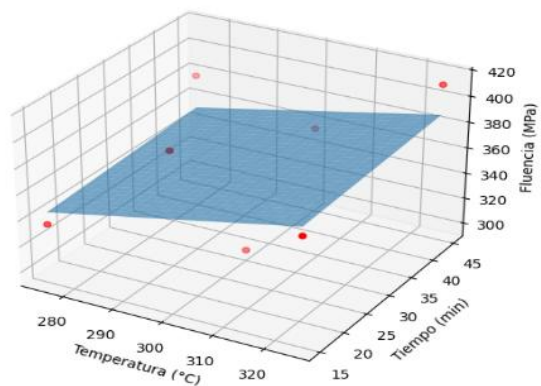


Figura 56: Modelo 3D Fluencia

### 3.4. Decisión

Con base al análisis mecánico y estadístico de los resultados obtenidos, la condición de tratamiento térmico a 300°C durante 30 minutos se identifica como la alternativa más eficiente para el objetivo de esta investigación, orientada a minimizar el riesgo de falla del tubo durante un proceso posterior de trefilado. En comparación, el tratamiento a 275°C durante 45 minutos, si bien conserva valores de elongación relativamente elevados, presenta una resistencia a la fluencia mayor y una mayor dependencia del tiempo de tratamiento, lo que sugiere una eliminación incompleta del

endurecimiento localizado inducido por el trabajo en frío del conformado. Esta condición podría incrementar las fuerzas requeridas durante el trefilado y reducir la estabilidad del proceso. Adicionalmente, al necesitar de mayor tiempo de aplicación de tratamiento, requiere de más costos de procesamiento debido a que la cámara térmica estaría trabajando 15 minutos adicionales, dado que debe producir esa cantidad extra de energía térmica.

Por otro lado, el tratamiento a 325°C durante 45 minutos conduce a valores elevados de fluencia y resistencia a la tracción, acompañados de una disminución apreciable de la elongación, lo que indica una tendencia hacia un material mecánicamente más rígido y con menor capacidad de redistribuir la deformación plástica. Esta combinación, aunque favorable desde el punto de vista de resistencia, resulta la menos adecuada para procesos de deformación plástica severa, debido al mayor riesgo de estricción localizada y fisuración.

En contraste, la condición de 300°C – 30 min representa un compromiso óptimo entre alivio de tensiones, fluencia moderada y ductilidad funcional, permitiendo atenuar el historial de deformación plástica sin introducir una pérdida significativa de capacidad de deformación, lo que se traduce en una mayor robustez del proceso de trefilado y una menor probabilidad de falla durante la ejecución.

### **3.5. Análisis económico**

Se sabe que, de la producción total, se desperdician en tubos alrededor de 3.16 toneladas/mes. Es decir, considerando el marco global.

Esto quiere decir que se pierde 12,170.27 USD/mes. Suponiendo una recuperación conservadora del 25% de los tubos al aplicar un proceso de tratamiento

térmico, se estarían recuperando 790 kg/mes, traducidos a 3,040 USD/mes recuperado y 36,480 USD/año.

Considerando una inversión de una cámara térmica marca SIFANG, modelo ZLQ-1000 con voltaje de 380V, 50 Hz y una potencia de 1000 kW al precio mínimo de 52,000 US\$ y, con el TT definido de 300°C durante 30 minutos, junto con el costo energético en Ecuador de aproximadamente 0.10 kWh:

$$1000 \text{ kW} \times 0.5 \text{ h} = 500 \frac{\text{kWh}}{\text{ciclo}}$$

Asumiendo 4 ciclos al mes:

$$4 \times 500 = 2,000 \text{ kWh/mes}$$

Con un costo energético mensual de:

$$2,000 \times 0.10 = 200 \text{ USD/mes}$$

Traducidos a 2,400 USD/año. El balance económico mensual queda como +3,040 USD/mes – 200 USD/mes = +2,840 USD/mes.

Recuperación de la inversión:

$$\frac{52,000}{36,480} = 1.4 \text{ años}$$

Sin considerar beneficios indirectos y otros gastos como instalación, mano de obra e inspección de calidad.

Se obtiene una rentabilidad relativamente buena.

Flujo de caja del proyecto:

Año	Flujo de caja USD
0	-52000
1	34080
2	34080
3	34080
4	34080
5	34080
6	34080
7	34080
8	34080
9	34080
10	34080

Tabla 3: Flujo de caja USD

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^n \frac{F}{(1+r)^t}$$

Donde:

- $I = 52000$
- $F = 34080$
- $r = 0.10$
- $n = 10$

Factor presente de una anualidad:

$$\frac{1 - (1 + 0.10)^{-10}}{0.10} = 6.145$$

$$VAN = -52000 + (34080 * 6.145)$$

$$VAN = USD 157,500$$

VAN positivo y elevado = valor económico real.

La TIR es la tasa  $r$  que hace:

$$0 = -52000 + \sum_{t=1}^{10} \frac{34080}{(1+r)^t}$$

$$TIR = 64 \%$$

El TIR es mayor al 10% (tasa de descuento) e indica que es rentable.

**Resumen:** El costo medio de la energía eléctrica en Ecuador para uso industrial se sitúa alrededor de USD 0.10 kWh, lo que implica que un horno de tratamiento térmico industrial de 1000 kW consume aproximadamente 500 kWh por ciclo de 30 minutos. Bajo una estrategia de operación de cuatro ciclos mensuales, el consumo energético asciende a 2000 kWh/mes, equivalente a un costo aproximado de USD 200/mes. Considerando una producción mensual de 45.70 toneladas de acero y una tasa de desperdicio de 6.92 %, se generan aproximadamente 3.16 toneladas de material descartado. La aplicación del tratamiento térmico permitió estimar de manera conservadora una recuperación del 25 % de este desperdicio, equivalente a 790 kg/mes. El beneficio económico alcanza aproximadamente USD 3040 por mes, superando el costo energético del proceso. Bajo estas condiciones y considerando una inversión inicial estimada de USD 520000 para la adquisición e instalación de una cámara de tratamiento térmico, el periodo de recuperación simple de la inversión se sitúa alrededor de 1.4 años, lo que demuestra la viabilidad económica del tratamiento térmico.

En adición, con el objetivo de evaluar la rentabilidad financiera del tratamiento térmico propuesto, se realizó un análisis de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR), considerando la inversión de USD 52,000, un flujo de

caja neto anual de USD 34,080 y un horizonte de evaluación de 10 años. Para el análisis se adoptó una tasa de descuento del 10% anual. Bajo estas proyecciones, el VAN del proyecto alcanza aproximadamente USD 157,500, lo que evidencia una generación de valor económico a lo largo de su vida útil. Asimismo, la TIR obtenida es cercana al 64%, valor considerablemente superior a la tasa de descuento empleada, confirmando que el proyecto es rentable [32].

## Capítulo 4

### 4. Conclusiones y recomendaciones

#### 4.1. Conclusiones

1. Se diseñó y validó un proceso de tratamiento térmico aplicado a tubos de acero galvanizado soldados, demostrando que la implementación de un tratamiento térmico de alivio de tensiones residuales permite modificar de manera controlada las propiedades mecánicas del material.
2. El análisis de las fallas presentadas en los tubos de acero permitió confirmar que las zonas críticas del material, particularmente el cordón de soldadura y la zona afectada por el calor (ZAC), concentran gradientes de propiedades mecánicas que favorecen la iniciación de fallo durante el proceso de trefilado.
3. La selección del rango de temperaturas para el tratamiento térmico se realizó considerando criterios metalúrgicos, mecánicos y operativos. El intervalo comprendido entre 275 °C y 325 °C corresponde a un régimen subcrítico, en el cual no se producen transformaciones de fase, pero sí se favorecen los mecanismos de recuperación y alivio de tensiones residuales generadas durante la soldadura y conformado previo del tubo.
4. La aplicación adecuada del tratamiento térmico redujo los gradientes microestructurales, promoviendo una respuesta mecánica más homogénea entre el metal base, la ZAC y el cordón de soldadura, mientras que condiciones excesivas o insuficientes resultaron perjudiciales al afectar la ductilidad o no eliminar el endurecimiento previo.
5. Los resultados indicaron que el equilibrio entre resistencia y ductilidad es el criterio clave para garantizar la integridad del tubo, identificándose la condición de

tratamiento térmico de 300 °C durante 30 min como la más eficiente y adecuada para su aplicación industrial.

6. El análisis estadístico confirmó que la temperatura, el tiempo y su interacción influyen significativamente en las propiedades mecánicas, evidenciando la necesidad de controlar ambos parámetros de forma conjunta.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Se recomienda el uso de atmósfera protegida durante el tratamiento térmico para evitar reacciones por el calor con la superficie del material como oxidación del zinc.
- También se recomienda extender el análisis microestructural mediante SEM para analizar la morfología de la ferrita, ZAC y cordón de soldadura y ver al alivio de tensiones generadas post tratamiento.
- Incorporar ensayos de dureza en perfiles transversales para verificar la homogenización lograda por el TT y detectar posibles zonas de endurecimiento residual.
- Evaluar la influencia del medio de enfriamiento para determinar si su comportamiento cambia al ser enfriado por pistolas de aire o dentro del horno.
- Aplicar un diseño de experimentos para uso eficiente de recursos sin comprometer confiabilidad de los resultados y poder realizar un análisis predictivo fuera del dominio experimental.

## Referencias

- [1] D. R. Askeland, CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES, Ciudad de México: International Thomson Editores, 1999.
- [2] M. Katsumi y N. Yutaka , «Manufacturing processes and products of steel pipes and tubes in JFE steel,» *JFE technical report*, vol. 7, p. 6, 2006.
- [3] N. E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials, London: Pearson, 2012.
- [4] L. G. Ramirez Ponce y C. R. Suarez Carpio, «Incremento de la disponibilidad de una línea de producción en una compañía que procesa tubos de acero,» Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2019.
- [5] R. Lopez Townsend y D. Rodriguez, «Reducción de desperdicios en una línea de conformado de tubos y cañerías de acero,» Universidad de Gent, Brujas, 2006.
- [6] Y.-H. Lee, G.-I. Kim, K. M. Kim, S. J. Ko, W. C. Kim y J. G. Kim, «Localized corrosion occurrence in low carbon steel pipe caused by microstructural inhomogeneity,» *MDPI*, vol. 15, n° 1870, p. 14, 2022.
- [7] Y. Lee, J. Lim y Y. Moon, «Mechanical characteristics of low carbon steel pipe bent by local induction heating with small bending radii,» *Materials Transactions*, vol. 53, n° 5, pp. 847-852, 2012.
- [8] J. Kec y I. Cerny, «Stress-strain assessment of dents in wall of high pressure gas pipeline,» *Structural Integrity Procedia*, vol. 5, pp. 340-346, 2017.

- [9] D. T. Llewellyn y R. C. Hudd, *Steels Metallurgy and Applications*, Woburn: Butterworth Heinemann, 1998.
- [10] M. Paredes, J. Lian, T. Wierzbicki, M. E. Cristea, S. Munstermann y P. Darcis, «Modeling of plasticity and fracture behavior of X65 steels: Seam weld and Seamless pipes,» *Massachusetts Institute of Technology*, p. 30, 2018.
- [11] S. Han, «Collapse strength prediction of ERW pipes subjected to external pressure by simulation analysis of manufacturing process,» *Seul National University Graduate School*, Seul, 2020.
- [12] L. Zhonghua y G. Haicheng, «Bauschinger effect and residual phase stresses in two ductile-phase steels: part 1. The influence of phase stresses on the bauschinger effect,» *Metallurgical transactions*, vol. 21, n° A, pp. 717-725, 1990.
- [13] D. H. Phillips, *Welding Engineering: an introduction*, John Wiley and Sons, 2023.
- [14] ASM International, *Welding, brazing and soldering*, ASM Handbook, 1993.
- [15] S. Karaoglu y A. Secgin, «Sensitivity analysis of submerged arc welding process parameters,» *Materials Process Technology*, vol. 202, 2008.
- [16] American Welding Society, *Standard Welding Terms and Definitions*, Miami: ASM International, 2020.
- [17] O. Fertas , Z. Boumerzoug y B. Nessark, «Heat treatment effect on galvanized low carbon steel,» *Suranaree J. Sci. Technol.* , vol. 28, n° 1, pp. 1-7, 2020.

- [18] A. V. Svedrlin y A. R. Ness, «Fundamental Concepts in Steel Heat Treatment,» 1997, pp. 1-44.
- [19] G. Gottstein, *Physical foundations of materials science*, Berlin: Springer, 2004.
- [20] N. Ben Moussa, H. Sidhom y C. Braham, «Numerical and experimental analysis of residual stress and plastic strain distributions in machined stainless steel,» *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 64, n° 1, pp. 82-93, 2012.
- [21] M. Ali Mirzari, K.-i. Manabe y T. Mabuchio, «Deformation characteristics of microtubes in flaring test,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 201, pp. 214-219, 2008.
- [22] P. Dong, S. Song y J. Zhang, «Analysis of residual stress relief mechanisms in post-weld heat treatment,» *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 122, pp. 6-14, 2014.
- [23] S. Mahbour Rahman, K. Ehsanul Karim y M. H. Shahriar Simanto, «Effect os Heat Treatment on Low Carbon Steel: An Experimental Investigation,» *Applied Mechanics and Materials*, vol. 880, pp. 7-12, 2017.
- [24] B. C. Kandpal, D. Gupta, A. Kumar, A. Kumar Jaisal, a. Kumar Ranjan, A. Srivastava y P. Chaudhary, «Effect of heat treatment on properties and microstructure of steels,» *Materials Today: Proceedings*, pp. 1-7, 2020.

- [25] N. Sultana, F. Hasan y M. Islam, «Analysis of Mechanical Properties of mild steel Applying Various Heat Treatment,» de *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*, Bangladesh, 2014.
- [26] Q. Chao, S. Thomas, N. Birbilis, P. Cizek, P. D. Hodgson y D. Fabijanic, «The effect of post-processing heat treatment on the microstructure, residual stress and mechanical properties of selective laser melted 316L stainless steel,» *Materials Science and Engineering*, vol. 821, 2021.
- [27] Z. Zhang y L. Wang, *Advanced Statistics Using R*, Paris: IDSA PRESS GRANGER, IN, 2017.
- [28] J. Gutiérrez, E. Chica y J. F. Pérez, «Análisis de varianzas y coeficiente de variación como criterios de repetibilidad,» *Revista UIS Ingenierías*, vol. 22, n° 3, pp. 115-134, 2023.
- [29] J. Gao, «R-Squared - How much variation is explained?,» *Original Research Article*, vol. 5, n° 4, pp. 104-109, 2024.
- [30] R. Henson, «Analysis of Variance (ANOVA),» *Elsevier*, vol. 1, pp. 477-481, 2015.
- [31] M. Reji y R. Kumar, «Response surface methodology (RSM): An overview to analyze multivariate data,» *Indian Journal of Microbiology Research*, vol. 9, n° 4, pp. 241-248, 2022.

[32] É. P. Simisterra Quiñonez, R. A. Rosa Monserrate y S. C. Suárez López, «La variabilidad de un proyecto, el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR),» *PROSCIENCES; Revista de producción*, vol. 2, nº 17, pp. 9-15, 2018.

## Anexos

### Prueba F

#### Fluencia

var.test(Fluencia ~ Tratado, data = datos)

F test to compare two variances

data: Fluencia by Tratado

F = 0.33538, num df = 2, denom df = 6, p-value =  
0.5447

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

0.04619594 13.19082276

sample estimates:

ratio of variances

0.3353759

#### Elongación

var.test(Elongacion ~ Tratado, data = datos)

F test to compare two variances

data: Elongacion by Tratado

F = 8.9701, num df = 2, denom df = 6, p-value =  
0.03148

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1

95 percent confidence interval:

1.235582 352.809054

sample estimates:

ratio of variances

8.970149

#### Tracción

var.test(Traccion ~ Tratado, data = datos)

F test to compare two variances

data: Traccion by Tratado  
 F = 0.62961, num df = 2, denom df = 6, p-value = 0.8707  
 alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1  
 95 percent confidence interval:  
 0.08672535 24.76361816  
 sample estimates:  
 ratio of variances  
 0.6296135

## Coeficientes de varianza

CV: fluencia – 11.21802 ; Elongacion – 6.599729; Traccion – 7.993462

## Modelo lineal

### Fluencia

lm(formula = Fluencia ~ Temp, data = datos\_c\_TT)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-73.82	-10.62	-6.12	30.44	53.98

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	150.1200	128.2762	1.170	0.257
Temp	0.7133	0.4267	1.672	0.112

Residual standard error: 36.95 on 18 degrees of freedom  
 Multiple R-squared: 0.1344, Adjusted R-squared: 0.08631  
 F-statistic: 2.795 on 1 and 18 DF, p-value: 0.1119

lm(formula = Fluencia ~ Tiempo, data = datos\_c\_TT)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-73.48	-18.27	6.43	22.59	61.16

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	350.0929	21.3746	16.379	2.93e-12 ***
Tiempo	0.4562	0.6341	0.719	0.481

---

Signif. Codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 39.16 on 18 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.02795, Adjusted R-squared: -0.02606  
F-statistic: 0.5175 on 1 and 18 DF, p-value: 0.4811

lm(formula = Fluencia ~ Temp + Tiempo, data = datos\_c\_TT)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-73.478	-11.782	-0.019	23.938	61.165

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	136.0929	131.1759	1.037	0.314
Temp	0.7133	0.4319	1.652	0.117
Tiempo	0.4562	0.6057	0.753	0.462

Residual standard error: 37.41 on 17 degrees of freedom  
Multiple R-squared: 0.1623, Adjusted R-squared: 0.0638  
F-statistic: 1.647 on 2 and 17 DF, p-value: 0.2219

## Elongación

lm(formula = Elongacion ~ Temp, data = datos\_c\_TT)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.922	-1.045	-0.312	1.086	3.454

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	29.38200	6.39148	4.597	0.000224 ***
Temp	-0.02143	0.02126	-1.008	0.326757

---

Signif. Codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.841 on 18 degrees of freedom  
Multiple R-squared: 0.05344, Adjusted R-squared: 0.0008575  
F-statistic: 1.016 on 1 and 18 DF, p-value: 0.3268

lm(formula = Elongacion ~ Tiempo, data = datos\_c\_TT)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-3.1768	-0.5696	0.0047	1.3504	2.2197

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	24.93330	0.89722	27.790	3.09e-16 ***
Tiempo	-0.06443	0.02662	-2.421	0.0263 *

---

Signif. Codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.644 on 18 degrees of freedom  
 Multiple R-squared: 0.2456, Adjusted R-squared: 0.2037  
 F-statistic: 5.86 on 1 and 18 DF, p-value: 0.02628

lm(formula = Elongacion ~ Temp + Tiempo, data = datos\_c\_TT)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-3.1768	-0.5128	0.0241	0.8171	2.4390

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	31.36330	5.71754	5.485	4.02e-05 ***
Temp	-0.02143	0.01883	-1.138	0.2707
Tiempo	-0.06443	0.02640	-2.441	0.0259 *

---

Signif. Codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.63 on 17 degrees of freedom  
 Multiple R-squared: 0.299, Adjusted R-squared: 0.2166  
 F-statistic: 3.626 on 2 and 17 DF, p-value: 0.0488

## Tracción

lm(formula = Traccion ~ Temp + Tiempo, data = datos\_c\_TT)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-42.610	-11.109	-3.061	15.336	52.089

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	170.7112	92.6685	1.842	0.0830 .
Temp	0.6737	0.3051	2.208	0.0413 *
Tiempo	0.5266	0.4279	1.231	0.2352

---

Signif. Codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 26.43 on 17 degrees of freedom  
 Multiple R-squared: 0.2732, Adjusted R-squared: 0.1877  
 F-statistic: 3.195 on 2 and 17 DF, p-value: 0.06641

Response: Elongacion

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value
factor(Temp)	2	18.8036	9.4018	4.8345
factor(Tiempo)	2	16.4188	8.2094	4.2214
factor(Temp):factor(Tiempo)	2	3.9639	1.9819	1.0191
Residuals	13	25.2815	1.9447	

Pr(>F)

```

factor(Temp)          0.02694 *
factor(Tiempo)        0.03866 *
factor(Temp):factor(Tiempo) 0.38801
Residuals

```

---

Signif. Codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Response: Traccion

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
factor(Temp)	2	4144.7	2072.4	148.11	
factor(Tiempo)	2	6639.0	3319.5	237.24	
factor(Temp):factor(Tiempo)	2	5366.6	2683.3	191.77	
Residuals	13	181.9	14.0		

	Pr(>F)
factor(Temp)	1.132e-09 ***
factor(Tiempo)	5.874e-11 ***
factor(Temp):factor(Tiempo)	2.248e-10 ***
Residuals	

---

Signif. Codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

## RSM

### Fluencia

```

rsm(formula = Fluencia ~ FO(Temp, Tiempo) + TWI(Temp, Tiempo),
     data = datos_TT)

```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	114.7571429	727.3451505	0.1578	0.8847
Temp	0.8143000	2.4190503	0.3366	0.7586
Tiempo	1.2530000	21.6866704	0.0578	0.9576
Temp:Tiempo	-0.0033533	0.0721221	-0.0465	0.9658

Multiple R-squared: 0.1343, Adjusted R-squared: -0.7313  
F-statistic: 0.1552 on 3 and 3 DF, p-value: 0.9199

### Analysis of Variance Table

Response: Fluencia

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(Temp, Tiempo)	2	1355.8	677.89	0.2317	0.8062
TWI(Temp, Tiempo)	1	6.3	6.33	0.0022	0.9658
Residuals	3	8777.7	2925.90		
Lack of fit	3	8777.7	2925.90	NaN	NaN
Pure error	0	0.0	NaN		

Stationary point of response surface:

Temp	Tiempo
373.6581	242.8330

Eigenanalysis:  
 eigen() decomposition  
 \$values  
 [1] 0.001676667 -0.001676667

\$vectors  
           [,1]    [,2]  
 Temp -0.7071068 -0.7071068  
 Tiempo 0.7071068 -0.7071068

**Elongación**

rsm(formula = Elongacion ~ FO(Temp, Tiempo) + TWI(Temp, Tiempo),  
 data = datos\_TT)

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	29.1628571	22.4783184	1.2974	0.2853
Temp	-0.0154000	0.0747598	-0.2060	0.8500
Tiempo	0.0046667	0.6702181	0.0070	0.9949
Temp:Tiempo	-0.0002000	0.0022289	-0.0897	0.9342

Multiple R-squared: 0.3874, Adjusted R-squared: -0.2253  
 F-statistic: 0.6323 on 3 and 3 DF, p-value: 0.6422

Analysis of Variance Table

Response: Elongacion

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(Temp, Tiempo)	2	5.2783	2.6391	0.9444	0.4807
TWI(Temp, Tiempo)	1	0.0225	0.0225	0.0081	0.9342
Residuals	3	8.3835	2.7945		
Lack of fit	3	8.3835	2.7945	NaN	NaN
Pure error	0	0.0000	NaN		

Stationary point of response surface:  
       Temp  Tiempo  
 23.33333 -77.00000

Eigenanalysis:  
 eigen() decomposition  
 \$values  
 [1] 1e-04 -1e-04

\$vectors  
           [,1]    [,2]  
 Temp -0.7071068 -0.7071068  
 Tiempo 0.7071068 -0.7071068

**Tracción**

```
rsm(formula = Traccion ~ FO(Temp, Tiempo) + TWI(Temp, Tiempo),
    data = datos_TT)
```

```
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 121.9419048 522.6349215 0.2333 0.8305
Temp         0.8611000  1.7382121 0.4954 0.6543
Tiempo       2.2265556 15.5829887 0.1429 0.8954
Temp:Tiempo  -0.0062467  0.0518235 -0.1205 0.9117
```

```
Multiple R-squared: 0.2261, Adjusted R-squared: -0.5477
F-statistic: 0.2922 on 3 and 3 DF, p-value: 0.8304
```

#### Analysis of Variance Table

Response: Traccion

```
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
FO(Temp, Tiempo) 2 1302.5  651.24 0.4311 0.6846
TWI(Temp, Tiempo) 1  21.9  21.95 0.0145 0.9117
Residuals        3 4532.1 1510.69
Lack of fit      3 4532.1 1510.69  NaN  NaN
Pure error       0  0.0  NaN
```

Stationary point of response surface:

```
Temp Tiempo
356.4390 137.8495
```

Eigenanalysis:

eigen() decomposition

\$values

```
[1] 0.003123333 -0.003123333
```

\$vectors

```
      [,1] [,2]
Temp -0.7071068 -0.7071068
Tiempo 0.7071068 -0.7071068
```

## Programación en Python

### Estimación comportamiento de la fluencia

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import interp1d
from sklearn.linear_model import LinearRegression
```

```

# Datos experimentales
data = {
    "Temp": [300, 275, 325, 275, 325, 300, 300],
    "Tiempo": [30, 45, 15, 15, 45, 15, 45],
    "Fluencia": [297.77, 377.73, 373.70, 335.5, 410.9, 413.4, 356.2],
    "Traccion": [346.87, 397.9, 394.77, 356.4, 426.9, 427.5, 385.6],
    "Elongacion": [22.72, 23.09, 24.39, 25.31, 21.87, 21.52, 21.28]
}

df = pd.DataFrame(data)

# Filtrar temperatura fija
df_300 = df[df["Temp"] == 300]

# Interpolación
f_interp = interp1d(
    df_300["Tiempo"],
    df_300["Fluencia"],
    kind="linear"
)

# Dominio continuo
tiempo_cont = np.linspace(15, 45, 50)
fluencia_est = f_interp(tiempo_cont)

# Gráfico
plt.figure(figsize=(7,5))
plt.plot(tiempo_cont, fluencia_est, label="Estimación")
plt.scatter(df_300["Tiempo"], df_300["Fluencia"], color="red", label="Datos
reales")
plt.xlabel("Tiempo (min)")
plt.ylabel("Fluencia (MPa)")

```

```
plt.title("Estimación de fluencia a 300 °C")
```

```
plt.legend()
```

```
plt.grid(True)
```

```
plt.show()
```

```
coef = np.polyfit(df_300["Tiempo"], df_300["Fluencia"], 2)
```

```
modelo = np.poly1d(coef)
```

```
plt.figure(figsize=(7,5))
```

```
plt.plot(tiempo_cont, modelo(tiempo_cont), label="Modelo cuadrático")
```

```
plt.scatter(df_300["Tiempo"], df_300["Fluencia"], color="black")
```

```
plt.xlabel("Tiempo (min)")
```

```
plt.ylabel("Fluencia (MPa)")
```

```
plt.legend()
```

```
plt.grid(True)
```

```
plt.show()
```

```
coef = np.polyfit(df_300["Tiempo"], df_300["Fluencia"], 2)
```

```
modelo = np.poly1d(coef)
```

```
plt.figure(figsize=(7,5))
```

```
plt.plot(tiempo_cont, modelo(tiempo_cont), label="Modelo cuadrático")
```

```
plt.scatter(df_300["Tiempo"], df_300["Fluencia"], color="black")
```

```
plt.xlabel("Tiempo (min)")
```

```
plt.ylabel("Fluencia (MPa)")
```

```
plt.legend()
```

```
plt.grid(True)
```

```
plt.show()
```

```
X = df[["Temp", "Tiempo"]]
```

```
y = df["Fluencia"]
```

```

modelo = LinearRegression()
modelo.fit(X, y)

temp_grid, time_grid = np.meshgrid(
    np.linspace(275, 325, 30),
    np.linspace(15, 45, 30)
)

fluencia_pred = modelo.predict(
    np.column_stack([temp_grid.ravel(), time_grid.ravel()])
).reshape(temp_grid.shape)

from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

fig = plt.figure(figsize=(8,6))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

ax.plot_surface(temp_grid, time_grid, fluencia_pred, alpha=0.6)
ax.scatter(df["Temp"], df["Tiempo"], df["Fluencia"], color="red")

ax.set_xlabel("Temperatura (°C)")
ax.set_ylabel("Tiempo (min)")
ax.set_zlabel("Fluencia (MPa)")

plt.show()

```

### **Estimación comportamiento de la elongación**

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import interp1d
from sklearn.linear_model import LinearRegression

```

```

# Datos experimentales
data = {
    "Temp": [300, 275, 325, 275, 325, 300, 300],
    "Tiempo": [30, 45, 15, 15, 45, 15, 45],
    "Fluencia": [297.77, 377.73, 373.70, 335.5, 410.9, 413.4, 356.2],
    "Traccion": [346.87, 397.9, 394.77, 356.4, 426.9, 427.5, 385.6],
    "Elongacion": [22.72, 23.09, 24.39, 25.31, 21.87, 21.52, 21.28]
}

df = pd.DataFrame(data)

# Filtrar temperatura fija
df_300 = df[df["Temp"] == 300]

# Interpolación
f_interp = interp1d(
    df_300["Tiempo"],
    df_300["Elongacion"],
    kind="linear"
)

# Dominio continuo
tiempo_cont = np.linspace(15, 45, 50)
elongacion_est = f_interp(tiempo_cont)

# Gráfico
plt.figure(figsize=(7,5))
plt.plot(tiempo_cont, elongacion_est, label="Estimación")
plt.scatter(df_300["Tiempo"], df_300["Elongacion"], color="red",
label="Datos reales")
plt.xlabel("Tiempo (min)")

```

```
plt.ylabel("Elongación (%)")
plt.title("Estimación de elongación a 300 °C")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

```
coef = np.polyfit(df_300["Tiempo"], df_300["Elongacion"], 2)
modelo = np.poly1d(coef)
```

```
plt.figure(figsize=(7,5))
plt.plot(tiempo_cont, modelo(tiempo_cont), label="Modelo cuadrático")
plt.scatter(df_300["Tiempo"], df_300["Elongacion"], color="black")
plt.xlabel("Tiempo (min)")
plt.ylabel("Elongacion (%)")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

```
coef = np.polyfit(df_300["Tiempo"], df_300["Elongacion"], 2)
modelo = np.poly1d(coef)
```

```
plt.figure(figsize=(7,5))
plt.plot(tiempo_cont, modelo(tiempo_cont), label="Modelo cuadrático")
plt.scatter(df_300["Tiempo"], df_300["Elongacion"], color="black")
plt.xlabel("Tiempo (min)")
plt.ylabel("Elongación (%)")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

```
X = df[["Temp", "Tiempo"]]
y = df["Elongacion"]
```

```

modelo = LinearRegression()
modelo.fit(X, y)

temp_grid, time_grid = np.meshgrid(
    np.linspace(275, 325, 30),
    np.linspace(15, 45, 30)
)

elongacion_pred = modelo.predict(
    np.column_stack([temp_grid.ravel(), time_grid.ravel()])
).reshape(temp_grid.shape)

from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

fig = plt.figure(figsize=(8,6))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

ax.plot_surface(temp_grid, time_grid, elongacion_pred, alpha=0.6)
ax.scatter(df["Temp"], df["Tiempo"], df["Elongacion"], color="red")

ax.set_xlabel("Temperatura (°C)")
ax.set_ylabel("Tiempo (min)")
ax.set_zlabel("Elongación (%)")

plt.show()

```

### **Estimación comportamiento de la tracción**

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import interp1d

```

```

from sklearn.linear_model import LinearRegression

# Datos experimentales
data = {
    "Temp": [300, 275, 325, 275, 325, 300, 300],
    "Tiempo": [30, 45, 15, 15, 45, 15, 45],
    "Fluencia": [297.77, 377.73, 373.70, 335.5, 410.9, 413.4, 356.2],
    "Traccion": [346.87, 397.9, 394.77, 356.4, 426.9, 427.5, 385.6],
    "Elongacion": [22.72, 23.09, 24.39, 25.31, 21.87, 21.52, 21.28]
}

df = pd.DataFrame(data)

# Filtrar temperatura fija
df_300 = df[df["Temp"] == 300]

# Interpolación
f_interp = interp1d(
    df_300["Tiempo"],
    df_300["Traccion"],
    kind="linear"
)

# Dominio continuo
tiempo_cont = np.linspace(15, 45, 50)
traccion_est = f_interp(tiempo_cont)

# Gráfico
plt.figure(figsize=(7,5))
plt.plot(tiempo_cont, traccion_est, label="Estimación")
plt.scatter(df_300["Tiempo"], df_300["Traccion"], color="red", label="Datos
reales")

```

```
plt.xlabel("Tiempo (min)")
plt.ylabel("Tracción (MPa)")
plt.title("Estimación de tracción a 300 °C")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

```
coef = np.polyfit(df_300["Tiempo"], df_300["Traccion"], 2)
modelo = np.poly1d(coef)
```

```
plt.figure(figsize=(7,5))
plt.plot(tiempo_cont, modelo(tiempo_cont), label="Modelo cuadrático")
plt.scatter(df_300["Tiempo"], df_300["Traccion"], color="black")
plt.xlabel("Tiempo (min)")
plt.ylabel("Traccion (MPa)")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

```
coef = np.polyfit(df_300["Tiempo"], df_300["Traccion"], 2)
modelo = np.poly1d(coef)
```

```
plt.figure(figsize=(7,5))
plt.plot(tiempo_cont, modelo(tiempo_cont), label="Modelo cuadrático")
plt.scatter(df_300["Tiempo"], df_300["Traccion"], color="black")
plt.xlabel("Tiempo (min)")
plt.ylabel("Tracción (MPa)")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

```
X = df[["Temp", "Tiempo"]]
```

```

y = df["Traccion"]

modelo = LinearRegression()
modelo.fit(X, y)

temp_grid, time_grid = np.meshgrid(
    np.linspace(275, 325, 30),
    np.linspace(15, 45, 30)
)

traccion_pred = modelo.predict(
    np.column_stack([temp_grid.ravel(), time_grid.ravel()])
).reshape(temp_grid.shape)

from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

fig = plt.figure(figsize=(8,6))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

ax.plot_surface(temp_grid, time_grid, traccion_pred, alpha=0.6)
ax.scatter(df["Temp"], df["Tiempo"], df["Traccion"], color="red")

ax.set_xlabel("Temperatura (°C)")
ax.set_ylabel("Tiempo (min)")
ax.set_zlabel("Tracción (MPa)")

plt.show()

```

### **Programación en R**

```

install.packages("effsize")
install.packages("fmsb")
install.packages("qcc")

```

```
library(readxl)
library(rsm)

datos <- resultados_TT
datos_TT <- subset(datos, Tratado == "Si")
datos_TT

modelo_fy <- rsm(
  Fluencia ~ SO(Temp, Tiempo),
  data = datos
)

summary(modelo_fy)

modelo_el <- rsm(
  Elongacion ~ SO(Temp, Tiempo),
  data = datos
)

summary(modelo_el)

par(mfrow=c(1,2))

persp(modelo_fy,
  Temp ~ Tiempo,
  zlab="Fluencia (MPa)",
  xlab="Temperatura (°C)",
  ylab="Tiempo (min)",
  main="Superficie de Fluencia")

persp(modelo_el,
  Temp ~ Tiempo,
```

```
zlab="Elongación (%)",  
xlab="Temperatura (°C)",  
ylab="Tiempo (min)",  
main="Superficie de Elongación")
```

```
#####
```

```
datos$Tratado <- factor(datos$Tratado, levels = c("No", "Si"))  
str(datos)
```

```
t.test(Fluencia ~ Tratado, data = datos)  
t.test(Elongacion ~ Tratado, data = datos)
```

```
library(effsize)  
cohen.d(datos$Fluencia, datos$Tratado)
```

```
lm(Fluencia ~ Tiempo, data = datos_TT)
```

```
lm(Fluencia ~ Temp, data = datos_TT)
```

```
lm(Fluencia ~ Temp + Tiempo, data = datos_TT)
```

```
modelo <- lm(Fluencia ~ Temp + Tiempo, data = datos_TT)  
summary(modelo)
```

```
cor(datos_TT$Tiempo, datos_TT$Fluencia)  
cor(datos_TT$Temp, datos_TT$Fluencia)
```

```
prcomp(datos_TT[, c("Fluencia", "Traccion", "Elongacion")], scale=TRUE)
```

```
cor(datos_TT$Tiempo, datos_TT$Elongacion)  
cor(datos_TT$Temp, datos_TT$Elongacion)
```

```

cor(datos_TT$Tiempo, datos_TT$Traccion)
cor(datos_TT$Temp, datos_TT$Traccion)

library(ggplot2)

ggplot(datos_TT, aes(Tiempo, Fluencia, color=factor(Temp))) +
  geom_point(size=3) +
  geom_smooth(method="lm", se=FALSE)

ggplot(datos_TT, aes(Temp, Fluencia, color=factor(Tiempo))) +
  geom_point(size=3) +
  geom_smooth(method="lm", se=FALSE)

### Boxplot
ggplot(datos, aes(x = Tratado, y = Fluencia, fill = Tratado)) +
  geom_boxplot(alpha = 0.6, width = 0.5) +
  geom_jitter(width = 0.1, size = 2) +
  labs(
    title = "Comparación del límite de fluencia",
    x = "Tratamiento térmico",
    y = "Fluencia (MPa)"
  ) +
  theme_minimal()

###boxplot
ggplot(datos, aes(x = Tratado, y = Elongacion, fill = Tratado)) +
  geom_boxplot(alpha = 0.6, width = 0.5) +
  geom_jitter(width = 0.1, size = 2) +
  labs(

```

```

    title = "Comparación de elongación",
    x = "Tratamiento térmico",
    y = "Elongación (%)"
  ) +
  theme_minimal()

ggplot(datos, aes(x = Tratado, y = Traccion, fill = Tratado)) +
  geom_boxplot(alpha = 0.6, width = 0.5) +
  geom_jitter(width = 0.1, size = 2) +
  labs(
    title = "Comparación de esfuerzo último",
    x = "Tratamiento térmico",
    y = "Elongación (%)"
  ) +
  theme_minimal()

```

#####dos variables

```

ggplot(datos_TT, aes(x = Temp, y = Fluencia)) +
  geom_point(size = 3) +
  geom_smooth(method = "lm", se = TRUE) +
  labs(
    title = "Fluencia en función de la temperatura",
    x = "Temperatura (°C)",
    y = "Fluencia (MPa)"
  ) +
  theme_minimal()

```

```

ggplot(datos_TT, aes(x = Tiempo, y = Fluencia)) +
  geom_point(size = 3) +
  geom_smooth(method = "lm", se = TRUE) +
  labs(
    title = "Fluencia en función del tiempo",

```

```
x = "Tiempo (min)",  
y = "Fluencia (MPa)"  
) +  
theme_minimal()
```

```
ggplot(datos_TT, aes(x = Temp, y = Elongacion)) +  
  geom_point(size = 3) +  
  geom_smooth(method = "lm", se = TRUE) +  
  labs(  
    title = "Elongación en función del temperatura",  
    x = "Tiempo (min)",  
    y = "Fluencia (MPa)"  
  ) +  
  theme_minimal()
```

```
ggplot(datos_TT, aes(x = Tiempo, y = Elongacion)) +  
  geom_point(size = 3) +  
  geom_smooth(method = "lm", se = TRUE) +  
  labs(  
    title = "Elongacion en función del tiempo",  
    x = "Tiempo (min)",  
    y = "Fluencia (MPa)"  
  ) +  
  theme_minimal()
```

```
ggplot(datos_TT, aes(x = Elongacion, y = Fluencia)) +  
  geom_point(size = 3) +  
  labs(  
    title = "Relación entre fluencia y elongación",  
    x = "Elongación (%)",  
    y = "Fluencia (MPa)"  
  ) +
```

```
theme_minimal()
```

```
####
```

```
library(dplyr)
```

```
resumen <- datos %>%
```

```
  group_by(Tratado) %>%
```

```
  summarise(
```

```
    media = mean(Fluencia),
```

```
    sd = sd(Fluencia)
```

```
  )
```

```
ggplot(resumen, aes(x = Tratado, y = media, fill = Tratado)) +
```

```
  geom_col(width = 0.5) +
```

```
  geom_errorbar(
```

```
    aes(ymin = media - sd, ymax = media + sd),
```

```
    width = 0.15
```

```
  ) +
```

```
  labs(
```

```
    title = "Fluencia promedio  $\pm$  desviación estándar",
```

```
    x = "Condición del material",
```

```
    y = "Fluencia (MPa)"
```

```
  ) +
```

```
  theme_minimal()
```

```
elong <- datos %>%
```

```
  group_by(Tratado) %>%
```

```
  summarise(
```

```
    media = mean(Elongacion),
```

```
    sd = sd(Elongacion)
```

```
)
```

```
ggplot(elong, aes(x = Tratado, y = media, fill = Tratado)) +  
  geom_col(width = 0.5) +  
  geom_errorbar(  
    aes(ymin = media - sd, ymax = media + sd),  
    width = 0.15  
  ) +  
  labs(  
    title = "Elongación promedio  $\pm$  desviación estándar",  
    x = "Condición del material",  
    y = "Elongación (%)"  
  ) +  
  theme_minimal()
```

```
trac <- datos %>%  
  group_by(Tratado) %>%  
  summarise(  
    media = mean(Traccion),  
    sd = sd(Traccion)  
  )
```

```
ggplot(trac, aes(x = Tratado, y = media, fill = Tratado)) +  
  geom_col(width = 0.5) +  
  geom_errorbar(  
    aes(ymin = media - sd, ymax = media + sd),  
    width = 0.15  
  ) +  
  labs(  
    title = "Tracción promedio  $\pm$  desviación estándar",  
    x = "Condición del material",  
    y = "Tracción (MPa)"  
  )
```

```

) +
theme_minimal()

###
library(fmsb)

medias <- datos %>%
  group_by(Tratado) %>%
  summarise(
    Fluencia = mean(Fluencia),
    Traccion = mean(Traccion),
    Elongacion = mean(Elongacion)
  )

radar_data <- rbind(
  max = apply(medias[,-1], 2, max),
  min = apply(medias[,-1], 2, min),
  medias[,-1]
)

radarchart(radar_data)

library(qcc)
qcc(datos$Traccion, type = "xbar")

var.test(Traccion ~ Tratado, data = datos)

library(fmsb)
datos %>%
  group_by(Tratado) %>%
  summarise(

```

```

CV = sd(Fluencia)/mean(Fluencia)*100
)

CV = sd(datos_TT$Traccion)/mean(datos_TT$Traccion)*100
CV

#####

datos_c <- Datos_c
datos_c_TT <- subset(datos_c, Tratado == "Si")

library(ggplot2)

ggplot(datos_c, aes(x = interaction(Temp, Tiempo), y = Fluencia)) +
  geom_boxplot(fill = "lightblue") +
  labs(
    x = "Condición térmica (Temp-Tiempo)",
    y = "Fluencia (MPa)",
    title = "Distribución de fluencia por condición térmica"
  ) +
  theme_minimal()

ggplot(datos_c, aes(x = interaction(Temp, Tiempo), y = Fluencia)) +
  geom_violin(fill = "lightgreen") +
  geom_jitter(width = 0.1) +
  theme_minimal()

library(dplyr)

resumen <- datos_c %>%
  group_by(Temp, Tiempo) %>%
  summarise(

```

```

    Tracción = mean(Traccion),
    se = sd(Traccion)/sqrt(n())
  )

ggplot(resumen, aes(x = interaction(Temp, Tiempo), y = Tracción)) +
  geom_col(fill = "steelblue") +
  geom_errorbar(aes(ymin = Tracción - se, ymax = Tracción + se), width =
0.2) +
  theme_minimal()

summary(lm(Traccion ~ Temp + Tiempo, data = datos_c_TT))

anova(lm(Traccion ~ factor(Temp) * factor(Tiempo), data = datos_c_TT))

library(rsm)

modelo_rsm <- rsm(
  Traccion ~ FO(Temp, Tiempo) + TWI(Temp, Tiempo),
  data = datos_TT
)

summary(modelo_rsm)

persp(
  modelo_rsm,
  ~ Temp + Tiempo,
  zlab = "Tracción (%)",
  col = "green",
  theta = 30,
  phi = 20
)

```

```
contour(  
  modelo_rsm,  
  ~ Temp + Tiempo,  
  image = TRUE  
)
```

```
modelo_rsm <- rsm(  
  Fluencia ~ FO(x1, x2) + TWI(x1, x2),  
  data = coded.data(  
    datos_TT,  
    x1 ~ (Temp - 300)/25,  
    x2 ~ (Tiempo - 30)/15  
  )  
)
```

```
persp(  
  modelo_rsm,  
  ~ x1 + x2,  
  zlab = "Fluencia (MPa)",  
  xlab = "Temperatura (codificada)",  
  ylab = "Tiempo (codificado)",  
  col = "lightblue",  
  ticktype = "detailed",  
  theta = 45,  
  phi = 30,  
  expand = 1.3,  
  cex.lab = 1.3,  
  cex.axis = 1  
)
```

```
contour(  
  modelo_rsm,  
  ~ x1 + x2,  
  image = TRUE,  
  col = topo.colors(20),  
  xlab = "Temperatura (codificada)",  
  ylab = "Tiempo (codificado)"  
)  
  
# Crear grilla  
x1 <- seq(-1.5, 1.5, length = 30)  
x2 <- seq(-1.5, 1.5, length = 30)  
grid <- expand.grid(x1 = x1, x2 = x2)  
  
# Predicción  
grid$Fluencia <- predict(modelo_rsm, newdata = grid)  
  
# Pasar a matriz  
z <- matrix(grid$Fluencia, nrow = length(x1))  
  
# Contour manual  
contour(  
  x1, x2, z,  
  xlab = "Temperatura (codificada)",  
  ylab = "Tiempo (codificado)",  
  col = topo.colors(20),  
  nlevels = 15  
)  
  
#####
```

```

canonical(modelo_rsm)

library(rsm)

# Modelo
modelo <- rsm(Fluencia ~ FO(Temp, Tiempo) + TWI(Temp, Tiempo), data =
datos_TT)

# Grid de evaluación
grid <- expand.grid(
  Temp = seq(275, 325, length = 50),
  Tiempo = seq(15, 45, length = 50)
)

grid$Fluencia_pred <- predict(modelo, grid)

# (maximizar fluencia)
grid$d_fluencia <- (grid$Fluencia_pred - min(grid$Fluencia_pred)) /
  (max(grid$Fluencia_pred) - min(grid$Fluencia_pred))

# Penalizar temperatura y tiempo altos
grid$d_temp <- 1 - (grid$Temp - 275) / (325 - 275)
grid$d_tiempo <- 1 - (grid$Tiempo - 15) / (45 - 15)

# Deseabilidad global
grid$D <- (grid$d_fluencia * grid$d_temp * grid$d_tiempo)^(1/3)

# Punto óptimo ingenieril
grid[which.max(grid$D), ]

# Elongacion

```

```
modelo <- rsm(Elongacion ~ FO(Temp, Tiempo) + TWI(Temp, Tiempo), data
= datos_TT)
```

```
# Grid de evaluación
```

```
grid <- expand.grid(
  Temp = seq(275, 325, length = 50),
  Tiempo = seq(15, 45, length = 50)
)
```

```
grid$Elongacion_pred <- predict(modelo, grid)
```

```
# (maximizar elongación)
```

```
grid$d_elongacion <- (grid$Elongacion_pred - min(grid$Elongacion_pred)) /
  (max(grid$Elongacion_pred) - min(grid$Elongacion_pred))
```

```
# Penalizar temperatura y tiempo altos
```

```
grid$d_temp <- 1 - (grid$Temp - 275) / (325 - 275)
grid$d_tiempo <- 1 - (grid$Tiempo - 15) / (45 - 15)
```

```
# Deseabilidad global
```

```
grid$D <- (grid$d_elongacion * grid$d_temp * grid$d_tiempo)^(1/3)
```

```
# Punto óptimo ingenieril
```

```
grid[which.max(grid$D), ]
```

```
#Traccion
```

```
modelo <- rsm(Traccion ~ FO(Temp, Tiempo) + TWI(Temp, Tiempo), data =
datos_TT)
```

```
# Grid de evaluación
```

```
grid <- expand.grid(
  Temp = seq(275, 325, length = 50),
```

```
Tiempo = seq(15, 45, length = 50)
)

grid$Traccion_pred <- predict(modelo, grid)

# (maximizar tracción)
grid$d_traccion <- (grid$Traccion_pred - min(grid$Traccion_pred)) /
  (max(grid$Traccion_pred) - min(grid$Traccion_pred))

# Penalizar temperatura y tiempo altos
grid$d_temp <- 1 - (grid$Temp - 275) / (325 - 275)
grid$d_tiempo <- 1 - (grid$Tiempo - 15) / (45 - 15)

# Deseabilidad global
grid$D <- (grid$d_traccion * grid$d_temp * grid$d_tiempo)^(1/3)

# Punto óptimo ingenieril
grid[which.max(grid$D), ]
```

