

Desarrollo de una aplicación web para estimar la templabilidad de aceros

Geordy Sthib Quintero González

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Carlos Andrés Galán Pinilla

Doctor en Ingeniería de Materiales

Codirectora

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado principalmente a mi madre, Bibiana González, ejemplo de resiliencia y fortaleza, quien nunca nos ha dejado desamparados a mi hermano y a mí. A lo largo de su vida ha enfrentado situaciones realmente difíciles para garantizar nuestro bienestar, enseñándonos siempre a mirar hacia adelante con determinación. Gracias a su formación íntegra y a los valores, como el sentido de la solidaridad y la disposición para servir a los demás, he podido construir los principios que hoy guían mi vida. También se lo dedico a mi padre, Alexander Ramírez, quien me enseñó el significado del trabajo duro, el esfuerzo constante y el sacrificio como camino para alcanzar cualquier objetivo. Gracias a ambos, soy la persona que soy hoy y quien seguiré siendo a lo largo de mi vida.

De igual manera, dedico este trabajo a mi hermano, Georman Quintero, quien ha sido un acompañante constante y un apoyo incondicional en mi día a día, estando siempre presente a lo largo de todo este proceso.

A Andrea Castillo, mi pareja, a mis amigos Kelly Miranda, Edwin Linares, Vanessa Guerrero y Johan Soto por su apoyo incondicional, su paciencia y su acompañamiento a lo largo de este proceso, los cuales fueron fundamentales para lograr este objetivo. Todos ellos dejaron una huella imborrable en mi vida.

Por último, a todas las personas que, de una u otra forma, hicieron que esto fuera posible.

Agradecimientos

Agradezco de manera especial al profesor Carlos Andrés Galán Pinilla, director de este trabajo de grado, por su acompañamiento constante, orientación y compromiso durante todo el desarrollo del proyecto. Su disposición para guiarme, sus correcciones y sus valiosos aportes académicos fueron fundamentales para la correcta ejecución de este trabajo.

Asimismo, expreso mi agradecimiento a la profesora Ana María Pérez Ceballos, codirectora de este trabajo, por su apoyo permanente, tanto en el proceso de revisión y corrección del documento como en el respaldo brindado cuando fue necesario. Destaco especialmente la disposición y el compromiso de ambos directores para atender cualquier requerimiento, así como por tenerme siempre en cuenta para distintas oportunidades académicas y profesionales.

Agradezco también a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, quienes, a través de su enseñanza y formación, contribuyeron de manera significativa a mi desarrollo académico y profesional.

Finalmente, extiendo mi agradecimiento a los técnicos de laboratorio, en especial a Sergio González, por su constante disposición para colaborar, su apoyo en las actividades experimentales y su excelente actitud, siempre dispuesto a ayudar con amabilidad y compromiso cada vez que fue necesario.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
2. Objetivos.....	14
2.1 Objetivo General	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. Marco teórico.....	15
3.1 Tratamiento térmico de temple y templabilidad	15
4. Metodología.....	21
4.1 Revisión bibliográfica.....	21
4.2 Extracción de modelos matemáticos	22
4.3 Desarrollo del software	24
4.4 Diseño de la interfaz gráfica del software	25
4.5 Validación experimental.....	25
5. Resultados y análisis de resultados.....	30
5.1 Interfaz Gráfica de Usuario GUI del software - Templabilimeter.....	30
5.2 Flujo operativo y lógica interna del software.....	33
5.3 Evaluación de la interfaz gráfica y lógica del software Templabilimeter	35
5.4 Comparación del Di experimental manual y calculado por el software	36
5.5 Comparación del Di teórico manual y calculado por el software	40

5.6	Evaluación cálculo de la templabilidad por Templabilimeter	43
5.7	Comparación de resultados dados por Templabilimeter y los realizados manualmente	
	45	
6.	Conclusiones	46
	Referencias bibliográficas	48
	Apéndices	52

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Poder refrigerante de distintos medios refrigerantes. fuente: Metalografía y tratamiento térmico de los metales. Yu M. Lajtin: pag 249 (Yu. M. Laitin, 1973) _____	18
Tabla 2. Modelos matemáticos para los factores multiplicativos según rangos de composición. _____	22
Tabla 3. Tablas de la norma y los modelos que contempla. _____	23
Tabla 4. Parámetros utilizados para el tratamiento térmico de normalizado. _____	26
Tabla 5. Puntos de medición de dureza a lo largo de la probeta. _____	28
Tabla 6. Composiciones utilizadas en la validación. _____	29

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Ensayo Jominy para determinar templabilidad. A. Esquema del proceso de enfriamiento de una probeta mediante el ensayo Jominy. B. Perfil de dureza, curva Jominy, obtenida a lo largo de la probeta Jominy (Donald R. Askeland & Pradeep P. Phulé, 1998)..</i>	17
Figura 2. <i>Curva de Lamont de correlación entre la velocidad de enfriamiento, definida por la distancia del extremo templado de probeta Jominy, la severidad H del medio de enfriamiento y el diámetro de la barra del mismo acero que obtendrá la dureza de referencia en el punto r/R seleccionado. (Ásdrúbal Valencia Giraldo, 1992).</i>	19
Figura 3. <i>Flujograma de la metodología seguida para el desarrollo del trabajo de grado.</i>	21
Figura 4. <i>Dimensiones de la probeta y el montaje del ensayo Jominy.</i>	26
Figura 5. <i>A. Máquina para ensayo Jominy utilizada en el proyecto, B. Probeta Jominy en el porta muestras durante el enfriamiento.</i>	27
Figura 6. <i>Condiciones experimentales empleadas durante el ensayo Jominy.</i>	27
Figura 7. <i>A) Mecanizado post tratamiento B) Montaje para la toma de durezas.</i>	28
Figura 8. <i>Interfaz gráfica de la Página principal de inicio de Templabilimeter.</i>	30
Figura 9. <i>GUI para cálculos de templabilidad basados en la composición química del acero.</i>	31
Figura 10. <i>Curva Jominy realizada por el software Templabilimeter utilizando la composición química de un acero AISI SAE 4140.</i>	32
Figura 11 <i>Diagrama de flujo del funcionamiento de la aplicación web.</i>	33
Figura 12. <i>Mensaje de advertencia por cantidad de Cromo fuera de rango.</i>	34
Figura 13. <i>Curva Jominy experimentales construidas manualmente para los aceros AISI-SAE1045 (A), AISI-SAE 4140 (B), O1 (C), ASTM A706 (D) y PDR (E) .</i>	37
Figura 14. <i>Curvas Jominy experimentales generadas por Templabilimeter para los aceros: AISI-SAE1045 (A), AISI-SAE 4140 (B), O1 (C), ASTM A706 (D) y PDR (E).</i>	38
Figura 15 <i>Comparación de la templabilidad experimental calculada manualmente y con Templabilimeter.</i>	39
Figura 16 <i>Comparación del % de error para el cálculo de templabilidad experimental.</i>	39

- Figura 17.** Curva Jominy teóricas para los aceros AISI-SAE1045 (A), AISI-SAE 4140 (B), O1 (C), ASTM A706 (D) y PDR (E). _____ 40
- Figura 18.** Curvas Jominy generadas de forma teórica mediante Templabilimeter AISI-SAE1045 (A), AISI-SAE 4140 (B), O1 (C), ASTM A706 (D) y PDR (E). _____ 41
- Figura 19** Comparación de la templabilidad teórica calculada manualmente y con Templabilimeter. _____ 42
- Figura 20** Comparación del % de error para el cálculo de templabilidad teórica. _____ 43

Lista de Apéndices

	Pág.
<i>Apéndice A: Durezas experimentales registradas en los ensayos Jominy</i>	52
<i>Apéndice B: Factores Jominy y Di teórico calculados manualmente.....</i>	52
<i>Apéndice C: Scripts que componen Templabilimeter</i>	53

Resumen

Título: Desarrollo de una aplicación web para estimar la templabilidad de aceros.*

Autor: Geordy Sthib Quintero González, Carlos Andrés Galán Pinilla, Ana María Pérez Ceballos**

Palabras Clave: Templabilidad, Diámetro ideal, Perfil de dureza, Software, Temple.

La templabilidad es una propiedad fundamental de los aceros, ya que determina su capacidad para formar martensita a diferentes profundidades durante un tratamiento térmico de temple, influyendo directamente en el diseño y control de componentes industriales. Tradicionalmente, su estimación se obtiene mediante el ensayo Jominy de extremo templado o mediante cálculos basados en la norma ASTM A255-20a, procesos que suelen ser extensos y propensos a errores cuando se ejecutan de forma manual.

En este trabajo se presenta el desarrollo del software Templabilimeter, el cual está orientado a la estimación automatizada de la templabilidad de los aceros mediante la implementación directa de la norma ASTM A255-20a. El software permite calcular la templabilidad tanto a partir de la composición química del acero, como de datos experimentales del ensayo Jominy, generando el perfil de dureza correspondiente. La validación del software se realizó utilizando cinco aceros comerciales, comparando los resultados obtenidos por Templabilimeter con cálculos manuales y datos experimentales reales. Los resultados mostraron una alta concordancia, con errores relativos inferiores al 2.4%, lo que evidencia la correcta implementación de los modelos propuestos por la norma e implementados en el desarrollo del software. Finalmente, se concluye que Templabilimeter es una herramienta confiable para el cálculo de la templabilidad de los aceros, la cual reproduce fielmente los lineamientos establecidos en la norma ASTM A255-20a. El software se implementó en versión disponible de forma pública a través de un repositorio alojado en GitHub Pages en el siguiente enlace: <https://trabajodegrado-ai.github.io/Templabilimeter1.0/>

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Carlos Andrés Galán Pinilla. Doctor en Ingeniería de Materiales. Codirectora: Ana María Pérez Ceballos. Doctora en Ingeniería.

Abstract

Title: Development of a Web Application for Estimating the Hardenability of Steels *

Author: Geordy Sthib Quintero González, Carlos Andrés Galán Pinilla, Ana María Pérez Ceballos **

Key Words: Hardenability, Ideal Diameter, Hardness Profile, Software, Quenching.

Hardenability is a fundamental property of steels, as it determines their ability to form martensite at different depths during a quenching heat treatment, directly influencing the design and control of industrial components. Traditionally, its estimation is obtained through the Jominy end-quench test or by calculations based on the ASTM A255-20a standard, processes that are often time-consuming and prone to errors when performed manually.

This work presents the development of the software Templabilimeter, which is aimed at the automated estimation of the hardenability of steels through the direct implementation of the ASTM A255-20a standard. The software allows the calculation of hardenability both from the chemical composition of the steel and from experimental data obtained from the Jominy test, generating the corresponding hardness profile. The validation of the software was carried out using five commercial steels, comparing the results obtained by Templabilimeter with manual calculations and real experimental data. The results showed a high level of agreement, with relative errors below 2.4%, demonstrating the correct implementation of the models proposed by the standard and incorporated into the software development. Finally, it is concluded that Templabilimeter is a reliable tool for calculating the hardenability of steels, faithfully reproducing the guidelines established in the ASTM A255-20a standard. The software was implemented in a publicly available version through a repository hosted on GitHub Pages at the following link: <https://trabajodegrado-ai.github.io/Templabilimeter1.0/>

* Undergraduate Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Advisor: Carlos Andrés Galán Pinilla, PhD in Materials Engineering, Co-advisor: Ana María Pérez Ceballos, PhD in Engineering.

Introducción

En la industria metalúrgica, la optimización de los tratamientos térmicos constituye un pilar esencial para garantizar el desempeño mecánico (Yang et al., 2024) y la confiabilidad de los componentes de acero (Mudda et al., 2025). Entre estos procesos, el temple se destaca por conferir dureza y resistencia, propiedades críticas en aplicaciones que abarcan desde el sector automotriz hasta el aeroespacial. No obstante, el diseño eficaz de dicho tratamiento depende de una propiedad intrínseca del material: la templabilidad, definida como la capacidad del acero para endurecerse durante un enfriamiento rápido y asociada a su composición química, microestructura inicial y parámetros de transformación de fase (Bhadeshia, 2012). En la práctica, la evaluación de esta propiedad se realiza tradicionalmente mediante el ensayo Jominy, un método estandarizado que, aunque confiable, es una propiedad que no se publica de manera masiva en las fichas del material o bases de datos, implica consumo de recursos, equipos especializados y personal calificado, lo que eleva los costos de tiempo, gasto de material por pruebas de ensayo y error, y limita su aplicación en pequeñas y medianas empresas (García - Herrera C.M. et al., 2014). A partir de esta situación surge la pregunta de investigación ¿Es posible desarrollar una herramienta para estimar la templabilidad bajo los lineamientos de la norma ASTM A255-20a de forma precisa y rápida, que logre reducir la dependencia de ensayos experimentales y software con simulaciones de alto costo?

Se ha demostrado, que elementos de aleación como carbono, manganeso, cromo, molibdeno y, en particular, el boro, ejercen un efecto determinante en la profundidad de endurecimiento al retrasar la formación de fases blandas como la ferrita y la perlita durante el enfriamiento (El-Shennawy et al., 2016). Estas contribuciones han dado lugar al desarrollo de modelos semiempíricos y computacionales que ofrecen predicciones con alta confiabilidad,

aunque en muchos casos se requiere software especializado de alto costo o grandes volúmenes de datos experimentales (Wang et al., 2025a). Este panorama evidencia la necesidad de herramientas más accesibles, capaces de integrar fundamentos metalúrgicos con soluciones digitales prácticas.

En este contexto, el propósito del presente trabajo fue desarrollar una aplicación web que automatice el cálculo de la templabilidad de aceros a partir de su composición química o a partir de datos obtenidos en el ensayo Jominy, siguiendo la norma ASTM A255-20a. La propuesta busca ofrecer un sistema sencillo de utilizar, ágil en el procesamiento de datos y confiable en los resultados, que permita al usuario obtener curvas de templabilidad de manera rápida y sin la complejidad asociada a los métodos tradicionales.

La fundamentación de este proyecto se apoya en la necesidad de proporcionar alternativas tecnológicas de bajo costo que fortalezcan la práctica industrial y académica. Para la industria, en especial para PYMES, la herramienta representa una oportunidad de reducir costos de ensayo, mejorar la toma de decisiones en tratamientos térmicos y aumentar la competitividad. En el ámbito académico, ofrece un recurso didáctico que facilita la enseñanza de conceptos de templabilidad y temple. El enfoque metodológico adoptado combina el desarrollo web en HTML, CSS y JavaScript puro, con la validación de resultados frente a datos experimentales y bibliográficos, asegurando que la aplicación no solo resuelve un problema práctico, sino que también logró un aporte de valor científico y educativo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar una aplicación web para calcular la templabilidad de aceros, validando los resultados mediante la comparación con datos experimentales obtenidos del ensayo Jominy.

1.2 Objetivos Específicos

Implementar una herramienta digital para el cálculo de la templabilidad de aceros, a partir de la composición química o de datos experimentales de dureza del ensayo Jominy, conforme a la norma ASTM A255-20.

Validar la efectividad de la aplicación web implementada, mediante la comparación de sus resultados con datos experimentales de ensayos de templabilidad realizados con el método Jominy en distintos aceros.

Diseñar una interfaz gráfica de usuario (GUI) intuitiva y funcional que facilite al usuario el ingreso de datos, la ejecución eficiente de cálculos y una visualización clara de los resultados.

2. Marco teórico

2.1 Tratamiento térmico de temple y templabilidad

El tratamiento térmico se define como el proceso mediante el cual se modifican las propiedades mecánicas o características de una aleación, a través de su calentamiento hasta una temperatura específica, manteniéndola durante un tiempo determinado y enfriándola posteriormente a una velocidad controlada (Yu. M. Laitin, 1973). Existen cuatro tipos principales de tratamiento térmico masivo, el recocido, normalizado, revenido y temple, cada uno de ellos confiere al metal propiedades particulares y se aplica en función de requerimientos específicos, pudiendo emplearse también como etapa de preparación para un tratamiento térmico posterior (Totten et al., 2024). Entre estos tratamientos, uno de los más relevantes es el temple, ya que incrementa significativamente la resistencia del acero, lo que lo hace adecuado, buscando conceder las propiedades mecánicas requeridas en la fabricación de componentes críticos en máquinas sometidas a servicios de alta exigencia (B. ZAKHAROV, 1964).

El temple es un tratamiento térmico que concede dureza al acero, pero no siempre la dureza máxima, obtenida en superficie, se logra en el centro. H. Kiessler, n.d. define la templabilidad como la capacidad de adquirir dureza por el temple y la aptitud del acero para que esa dureza penetre más o menos hacia el interior de la pieza, otros autores como K. Wanke & K. Schramm, 1972 la definen como la propiedad del material que determina la profundidad a la que puede alcanzarse la dureza máxima inducida por el temple en el interior de una pieza, así como la forma de la curva de dureza en función de la distancia desde la superficie.

De manera cuantitativa, la templabilidad es aquel diámetro que, enfriado en un medio ideal de severidad infinita, obtiene 50% de martensita en su centro. De esta manera el “diámetro ideal” depende únicamente de la composición química y el tamaño de grano del material (Wang et al.,

2025b). Al aumentar el tamaño de grano disminuyen los bordes de grano, que actúan como sitios de nucleación de fases blandas como la perlita o la ferrita; así mismo, los elementos de aleación contribuyen a estabilizar la austenita, haciéndola más estable y favoreciendo así su transformación en martensita, fase característica del temple.

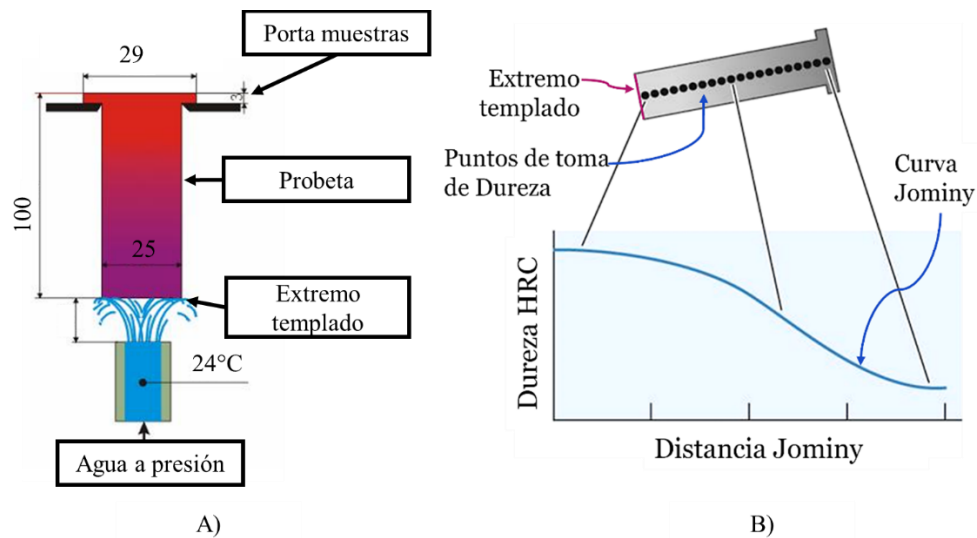
La martensita es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro α que se forma por una transformación no difusional durante el enfriamiento rápido del acero (Salama et al., 2025). Esta sobresaturación distorsiona la red cúbica centrada en el cuerpo (BCC) de la ferrita hacia una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT), arreglo atómico que vuelve a la martensita en el constituyente más duro de los aceros al carbono (Asdrúbal Valencia Giraldo, 1986). Dada la importancia de este constituyente en la resistencia final de las piezas, resulta necesario contar con métodos que permitan evaluar la capacidad de un acero para formar martensita de manera controlada, lo cual se determina mediante ensayos de templabilidad, como el Jominy.

El ensayo Jominy se realiza enfriando una probeta como muestra el esquema de la **Figura 1 A**. Es un método estandarizado utilizado para determinar la templabilidad de los aceros, entendida como su capacidad de desarrollar una estructura endurecida mediante un enfriamiento acelerado. El ensayo consiste en llevar a temperatura de austenización una probeta estandarizada, para después templarla por uno de sus extremos, mecanizarla de determinada manera y medir las durezas alcanzadas desde el extremo templado hasta el extremo normalizado (*Test Methods for Determining Hardenability of Steel*, 2020). Mediante este ensayo se obtienen perfiles de dureza a lo largo de una probeta (**Figura 1 B**), proporcionando información clave sobre el comportamiento del material en procesos de temple y su respuesta a tratamientos térmicos (Quiñones et al., 2018a). La predicción de los perfiles de dureza a partir de la composición química del acero, basada en su templabilidad, es un aspecto clave en el diseño y selección de aceros para aplicaciones donde la

dureza y la resistencia al desgaste son determinantes. Para optimizar los procesos térmicos y reducir costos experimentales, se vienen desarrollando modelos termo-metalúrgicos y técnicas de aprendizaje automático, los cuales permiten estimaciones precisas del comportamiento del material durante el temple, mejorando la eficiencia en la selección de aleaciones y el diseño de tratamientos térmicos (Maity & Sharma, 2023a).

Figura 1. Ensayo Jominy para determinar templabilidad. A. Esquema del proceso de enfriamiento de una probeta mediante el ensayo Jominy. B. Perfil de dureza, curva Jominy, obtenida a lo largo de la probeta Jominy

(Donald R. Askeland & Pradeep P. Phulé, 1998)..



Un concepto importante para realizar un temple, es la severidad del medio (H), propiedad que cuantifica la capacidad de un medio para enfriar (Maity & Sharma, 2023b), se expresa como la relación entre coeficiente de calor (h) del medio de enfriamiento y la conductividad térmica (k), o una clasificación cualitativa realizada por Grossman (M.A. GROSSMANN, 1952) y utilizada en la actualidad. Esta velocidad de enfriamiento determina la microestructura final de un acero sometido a un proceso de temple, la cual está relacionada con los diagramas de transformación, donde se define la velocidad crítica de temple, y por ende la dureza final que se obtiene en diferentes puntos de la pieza que se enfría a diferentes velocidades. Este parámetro, H , puede ser

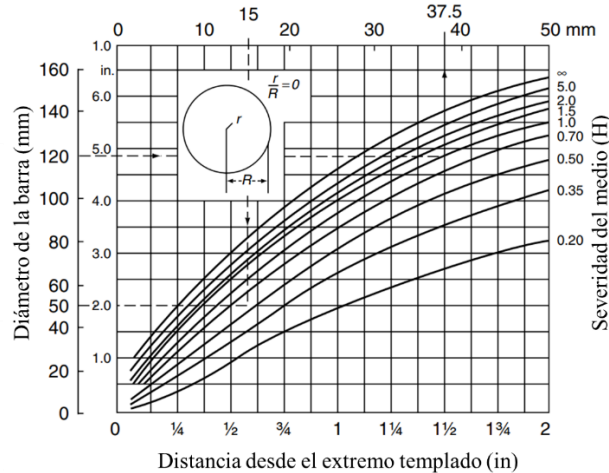
variado por condiciones como su temperatura, la pureza del agua y el grado de agitación (Athavale et al., 2021a). Conociendo la severidad de temple de un medio (**Tabla 1**) y su diámetro crítico ideal (la templabilidad), se puede calcular el tamaño máximo de una pieza a templar, relacionándolo con las curvas de Lamont (**Figura 2**).

Tabla 1. Poder refrigerante de distintos medios refrigerantes. fuente: *Metalografía y tratamiento térmico de los metales. Yu M. Lajtin: pag 249 (Yu. M. Laitin, 1973)*

Medio refrigerante	Intervalo de temperatura de ebullición por burbujeo (°C)	Intensidad relativa de enfriamiento en la mitad del intervalo de ebullición por burbujeo
Agua, 20 °C	400–100	1,0
Agua, 40 °C	350–100	0,7
Agua, 80 °C	250–100	0,2
Solución al 10 % de NaCl en agua a 20 °C	650–100	3,0
Solución al 50 % de NaOH en agua a 20 °C	650–100	2,0
Aceite mineral 20–200 °C	500–250	0,3

Las curvas de Lamont son diagramas que relacionan el diámetro de una barra templada, la severidad del medio de enfriamiento (valor H) y la distancia desde el extremo templado en el ensayo Jominy para cada acero en análisis (Athavale et al., 2021b). Estas curvas se basan en el concepto de velocidades de enfriamiento equivalentes, el cual establece que, si dos puntos, del mismo acero, se enfrían a la misma velocidad, alcanzarán la misma dureza, independientemente de su geometría o ubicación. Las curvas de Lamont, como la mostrada en la figura 2, fueron obtenidas a partir de una laboriosa tarea experimental, razón por la cual, no se han encontrado actualizaciones en artículos o publicaciones.

Figura 2. Curva de Lamont de correlación entre la velocidad de enfriamiento, definida por la distancia del extremo templado de probeta Jominy, la severidad H del medio de enfriamiento y el diámetro de la barra del mismo acero que obtendrá la dureza de referencia en el punto r/R seleccionado. (Asdrúbal Valencia Giraldo, 1992).



Actualmente existen modelos computacionales que, a través de simulaciones basadas en parámetros termodinámicos, permiten predecir la templabilidad de los aceros con precisión. Sin embargo, su aplicación requiere el uso de software especializado y un mayor consumo de recursos computacionales. Un ejemplo de estos enfoques es el método desarrollado por Quiñones et al., 2018b, el cual presenta una precisión de aproximadamente $\pm 20\%$, aunque su aplicabilidad está limitada a grados específicos de aceros de baja aleación. También existen Software especializados como JMatPro y Thermo-Calc que se destacan como herramientas multipropósito utilizadas en la predicción de perfiles de dureza y templabilidad, mediante la interrelación de principios físicos y propiedades metalúrgicas, logrando una mayor aproximación a los valores experimentales (Claudia González Castillo et al., 2019).

En un estudio, Saunders y colaboradores emplearon JMatPro, para comparar sus resultados con un modelo termo-metalúrgico desarrollado de manera independiente (Saunders et al., 2003). De manera similar, Claudia González Castillo et al., 2019 también se utilizó JMatPro y Thermo-Calc en conjunto para predecir las fases de una aleación de acero con adiciones de boro y

manganeso, evaluando su comportamiento en aplicaciones automotrices (Claudia González Castillo et al., 2019).

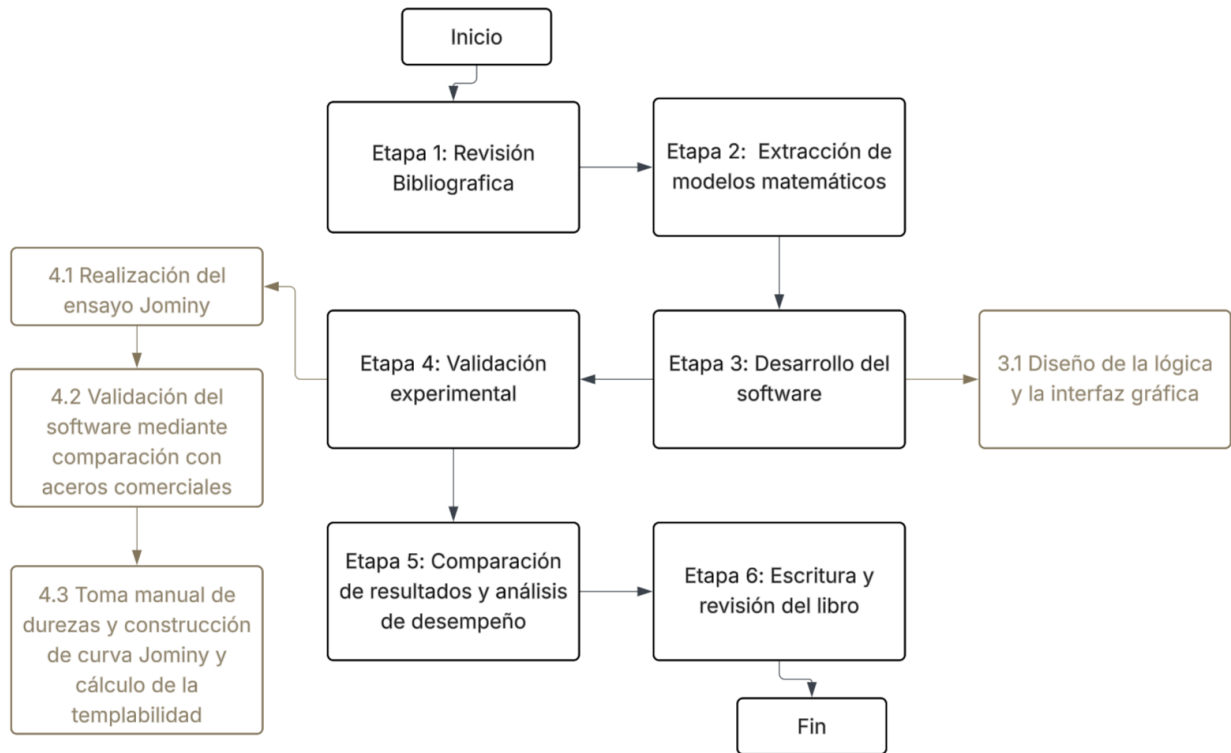
A pesar de su alta precisión y versatilidad, una de las principales limitaciones de este tipo de software es su elevado costo, con planes básicos que superan los 10,000 dólares anuales, sin incluir extensiones adicionales requeridas para el análisis de aceros o materiales específicos. Esta barrera económica restringe su acceso, especialmente para pequeñas y medianas industrias, lo que resalta la necesidad de herramientas más accesibles para la predicción de templabilidad.

En cuanto los modelos de aprendizaje automático, estudios recientes reportan coeficientes de determinación (R^2) cercanos a 0.99, correlaciones superiores a 0.981 y desviaciones respecto a los valores experimentales en un rango de 0.96 a 3.9 HRC (Sitek et al., 2008a).

3. Metodología

La **Figura 3** muestra la metodología que se llevó a cabo para construir y validar Templabilimeter, mostrando en orden secuencial los pasos para la elaboración de este proyecto.

Figura 3. *Flujograma de la metodología seguida para el desarrollo del trabajo de grado.*



3.1 Revisión bibliográfica

En esta etapa se realizó una revisión de información y antecedentes necesarios para desarrollar el proyecto. Se consultaron artículos científicos, libros y normas técnicas relacionados con la templabilidad de los aceros, así como estudios previos sobre el ensayo Jominy y su aplicación en la industria. También se identificaron las ecuaciones y modelos propuestos en la norma ASTM A255-20a y se analizaron los métodos matemáticos utilizados para predecir la templabilidad a partir de la composición química. De igual manera, se identificaron las librerías y

plataformas utilizadas en el desarrollo de Templabilimeter, las cuales permitieron que el software funcione como una herramienta abierta y de fácil acceso para los usuarios.

3.2 Extracción de modelos matemáticos

Se realizó un análisis detallado de la norma ASTM A255-20a para extraer los modelos matemáticos necesarios para el cálculo de la templabilidad de aceros. Este proceso se llevó a cabo de manera sistemática, abarcando la totalidad de los modelos descritos en la norma, los cuales se encuentran comprendidos entre la Tabla 11 y la Tabla 18 de la misma. Para ilustrar el proceso seguido, se presenta la obtención de los modelos matemáticos correspondientes a los factores multiplicativos asociados a la composición química para aceros normalizados (**Tabla 2**), donde se indica el rango de composición química del elemento y el modelo matemático propuesto.

Tabla 2. Modelos matemáticos para los factores multiplicativos según rangos de composición.

<i>Elemento / Rango de composición</i>	<i>Modelo matemático del Factor Multiplicativo (MF)</i>
<i>Carbono / Tamaño de grano 7</i>	
Hasta 0.39 % inclusive	$MF = 0.54 (\%C)$
Más de 0.39 a 0.55 % incluye	$MF = 0.171 + 0.001(\%C) + 0.265(\%C)^2$
Más de 0.55 a 0.65 % incluye	$MF = 0.115 + 0.268(\%C) - 0.038(\%C)^2$
Más de 0.65 a 0.75 % incluye	$MF = 0.143 + 0.2(\%C)$
Más de 0.75 a 0.90 % incluye	$MF = 0.062 + 0.409(\%C) - 0.135(\%C)^2$
<i>Manganeso</i>	
Hasta 1.20 % incluye	$MF = 3.3333(\%Mn) + 1.00$
Más de 1.20 a 1.95 % incluye	$MF = 5.10(\%Mn) - 1.12$
<i>Silicio (hasta 2.00 % incluye)</i>	
	$MF = 1.00 + 0.7(\%Si)$
<i>Níquel</i>	
Hasta 1.50 % incluye	$MF = 1.00 + 0.363(\%Ni)$
Más de 1.50 a 3.5 % incluye	$MF = 0.3211 + 1.4501(\%Ni) - 0.6119(\%Ni)^2 + 0.1253(\%Ni)^3$
<i>Cromo (hasta 2.50 % incluye)</i>	
	$MF = 1.00 + 2.16(\%Cr)$
<i>Molibdeno (hasta 0.55 % incluye)</i>	
	$MF = 1.00 + 3.00(\%Mo)$
<i>Cobre (hasta 0.55 % incluye)</i>	
	$MF = 1.00 + 0.365(\%Cu)$
<i>Vanadio (hasta 0.20 % incluye)</i>	
	$MF = 1.00 + 1.73(\%V)$
<i>Circonio (hasta 0.25 % incluye)</i>	
	$MF = 1.00 + 2.5(\%Zr)$

Cada uno de los modelos presentados en la **Tabla 2** corresponde a un rango específico de porcentaje en peso de cada elemento de aleación, lo que indica que su validez depende directamente de la composición química particular del acero. En consecuencia, el modelo puede presentar variaciones en el grado de precisión según la concentración de los elementos de aleación. Asimismo, la tabla establece límites claramente definidos, los cuales representan el alcance normativo de la ASTM A255-20a. Por tanto, cualquier acero cuya composición se encuentre fuera de estos rangos establecidos no podrá ser calculado mediante las ecuaciones de la norma, y, en consecuencia, la herramienta web obtenida, denominada por los autores como Templabilimeter, llamada de aquí en adelante de esta manera, no podrá generar resultados para dichos casos.

Estas condiciones que determinan la aplicación de un modelo matemático u otro también se presentan en las tablas 11, 14, 15, 16, 17 y 18 de la norma. Las cuales son una de las bases que se incorporaron en el desarrollo de Templabilimeter como estructuras condicionales, permitiendo seleccionar automáticamente el modelo correspondiente según el escenario.

En la **Tabla 3** se listan las tablas de la norma con los modelos asociados a cada elemento químico, al igual que los factores, los cuales son utilizadas en el base de código de Templabilimeter.

Tabla 3. *Tablas de la norma y los modelos que contempla.*

<i>Tabla de la norma</i>	<i>Modelos contemplados</i>
Tabla 11	Factores multiplicativos según % de elementos aleantes
Tabla 12	Dureza del 100% y 50% de martensita según contenido de carbono
Tabla 13	Diámetro ideal según distancia Jominy para 50% de martensita
Tabla 14	Factor multiplicativo del boro según %C y aleantes
Tabla 15 y 16	Factores de división de dureza por distancia Jominy según Diámetro ideal sin boro(in) (mm) respectivamente

Tabla 17 y 18 Factores de división de dureza por distancia Jominy según
Diámetro ideal con boro(in) (mm) respectivamente

3.3 Desarrollo del software

A partir de los modelos matemáticos extraídos de la norma, se diseñó la estructura lógica del Templabilimeter, manteniendo una arquitectura modular basada en tres componentes principales: un archivo .html, encargado de definir la estructura y organización de la interfaz gráfica; un archivo .css, responsable del estilo visual y formato de la página; y un archivo .js, en el cual se implementó la lógica de programación, incluyendo la recepción de datos, el manejo de errores, el desarrollo de los modelos matemáticos y la construcción de la curva Jominy.

La norma ASTM A255-20a establece distintos modelos matemáticos según el tipo de acero, lo que implica la existencia de múltiples rutas posibles para alcanzar un mismo resultado. Para gestionar esta variabilidad, se implementaron matrices de decisión, herramienta que permitió estructurar las condicionales lógicas necesarias para que la aplicación seleccione automáticamente el camino adecuado según la composición química del acero analizado.

El software Templabilimeter, el cual es ejecutado desde un servidor web, fue desarrollado bajo un enfoque de programación modular, orientado a la reutilización y escalabilidad del código. Las funciones fueron diseñadas para operar de manera independiente del contexto de ejecución, lo que permite llamarlas desde diferentes módulos sin tener una pérdida de funcionalidad. Este enfoque modular contribuye a optimizar el rendimiento, reducir la redundancia de código y mejorar la velocidad y ligereza general del programa, facilitando futuras expansiones o la incorporación de nuevas funcionalidades.

Lo anteriormente expuesto es aplicable a toda la extensión de la aplicación, abarcando cada uno de los módulos y procesos implementados.

3.4 Diseño de la interfaz gráfica del software

La interfaz gráfica del software Templabilimeter, ejecutado desde un servidor web, fue diseñada para que sea intuitiva y fácil de entender, y esta integra tres funciones principales: La primera es el ingreso de datos relacionados con la composición química del acero y los resultados del ensayo Jominy. La segunda función es la ejecución de cálculos automatizados conforme a las ecuaciones establecidas en la norma ASTM A255-20a, y la tercera función es la visualización clara y organizada de los resultados. Para la representación gráfica se empleó la biblioteca Plotly.js, la cual permite la interacción en tiempo real con las curvas generadas. Adicionalmente, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) intuitiva y funcional que facilita la interacción con el sistema junto con un mecanismo de manejo de errores controlado que asegura la correcta ejecución de los cálculos y minimiza posibles interferencias durante el proceso.

3.5 Validación experimental

Para evaluar la correlación entre el software Templabilimeter desarrollado con base en los modelos matemáticos propuestos en la norma y los resultados experimentales, se seleccionaron cinco denominaciones de acero comercial en Colombia, los cuales son los aceros: AISI SAE 1045, AISI SAE 4140, AISI O1, ASTM A706 y Varilla corrugada de designación NTC 2289 llamada PDR de aquí en adelante.

Con el propósito de garantizar el cumplimiento de la norma, las probetas fueron previamente sometidas a un tratamiento térmico de normalizado, para homogeneizar la microestructura antes de la ejecución del ensayo Jominy. Los parámetros específicos de este tratamiento se encuentran descritos en la **Tabla 4**.

Luego del normalizado, las probetas fueron mecanizadas en primera instancia como lo dice la norma. Utilizando un torno, se realizó un cilindrado dejando la pestaña para que la probeta case

en el porta muestras del equipo Jominy referencia Remet–BOLOGNA-ITALI. Las dimensiones de la probeta y el montaje para el ensayo están descritas en la **Figura 4**.

Tabla 4. *Parámetros utilizados para el tratamiento térmico de normalizado.*

<i>Acero</i>	<i>T Normalizado [°C]</i>	<i>tiempo [horas]</i>
AISI SAE 1045	900	1
AISI SAE 4140	870	1
O1	790	1
AISI A706	900	1
Var. Corrugada PDR	900	1

Para el ensayo Jominy, el austenizado de las probetas se llevó a cabo en una máquina de ensayo Jominy (**Figura 5A**), donde se mantuvieron a la temperatura establecida según el acero (**Figura 6**) para el tratamiento térmico. Posteriormente, las probetas fueron enfriadas mediante un chorro de agua constante aplicado únicamente sobre uno de sus extremos durante un periodo de 10 minutos, posteriormente se completó el enfriamiento mediante inmersión en un recipiente con agua durante 5 minutos adicionales. Este proceso se realizó en un montaje similar al que se muestra en la **Figura 5 B**.

Figura 4. *Dimensiones de la probeta y el montaje del ensayo Jominy.*

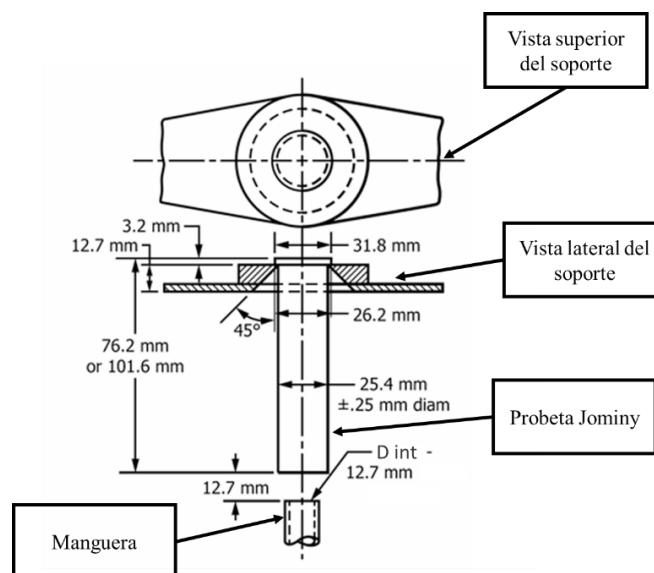


Figura 5. A. Máquina para ensayo Jominy utilizada en el proyecto, B. Probeta Jominy en el porta muestras durante el enfriamiento.

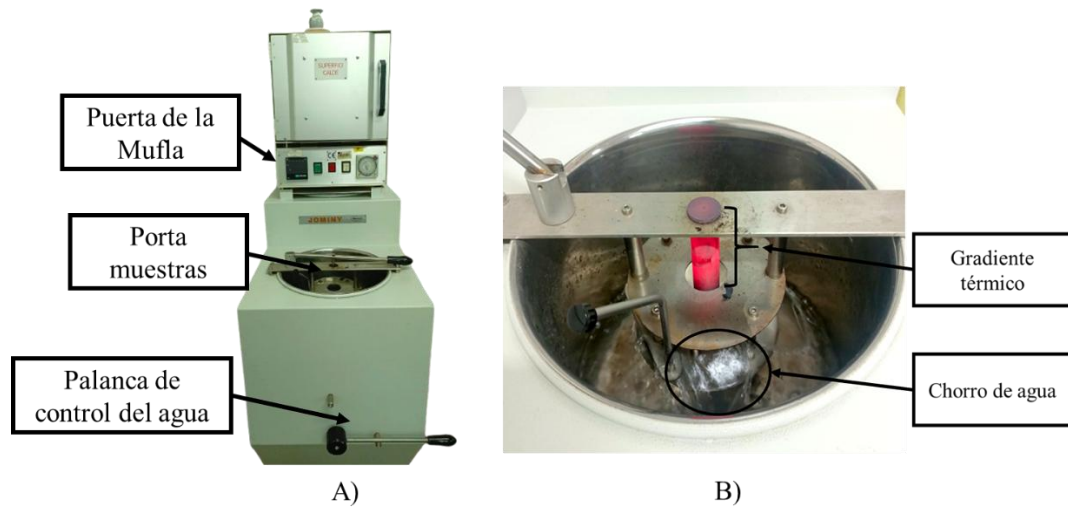
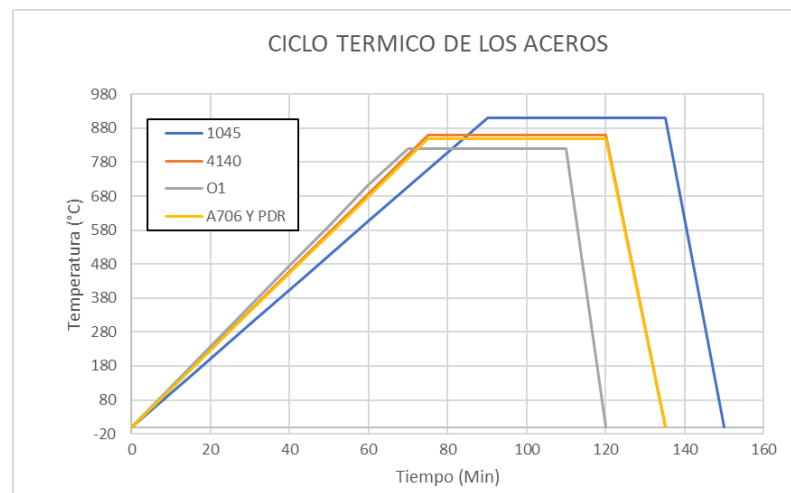


Figura 6. Condiciones experimentales empleadas durante el ensayo Jominy.



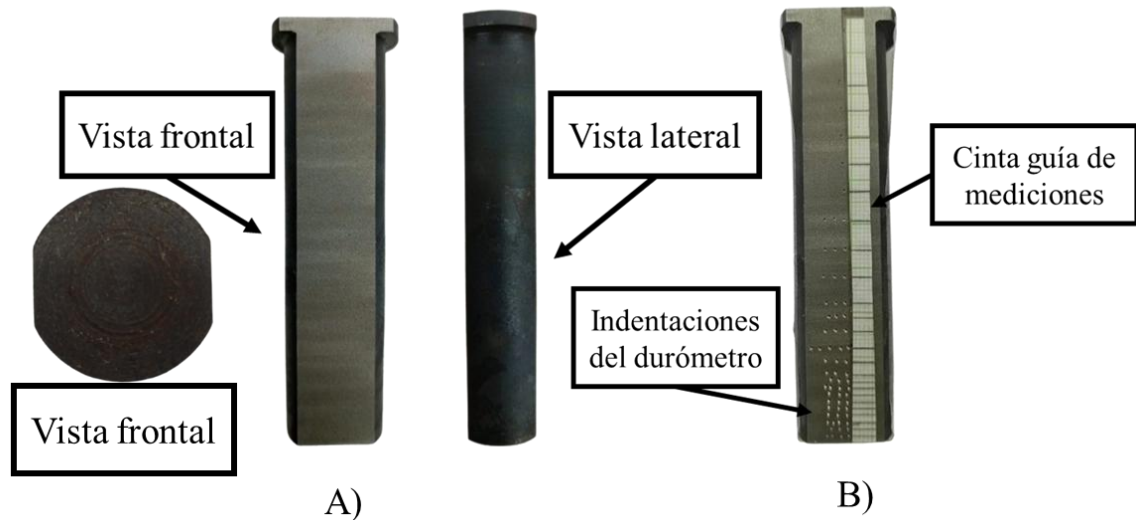
Posterior al proceso de temple, las probetas fueron sometidas a dos mecanizados por corte con hilo, proceso caracterizado por no generar calor durante el corte, garantizando que la dureza obtenida durante el ensayo no se modifica. El mecanizado alcanzó una profundidad aproximada de 4,5 mm desde la superficie de la pieza tal como se ve en la **Figura 7 A**. Este procedimiento permitió generar dos planos paralelos, sobre los cuales se realizaron las mediciones de dureza HRC a distancias específicas medidas desde el extremo que estuvo en contacto directo con el agua

durante el enfriamiento, como se observa en la **Figura 7 B**. Las distancias empleadas, expresadas en fracciones de 1/16 de pulgada, se presentan en la **Tabla 5**. Una vez obtenidos los resultados, se registraron para el proceso de validación y se realizó el cálculo manual de la templabilidad siguiendo paso a paso la metodología expuesta en la norma, utilizando los datos promedio obtenidos en el ensayo Jominy.

Tabla 5. Puntos de medición de dureza a lo largo de la probeta.

Distancias desde el extremo templado (1/16 in)																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	24	28	32	36	40	44	48

Figura 7. A) Mecanizado post tratamiento B) Montaje para la toma de durezas.



Para validar los resultados experimentales frente a los obtenidos por Templabilimeter, se implementaron dos estrategias complementarias. En la primera, se calculó manualmente el diámetro ideal (DI) a partir de las durezas medidas durante el ensayo Jominy, y posteriormente se comparó dicho valor con el resultado generado por el software, empleando esas mismas durezas como parámetros de entrada en el apartado “Datos de laboratorio”. En la segunda estrategia, el DI se determinó manualmente utilizando los valores de composición química establecidos en las

normas ASTM A29/A29M – 23 (*Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought*, 2023), ASMT A681-24 (*Specification for Tool Steels Alloy*, 2024) y datos proporcionados por el proveedor, para luego comparar el resultado con el obtenido al ingresar esas mismas composiciones en el apartado “Hallar DI ASB” de Templabilimeter, a partir de los modelos implementados en el código del software. En ambos casos se empleó la **Ecuación 1** para el cálculo del porcentaje de error relativo, considerando como aceptables aquellos valores inferiores al 5%. Las composiciones químicas utilizadas en este proceso se presentan en la **Tabla 6**.

$$\%error = \frac{Templabilimeter - Manual}{Manual} \cdot 100$$

Ecuación 1

Tabla 6. Composiciones utilizadas en la validación.

Acero	Elemento de aleación					
	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%V
1045	0.5	0.9	0.4	-	-	-
4140	0.43	0.75	0.15	0.8	0.15	-
O1	0.95	1	0.1	0.4	-	0.1
A706	0.3	1.5	0.5	-	-	-
PDR	0.3	1.5	0.5	-	-	0.023

4. Resultados y análisis de resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos con la aplicación web. Se realiza la revisión del funcionamiento de la interfaz gráfica, evaluando su facilidad de uso. También se examina la capacidad del software para calcular la templabilidad de los aceros a partir de la composición química o de los datos experimentales del ensayo Jominy. Se comparan estos resultados con los valores obtenidos mediante cálculos manuales y ensayos experimentales, con el propósito de valorar la precisión y la confiabilidad del sistema desarrollado, todo esto a partir de la metodología planteada en el capítulo anterior.

4.1 Interfaz Gráfica de Usuario GUI del software - Templabilimeter.

La **Figura 8** muestra la interfaz gráfica de Templabilimeter (<https://trabajodegrado-ai.github.io/Templabilimeter1.0/>). En ella se aprecia un mensaje inicial que orienta al usuario sobre el propósito de la herramienta, así como una barra o cinta de navegación superior que ofrece las distintas opciones disponibles desarrolladas según la acción que el usuario desee realizar.

Figura 8. Interfaz gráfica de la *Página principal de inicio de Templabilimeter*.



La cinta de navegación cuenta con cinco opciones que guían al usuario a través de las diferentes funciones de Templabilimeter. En “Datos de laboratorio”, el usuario puede ingresar directamente las durezas obtenidas en el ensayo Jominy para calcular el diámetro ideal. La opción “Templabilidad” está pensada para quienes desean calcular el DI a partir de la composición química del acero. En “Validación experimental” se presentan los resultados de este proyecto y se explica cómo se llevó a cabo la validación del software. La sección “Aprende cómo lo hacemos” ofrece una explicación general de la norma utilizada y del procedimiento aplicado, mientras que “Ayuda” funciona como un manual sencillo que orienta al usuario sobre el uso de la aplicación. Finalmente, la opción “Contáctanos” incluye la información de contacto de los desarrolladores.

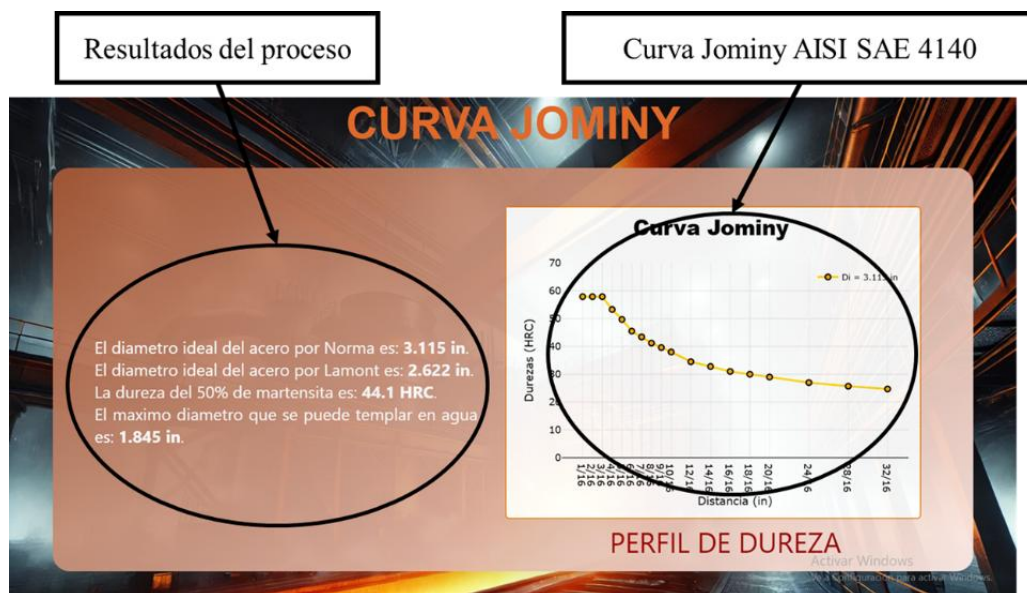
En la **Figura 9** se presenta la interfaz de la primera pestaña, correspondiente al ingreso de datos de composición química del acero, esta página incluye instrucciones básicas, las casillas para introducir la información requerida y un botón de calcular para iniciar el procesamiento. Además, esta interfaz incorpora un sistema de detección de errores, que se describe más adelante con mayor detalle. Así mismo, interpreta tanto el signo “.” como la “,” como separador decimal.

Figura 9. GUI para cálculos de templabilidad basados en la composición química del acero.



En la **Figura 10** se presentan los resultados de la simulación realizada al introducir los datos para un acero AISI SAE 4140, (0.43%C, 1%Mn, 0.3%Si, 0.25%Mo, 1.1%Cr). En esta se pueden observar los cálculos realizados para el diámetro ideal, para el diámetro crítico templado en agua con severidad ($H=1$), y la dureza correspondiente al 50 % de martensita y se presenta la curva Jominy generada para esta denominación de acero utilizado como ejemplo. Se observa una diferencia cercana al 20% entre el diámetro ideal (D_i) calculado mediante la norma y el obtenido por el método de las curvas de Lamont. Esta diferencia se atribuye a que el método de Lamont es un procedimiento empírico, susceptible a errores inherentes a su naturaleza y a su antigüedad. Por esta razón, el valor obtenido mediante este método debe considerarse únicamente como un valor orientativo o de referencia, y no como un valor representativo del comportamiento real del acero. Lo mismo aplica para el máximo diámetro templable en agua, ya que este también se determina a partir de las curvas de Lamont previamente mencionadas.

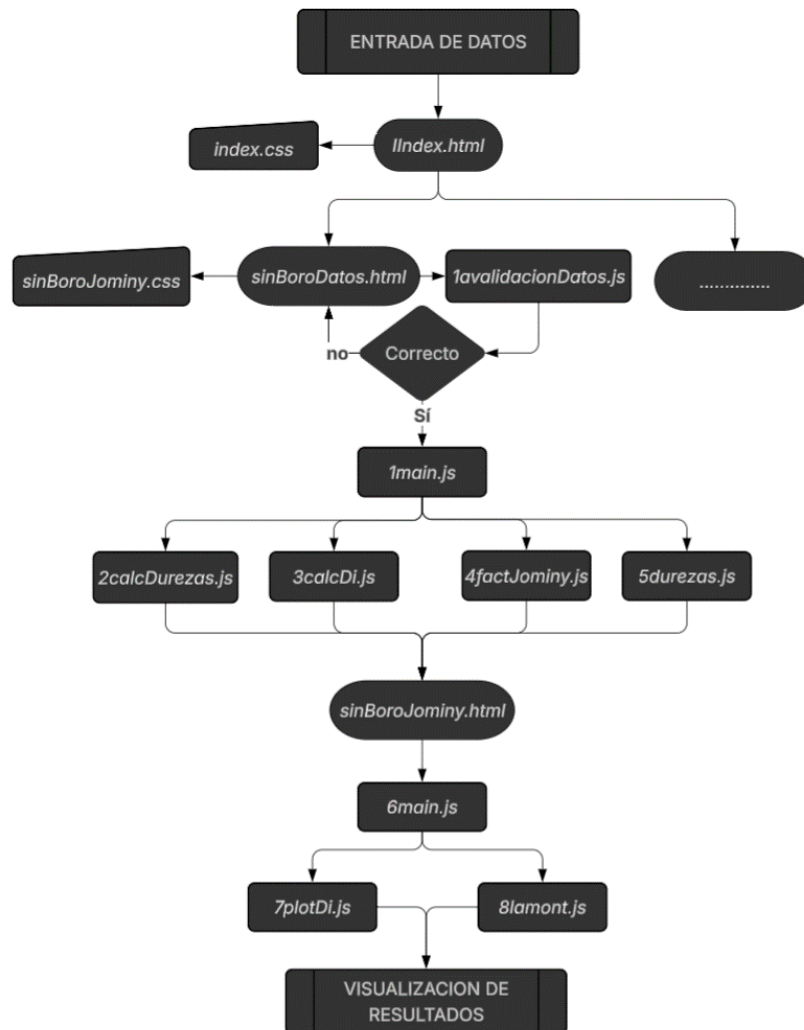
Figura 10. Curva Jominy realizada por el software *Templabilimeter* utilizando la composición química de un acero AISI SAE 4140.



4.2 Flujo operativo y lógica interna del software

La **Figura 11** muestra el diagrama de flujo que representa la secuencia lógica de ejecución de la aplicación, desde el ingreso de datos hasta la generación de los resultados finales, organizada en módulos interconectados. La viñeta con puntos suspensivos indica que los módulos para datos de laboratorio y cálculo para aceros con boro, siguen esta misma lógica de funcionamiento.

Figura 11 Diagrama de flujo del funcionamiento de la aplicación web.



El flujograma comienza con la recepción de los datos de entrada, que pueden ser tanto la composición química del acero, como las durezas obtenidas en el ensayo Jominy, considerando siempre que el análisis solo es aplicable a aceros que se encuentren dentro del alcance establecido

por la norma. Una vez ingresados, estos datos pasan por un submódulo de validación (**Apéndice C: SinBoroScript/1validacionDatos.js**), encargado de verificar que la información suministrada sea coherente y se encuentre dentro del alcance establecido por la norma ASTM A255. Si se detecta algún valor fuera de rango o inconsistente, el sistema muestra un mensaje de advertencia al usuario (**Figura 12**), indicando el error y cómo corregirlo.

Figura 12. Mensaje de advertencia por cantidad de Cromo fuera de rango.



Si los datos son válidos, el flujo continúa hacia el módulo “1main.js”, donde se organizan las entradas y se envían a los distintos submódulos para su procesamiento, en la etapa del módulo “2calcDurezas.js” se calculan las durezas correspondientes al 50 % y 100 % de martensita; luego, en “3calcDi.js” calculan los factores de aleación, para determinar el diámetro ideal (DI) del acero para después enviarlo al submódulo “4factJominy.js” que busca los factores Jominy en función de las distancias, y finalmente “5durezas.js” calcula las durezas a lo largo de la probeta, de acuerdo a las distancias observadas en la **Tabla 5**.

Una vez obtenidos los cálculos de dureza del 50% y 100% de martensita, el diámetro ideal, los factores Jominy de las distancias y las durezas correspondientes a cada una de esas distancias, estos datos se envían al módulo “sinBoroJominy.html”, que es el encargado de mostrar los resultados al usuario. Desde allí, la información es procesada por “6main.js”, que construye la

curva Jominy con ayuda del submódulo “7plot.js” utilizando la librería plotly.js y los datos recolectados de factores Jominy y las durezas . Por último, “8lamont.js” utiliza la curva de Lamont de H=1, la cual fue previamente digitalizada y se obtuvo la expresión matemática (**Ecuación 2**), para estimar el diámetro crítico templado en agua del acero analizado para completar los cálculos y mostrar los resultados al usuario. Todos los archivos .js descritos anteriormente se encuentran en el **Apéndice C**.

$$H1 = (-0.8522 \cdot x^2) + 4.4449 \cdot x^2 + 0.1399 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde x representa la distancia desde el extremo templado donde existe un 50% de martensita.

4.3 Evaluación de la interfaz gráfica y lógica del software Templabilimeter

La evaluación de la aplicación inicia con la revisión de la pestaña principal, donde la distribución general de los elementos permite al usuario orientarse rápidamente. El mensaje inicial ofrece el contexto necesario para comprender el propósito de la herramienta. La cinta de navegación funciona de manera correcta, permitiendo ir de un lugar a otro de manera sencilla, y teniendo rótulos intuitivos que permite entender que hace y a donde dirige cada sección (**Figura 8**).

En la pestaña de ingreso de datos, la interfaz muestra de forma ordenada los campos necesarios para realizar el cálculo. La organización visual ayuda a entender qué información se debe proporcionar, logrando que el proceso sea ágil y directo. El mensaje de entrada complementa esta sección, guiando de manera clara al usuario sobre el camino que debe seguir para iniciar el cálculo (**Figura 9**).

El sistema de validación, se comprobó que funciona adecuadamente, tal como se aprecia en la **Figura 12** y se describe a continuación.

Cuando los valores ingresados se encuentran fuera de los rangos establecidos por la norma ASTM A255-20a, el sistema notifica al usuario o aplica un margen de tolerancia que permite generar un resultado aproximado en lugar de dejar el proceso incompleto. Esta característica evita interrupciones innecesarias y mejora la experiencia de uso, ya que en la mayoría de los casos se obtiene un valor representativo, aunque la composición del acero analizado no se encuentre entre los rangos establecidos por la norma. Además, si algún campo queda vacío, el sistema lo interpreta automáticamente como cero, lo que agiliza el llenado del formulario y permite avanzar sin tener que completar cada casilla obligatoriamente.

En la sección de visualización de resultados (**Figura 10**), la curva Jominy generada permite identificar fácilmente la dureza en cada punto gracias a la grilla de apoyo incluida en la figura. El usuario puede acercar la imagen, seccionarla o guardarla para utilizarla en reportes o documentos sin dificultad. Asimismo, el diámetro ideal y los demás valores calculados se muestran junto a la gráfica, lo que facilita una lectura rápida y comprensible de los resultados.

4.4 Comparación del D_i experimental manual y calculado por el software

Las curvas Jominy experimentales construidas manualmente para los aceros analizados, mostrados en la **Tabla 6**, se presentan en la **Figura 13A**, para el acero AISI 1045, **13B** AISI 4140, **13C** AISI O1, **13D** A706, y **13E** PDR.

Las curvas Jominy experimentales que fueron generadas por Templabilimeter se presentan en la **Figura 14**, junto con los valores de templabilidad obtenidos para cada acero analizado. Por su parte, la **Figura 15** muestra la comparación entre la templabilidad experimental calculada manualmente a partir de la norma y la estimada utilizando el software Templabilimeter. La **Figura 16** muestra el error relativo para cada caso.

Figura 13. Curva Jominy experimentales construidas manualmente para los aceros AISI-SAE1045 (A), AISI-SAE 4140 (B), O1 (C), ASTM A706 (D) y PDR (E) .

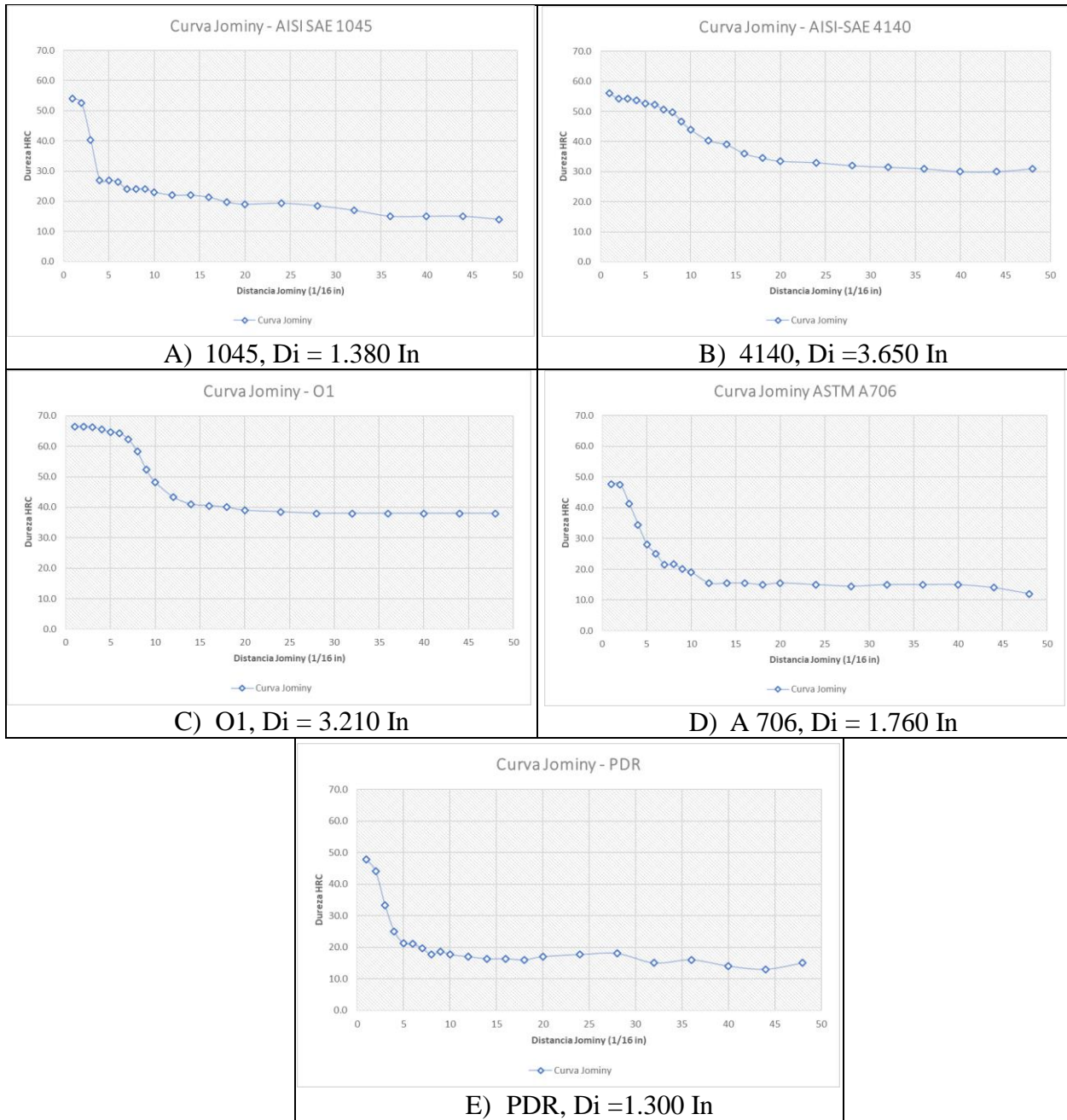


Figura 14. Curvas Jominy experimentales generadas por Templabilimeter para los aceros: AISI-SAE1045

(A), AISI-SAE 4140 (B), O1 (C), ASTM A706 (D) y PDR (E).

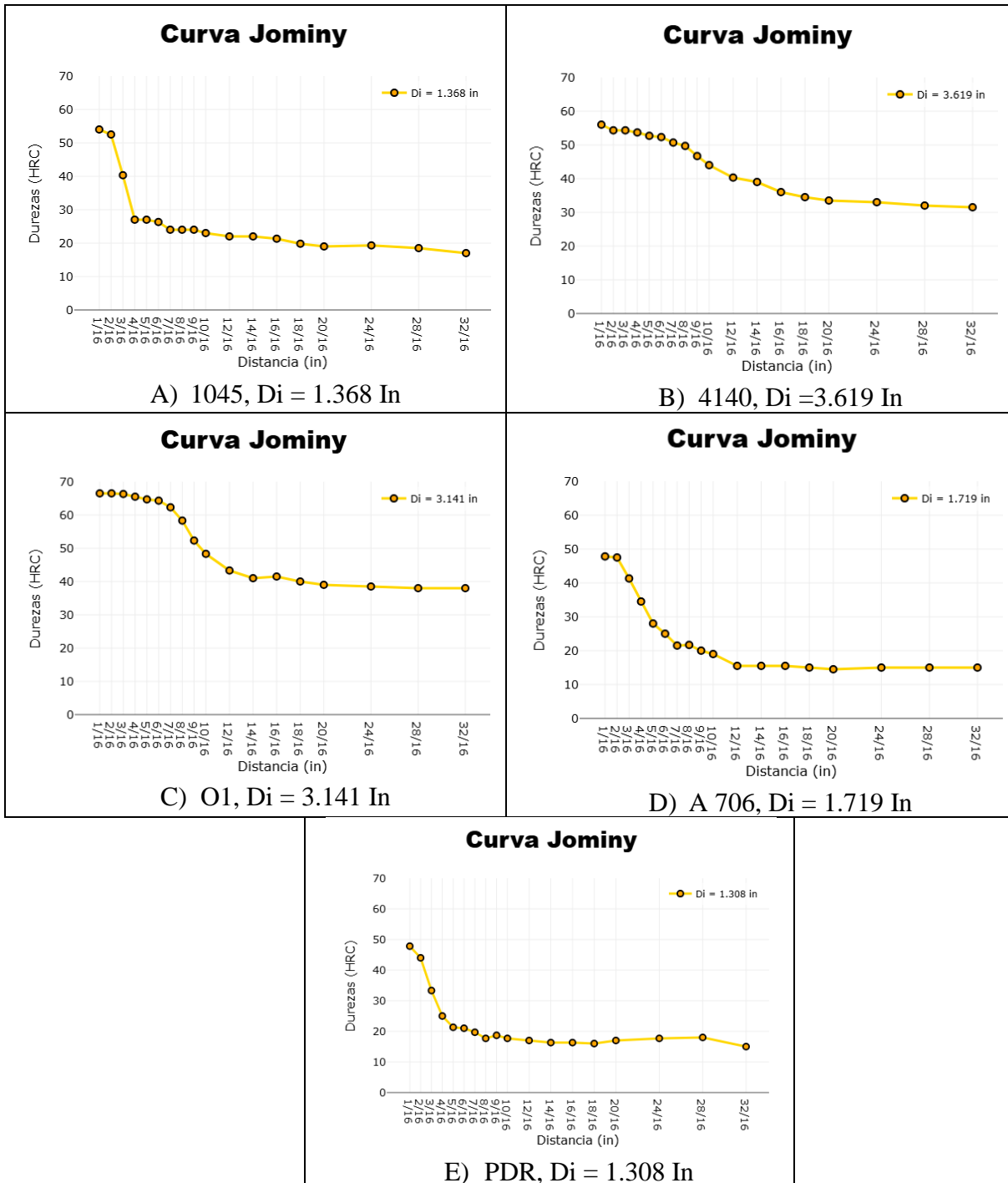
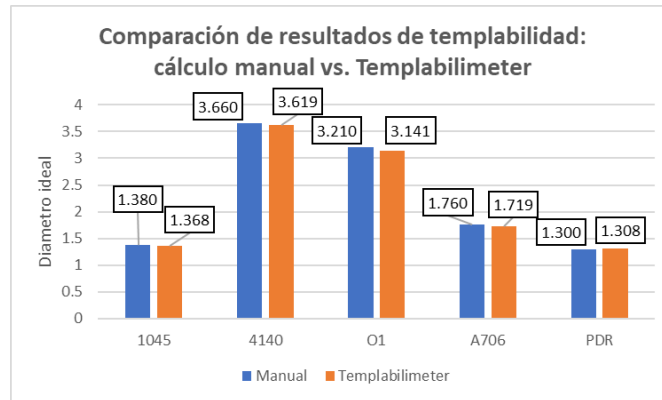
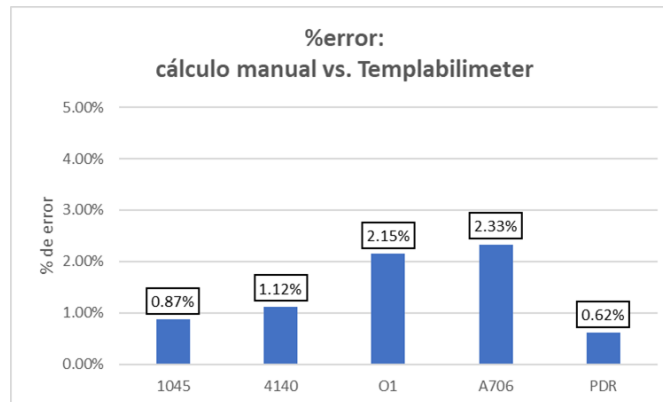


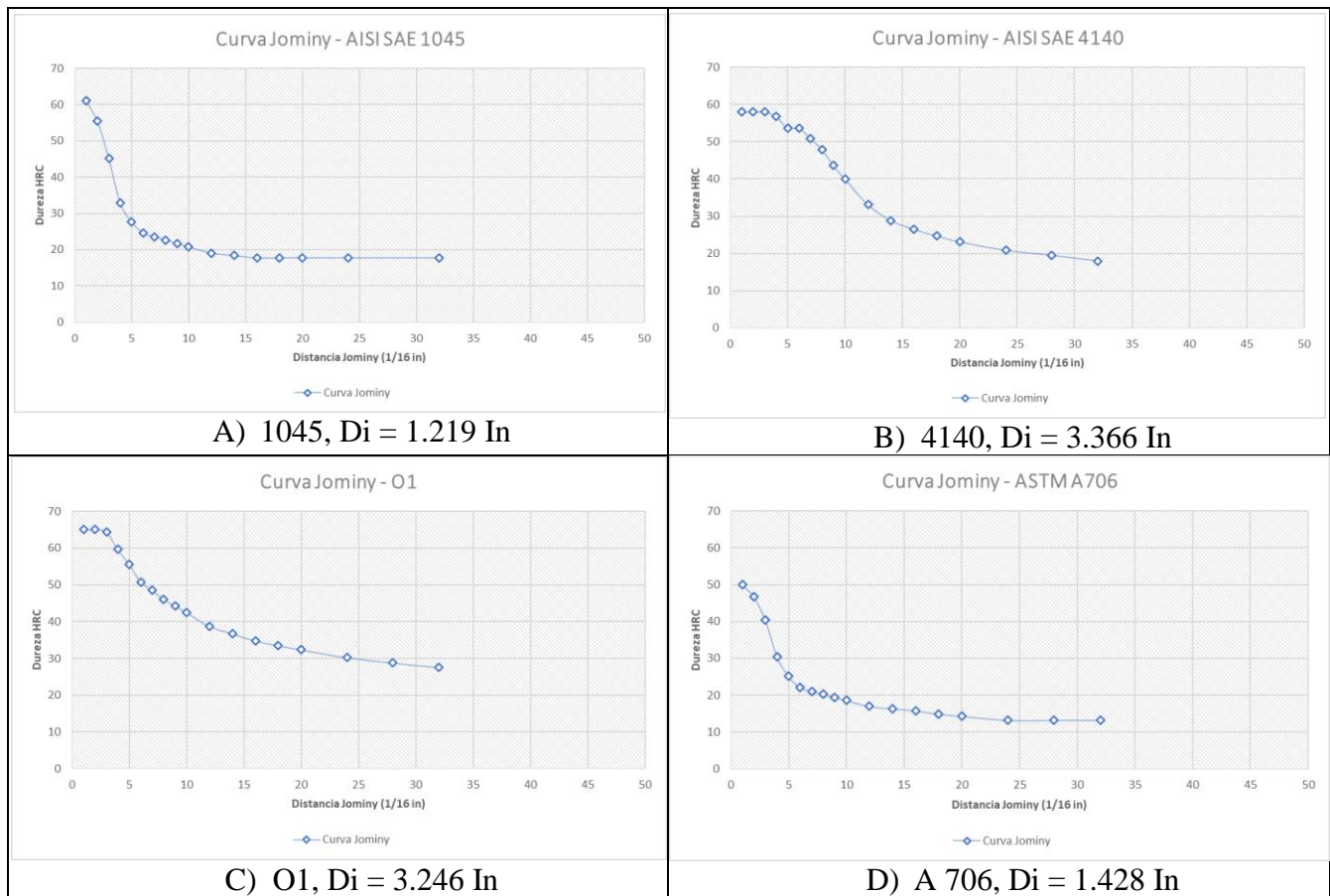
Figura 15 Comparación de la templabilidad experimental calculada manualmente y con Templabilimeter.**Figura 16** Comparación del % de error para el cálculo de templabilidad experimental.

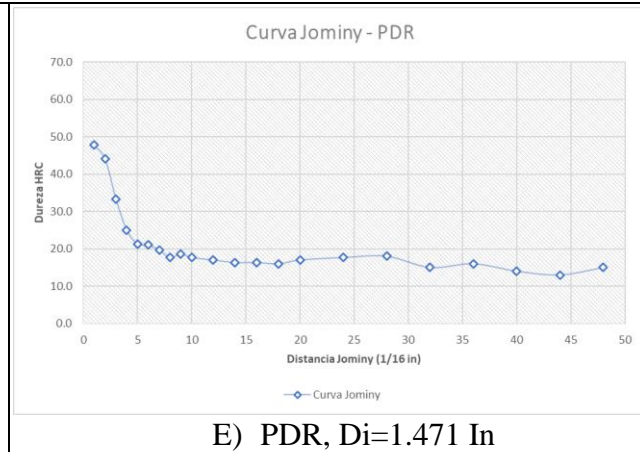
En la **Figura 15** se identifica una ligera tendencia a que los valores calculados por Templabilimeter sean levemente menores que los obtenidos de forma manual; sin embargo, esta diferencia se mantiene dentro de lo esperado y no afecta el orden ni la interpretación de la templabilidad. En la **Figura 16** se observa que los porcentajes de error relativo entre el cálculo manual y los resultados obtenidos con el software Templabilimeter se encuentran en un rango aproximado entre 0.62 % y 2.33 %, valores que se consideran bajos y aceptables según lo planteado en la metodología. Estos resultados confirman que la secuencia lógica de cálculos implementada en el software Templabilimeter es confiable y conduce a valores de templabilidad coherentes con los esperados.

4.5 Comparación del D_i teórico manual y calculado por el software

En la **sección 4.4** se presentaron los casos de cálculo de las curvas Jominy y templabilidad obtenidos a partir de los datos experimentales, verificando que lo obtenido por medio de Templabilimeter sea igual a lo obtenido por el método manual siguiendo la norma. Ahora en esta sección, se presentan las curvas Jominy teóricas, las cuales son obtenidas a partir de la composición química de los aceros. A continuación, se presentan en la **Figura 17** los resultados.

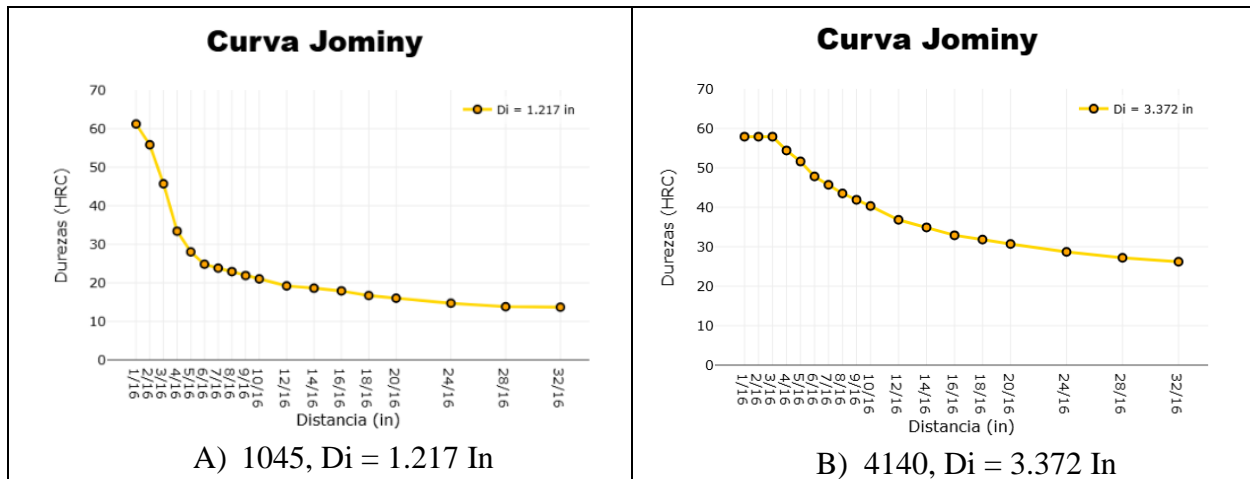
Figura 17. Curva Jominy teóricas para los aceros AISI-SAE1045 (A), AISI-SAE 4140 (B), O1 (C), ASTM A706 (D) y PDR (E).

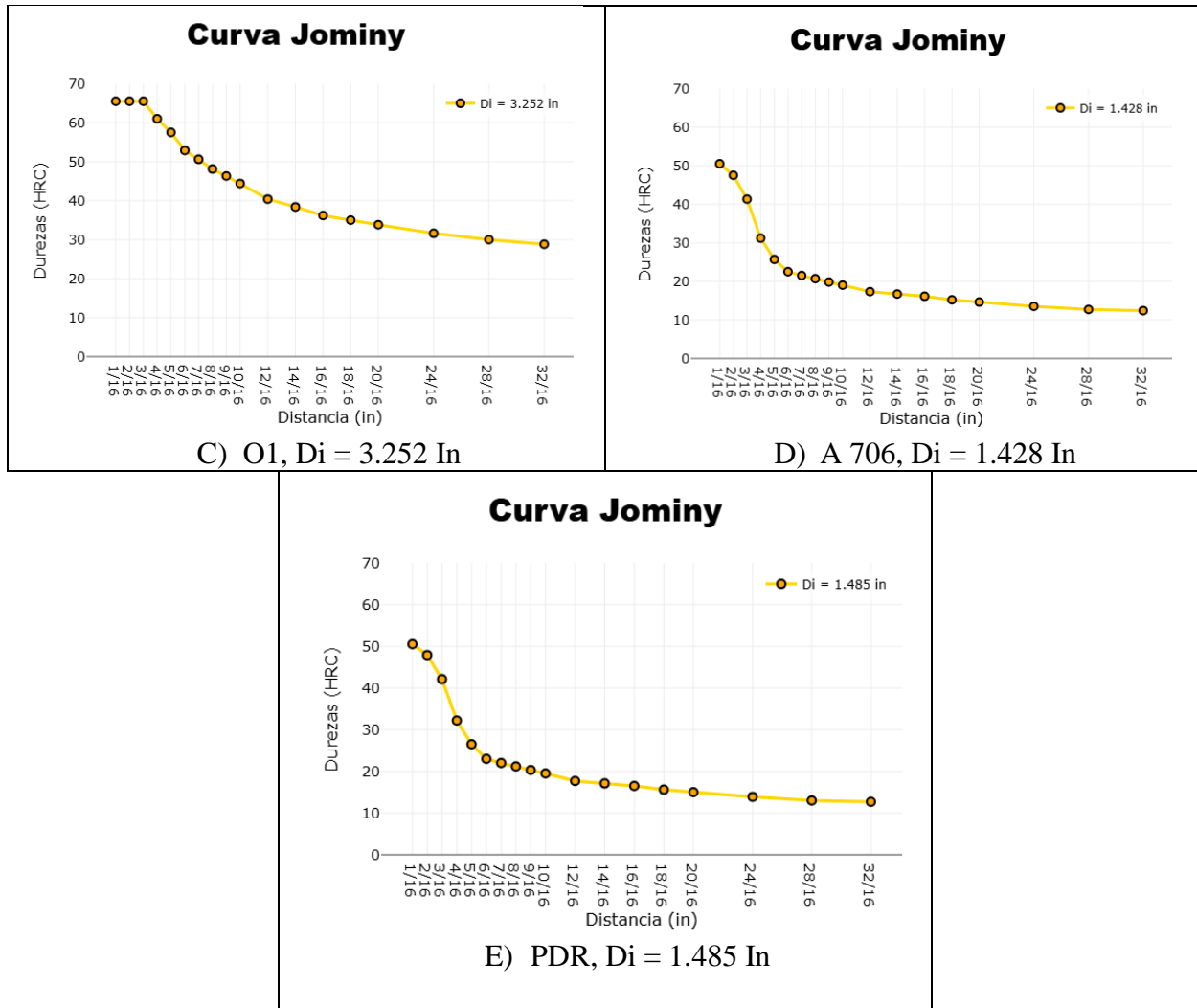




Las curvas Jominy teóricas generadas por Templabilimeter se presentan en la **Figura 18**, junto con los valores de templabilidad obtenidos para cada acero analizado.

Figura 18. Curvas Jominy generadas de forma teórica mediante Templabilimeter AISI-SAE1045 (A), AISI-SAE 4140 (B), O1 (C), ASTM A706 (D) y PDR (E).





La **Figura 19** muestra la comparación entre la templabilidad teórica calculada manualmente a partir de la norma y la estimada utilizando el software Templabilimeter. La **Figura 20** muestra el error relativo para cada caso.

Figura 19 Comparación de la templabilidad teórica calculada manualmente y con Templabilimeter.

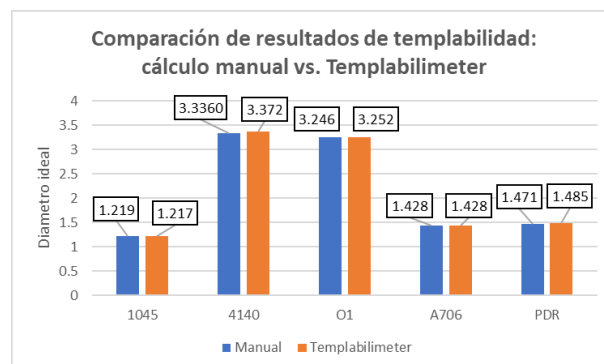
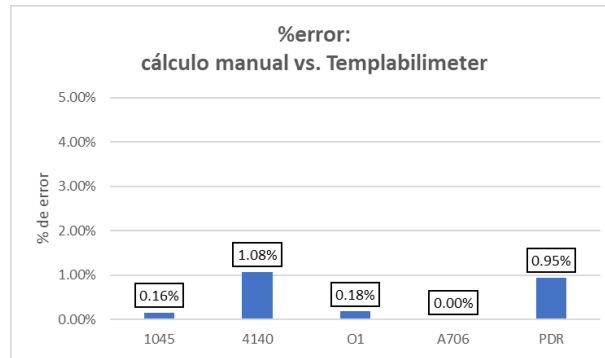


Figura 20 Comparación del % de error para el cálculo de templabilidad teórica.

En la **Figura 19** no se observan tendencias marcadas al comparar los cálculos manuales con los realizados por el software Templabilimeter; no obstante, los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos esperados. Asimismo, en la **Figura 20** se aprecia que los porcentajes de error se sitúan entre 0 y 1.08 %, los cuales, al igual que lo discutido en la Sección **4.4**, se consideran bajos y aceptables. En conjunto, estos resultados confirman que la implementación realizada en Templabilimeter produce valores confiables y coherentes con los esperados para los aceros analizados.

4.6 Evaluación cálculo de la templabilidad por Templabilimeter

En la **Figura 15** se observan los diámetros ideales generados por Templabilimeter en el apartado experimental. Se aprecia que los aceros A706, 1045 y PDR presentan los valores más bajos, de 1.719 in , 1.368 in y 1.308 in respectivamente. Esto es coherente con la literatura, ya que estos aceros contienen elementos de aleación como Mn, Si o V, que, si bien incrementan la templabilidad, no son tan efectivos para este fin como el Cr, el Mo o el Ni, elementos que la potencian en mayor medida.

El acero 1045, con un diámetro ideal de 1.368 in, es ampliamente utilizado en la fabricación de pernos, pasadores, tornillería, engranajes, bujes y otros componentes mecánicos; además, su contenido medio de carbono permite realizar temple superficiales para obtener una buena dureza

superficial. En cuanto a los aceros A706 y PDR, su aplicación principal es como refuerzo para concreto, donde se priorizan la soldabilidad y la ductilidad más que la resistencia al desgaste. Los resultados muestran que el acero A706 presenta una templabilidad mayor que la del 1045, con una diferencia de 0.351 in, y también mayor que la del PDR, con una diferencia de 0.411 in. Teniendo en cuenta que los aceros fueron normalizados, por lo cual parten de microestructuras con igual tamaño de grano, es posible concluir que el acero A706 presenta elementos de aleación que tienen un mayor efecto sobre el aumento de la templabilidad.

Por otro lado, los aceros 4140 y O1 presentan los diámetros ideales más altos, de 3.619 in y 3.141 in respectivamente. Esto se debe a su mayor templabilidad, ya que están diseñados para aplicaciones de mayor exigencia. El acero 4140 se utiliza en componentes como ejes, árboles de levas, cigüeñales y rodillos industriales, mientras que el acero O1 es un acero para herramientas con un alto contenido de carbono, superior al 0.8 %, lo que incrementa su dureza después del temple hasta aproximadamente 65 HRC. Los resultados muestran que el acero AISI 4140 presenta una mayor templabilidad que el acero O1, con una diferencia de 0.487 in en el diámetro ideal. Esta diferencia puede atribuirse a la presencia de aproximadamente 0.15% de molibdeno en la composición química del acero 4140, elemento aleante que ejerce un efecto significativo sobre la templabilidad. Así mismo, el alto contenido de carbono del acero O1 favorece la posible formación de carburos durante el calentamiento, lo cual reduce los elementos de aleación disponibles en solución sólida que influyen sobre la disminución de la templabilidad y la formación de martensita. Por estas razones, aunque el acero 4140 presenta una sumatoria de elementos de aleación de 2.28%, frente al 2.55% del acero O1, el acero 4140 obtiene una mayor templabilidad, validando lo dicho anteriormente.

En la **Figura 19** se observan los diámetros ideales generados por Templabilimeter en el apartado Teórico. Nuevamente se aprecia que los aceros con menor templabilidad son los aceros, PDR, A706 y 1045, con 1.485 in, 1.428 in y 1.217 in respectivamente. Sin embargo, esta vez el orden descendente cambia, ahora el que tiene una mayor templabilidad, es el acero PDR con una diferencia de 0.057 in con el A706, y una diferencia de 0.268 in con el 1045. Teniendo en cuenta que los aceros fueron normalizados, lo que significa que parten de una microestructura y tamaño de grano similar, la templabilidad estaría influenciada únicamente por la composición química, por tanto, se concluye que el PDR contiene elementos aleantes con mayor efecto en la templabilidad, seguido del A706 y por último el 1045, estos resultados concuerdan con la composición química teórica propuesta para realizar la validación (**Tabla 6**).

Por su parte, los aceros 4140 y O1 de mayor templabilidad, permanecen en el orden establecido anteriormente, pero con una diferencia entre ambos ahora de 0.12 in, teniendo concordancia con lo expuesto anteriormente y la composición química propuesta para realizar la validación (**Tabla 6**).

4.7 Comparación de resultados dados por Templabilimeter y los realizados manualmente

En la **Figura 15** se presentan los resultados del cálculo de templabilidad experimental obtenidos manualmente y con Templabilimeter. En la **Figura 16** Se observa que el mayor porcentaje de error corresponde al acero A706, con un valor de 2.33%. Esta desviación podría estar asociada a la variabilidad registrada en su curva Jominy, donde la dureza mostró fluctuaciones máximas de ± 1.7 in entre puntos consecutivos, lo que puede afectar el cálculo del diámetro ideal. No obstante, el acero PDR presentó un comportamiento similar en su curva y aun así registró un error menor, de 0.65 %, por lo que no es posible establecer una tendencia clara que

explique de manera definitiva la diferencia observada en el acero A706. Así mismo se observa que los menores porcentajes de error están asociados a bajas templabilidades, lo cual concuerda con el hecho de que a más elementos de aleación en interacción se vuelve más complicado estimar el valor real de templabilidad. Sin embargo, las diferencias obtenidas son aceptables concluyendo que el proceso de cálculo del software es correcto.

Por otra parte, el orden de templabilidad obtenido manualmente coincide con lo discutido en la sección 4.6, manteniendo el mismo patrón descendente: 4140, O1, PDR, A706 y 1045, lo cual refuerza la consistencia general de los resultados.

En la **Figura 19** se presentan los resultados del cálculo de templabilidad teórica obtenidos manualmente y mediante el software Templabilimeter. En la **Figura 20** se observa que el mayor porcentaje de error corresponde al acero 4140, con un valor de 1.08 %, esto podría explicarse por el hecho de que es el acero con mayor presencia de elementos de aleación determinantes, particularmente molibdeno. También se aprecia que el acero A706 presenta un error de 0.00 %, lo cual indica una excelente aproximación respecto a lo establecido en la norma. Por otro lado, el acero PDR muestra un porcentaje de error de 0.95 %, el segundo más alto; sin embargo, al no superar el 1 %, se considera igualmente una aproximación satisfactoria. Sin embargo, las diferencias obtenidas son aceptables concluyendo que el proceso de cálculo del software es correcto.

5. Conclusiones

La aplicación web implementada logró integrar correctamente los modelos matemáticos propuestos en la norma ASTM mediante una la lógica de decisión requerida para aceros con distintas composiciones químicas, lo cual permitió automatizar un procedimiento costoso o dependiente de cálculos manuales. La coherencia entre la ruta de cálculo teórica y la experimental,

junto con errores relativos inferiores al 2.4 %, evidencia que la digitalización del proceso es viable y que el algoritmo reproduce con fidelidad el modelo planteado para el comportamiento real de las curvas Jominy tanto a partir de datos de composición química como de los datos experimentales. Los resultados presentados demuestran que es posible automatizar la determinación de la templabilidad de manera confiable. El software Templabilimeter puede verse en <https://trabajodegrado-ai.github.io/Templabilimeter1.0/>.

Los resultados obtenidos siguiendo la metodología de este trabajo para aceros con bajo contenido de elementos de aleación (1045, A706 y PDR) frente a aceros templables de alta aleación (4140 y O1) mantienen el orden esperado según la norma y lo encontrado en la literatura. Esto demuestra que el software Templabilimeter desarrollado interpreta correctamente la contribución de cada elemento y de sus factores multiplicativos, y que es capaz de predecir perfiles de templabilidad consistentes con el comportamiento metalúrgico real, cumpliendo el objetivo de validar los resultados frente a ensayos Jominy reales. La validación experimental confirma que la herramienta reproduce adecuadamente el efecto de la composición química en la templabilidad.

La capacidad del software Templabilimeter para calcular el diámetro ideal, generar curvas Jominy y estimar el comportamiento del acero bajo diferentes condiciones de enfriamiento de manera automatizada, sin cálculos manuales ha sido comprobada con rangos de error muy bajos. El uso del software conduce a la disminución de costos asociados a pruebas, reduce el tiempo de desarrollo de cálculos y brinda información que facilita la selección de aceros y condiciones de temple. Además, su fácil uso, el acceso libre, y la rápida secuencia de cálculos realizados, lo convierte en un recurso útil tanto para aplicaciones industriales como para la formación académica en tratamiento térmico y templabilidad.

Referencias bibliográficas

- Asdrúbal Valencia Giraldo. (1986). Tecnología del tratamiento térmico de los metales. *Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Volumen 2.*
- Athavale, V. A., Buchely, M., Bartlett, L., O'Malley, R., & Van Aken, D. C. (2021b). On a modified approach of measuring quench severity and its application. *31st ASM Heat Treating Society Conference and Exposition, Heat Treat 2021 - Extended Abstracts, 1*, 79–82. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.ht2021exabp0079>
- B. ZAKHAROV. (1964). HARDENING. In *HEAT TREATMENT OF METALS.*
- Bhadeshia, H. K. D. H. (2012). Steels for bearings. In *Progress in Materials Science* (Vol. 57, Issue 2, pp. 268–435). <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.06.002>
- Claudia González Castillo, A., De Jesús, J., Rivera, C., Ramos Azpeitia, O., Luis, J., & Rivera, H. (2019). *Tema AI Manufactura y Materiales “Desarrollo de un acero de medio Mn con adiciones de B y V para aplicaciones automotrices.”*
- Donald R. Askeland, & Pradeep P. Phulé. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales* (International Thomson Editores, Ed.; 1ra en español, Vol. 3).
- El-Shennawy, M., Farahat, A. I., Masoud, M. I., & Abdel-Aziz, A. I. (2016). *HEAT TREATMENT EFFECT ON MICROALLOYED LOW CARBON STEEL WITH DIFFERENT BORON CONTENT.* www.iaset.us
- García - Herrera C.M., Celentano D.J, Cruchaga M.A, & C. Loewe. (2014). Simulación termomecánica de un proceso industrial de templado de un rodete de una bomba centrífuga. *ELSEVIER.*
- H. Kiessler. (n.d.). *Die Härteprüfung von Baustahl.*

- K. Wanke, & K. Schramm. (1972). *TEMPLE DEL ACERO: MANUAL PARA EL TRATAMIENTO TERMICO DE LAS ALEACIONES DE HIERRO (ESPÁÑOLA)*.
- M.A. GROSSMANN. (1952). *ELEMENTS OF HARDENABILITY* (American Society for Metals, Ed.; 1st ed.).
- Maity, J., & Sharma, A. (2023b). A novel analytical approach to ascertain hardenability of plain carbon steel. *Philosophical Magazine*, 103(5), 407–434. <https://doi.org/10.1080/14786435.2022.2154400>
- Mudda, S., Hegde, A., Sharma, S., Gurumurthy, B. M., Shettar, M., & Gowrishankar, M. C. (2025). Effect of various heat treatment methods and optimization of their parameters on mechanical properties of AISI 4140 steel. *Scientific Reports*, 15(1), 31854. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17299-1>
- Quiñones, F., Carazo, F. D., Aranda, V. H., & Sánchez, M. (2018b). DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA PREDICCIÓN DE LA DUREZA EN LOS ACEROS AISI 1040 Y 4140 TRATADOS TÉRMICAMENTE. In *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica* (Vol. 22, Issue 1).
- Salama, H., Shchyglo, O., & Steinbach, I. (2025). The interplay between the martensitic transformation rate and the rate of plastic relaxation during martensitic transformation in low-carbon steel, a phase-field study. In *npj Computational Materials* (Vol. 11, Issue 1). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41524-024-01499-w>
- Saunders, N., Guo, Z., Li, X., Miodownik, A., & Schillé, J.-P. (2003). *Using JMatPro to Model Materials Properties and Behavior*.

- Sitek, W., Trzaska, J., & Dobrzański, L. A. (2008). Modified Tartagli method for calculation of Jominy hardenability curve. *Materials Science Forum*, 575-578 PART 2, 892–897. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.575-578.892>
- Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought.* (2023). ASTM International. https://doi.org/10.1520/A0029_A0029M-23
- Specification for Tool Steels Alloy.* (2024). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/A0681-24>
- Test Methods for Determining Hardenability of Steel.* (2020). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/A0255-20A>
- Totten, G. E., Otero, R. S., Luo, X., & Canale, L. C. F. (Eds.). (2024). *Quenchants and Quenching Technology.* ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v4F.9781627084505>
- Wang, B., Zhu, D., Zhang, C., Zhou, X., Wu, H., Wang, S., Wu, G., Gao, J., Zhao, H., & Mao, X. (2025a). Influence of typical elements and heat treatment parameters on hardenability in steel: a review. *Journal of Iron and Steel Research International*, 32(6), 1455–1467. <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01307-1>
- Wang, B. Bin, Zhu, D. X., Zhang, C. L., Zhou, X. Y., Wu, H. H., Wang, S. Z., Wu, G. L., Gao, J. H., Zhao, H. T., & Mao, X. P. (2025b). Influence of typical elements and heat treatment parameters on hardenability in steel: a review. In *Journal of Iron and Steel Research International* (Vol. 32, Issue 6, pp. 1455–1467). Springer. <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01307-1>

Yang, Z., Yan, C., Tang, T., Li, P., & Li, Z. (2024). Failure analysis and heat treatment process optimization of NOS525 rotary flat binaural hot forging die. *Engineering Failure Analysis*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108521>

Yu. M. Laitin. (1973). *METALOGRAFÍA Y TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS METALES* (EDITORIAL MIR, Trans.).

Apéndices

Apéndice A: Durezas experimentales registradas en los ensayos Jominy

Medición (1/16 in)	1045		4140		O1		A706		PDR	
	Prom	Des Est.	Prom	Des Est.	Prom	Des Est.	Prom	Des Est.	Prom	Des Est.
1	54.0	0.00	56.0	0.00	66.5	0.58	47.8	1.26	47.75	0.96
2	52.5	1.91	54.3	1.15	66.5	0.58	47.5	0.71	44.00	0.00
3	40.3	0.58	54.3	0.58	66.3	0.58	41.3	1.53	33.33	1.15
4	27.0	0.00	53.7	0.58	65.5	1.00	34.5	0.71	25.00	1.73
5	27.0	0.00	52.7	0.58	64.7	0.58	28.0	2.00	21.33	0.58
6	26.3	0.58	52.3	1.15	64.3	0.58	25.0	1.41	21.00	1.00
7	24.0	1.73	50.7	0.58	62.3	0.58	21.5	0.71	19.67	0.58
8	24.0	0.00	49.7	0.58	58.3	0.58	21.7	1.15	17.67	1.15
9	24.0	0.00	46.7	0.58	52.3	0.58	20.0	1.41	18.67	0.58
10	23.0	0.00	44.0	1.41	48.3	0.96	19.0	0.00	17.67	0.58
12	22.0	0.00	40.3	0.58	43.3	0.58	15.5	0.71	17.00	1.00
14	22.0	0.82	39.0	1.00	41.0	0.00	15.5	0.71	16.33	1.53
16	21.3	0.58	36.0	0.00	40.5	0.71	15.5	0.71	16.33	1.15
18	19.8	2.06	34.5	0.71	40.0	0.00	15.0	0.00	16.00	1.00
20	19.0	1.00	33.5	0.71	39.0	0.00	15.5	0.71	17.00	0.00
24	19.3	0.58	33.0	0.00	38.5	0.71	15.0	0.00	17.67	0.58
28	18.5	0.71	32.0	0.00	38.0	0.00	14.5	0.71	18.00	0.00
32	17.0	0.00	31.5	0.71	38.0	0.00	15.0	0.00	15.00	1.00
36	15.0	x	31.0	x	38.0	x	15.0	x	16.00	x
40	15.0	x	30.0	x	38.0	x	15.0	x	14.00	x
44	15.0	x	30.0	x	38.0	x	14.0	x	13.00	x
48	14.0	x	31.0	x	38.0	x	12.0	x	15.00	x

Apéndice B: Factores Jominy y Di teórico calculados manualmente

Elemento	1045		4140		O1		A706		PDR	
	Cantidad	Factor aleación	Cantidad	Factor aleación	Cantidad	Factor aleación	Cantidad	Factor aleación	Cantidad	Factor aleación
%C	0.500	0.238	0.430	0.220	0.950	0.321	0.300	0.162	0.300	0.162
%Mn	0.900	4.000	0.750	3.500	1.000	4.333	1.500	6.530	1.500	6.530
%Si	0.400	1.280	0.150	1.105	0.100	1.070	0.500	1.350	0.500	1.350
%Cr	-	-	0.800	2.728	0.400	1.864	-	-	-	-
%Mo	-	-	0.150	1.450	-	-	-	-	-	-
%V	-	-	-	-	0.100	1.170	-	-	0.023	1.030
Di	1.219 In		3.366 In		3.246 In		1.428 In		1.471 In	

Apéndice C: Scripts que componen Templabilimeter

SinBoroScript/1validacionDatos.js:

```
function mensaje (elemento,max, duracion){
  const toast =document.querySelector('#toast')

  toast.textContent = `El rango de composicion permitido para el ${elemento}
segun la norma ASTM A255-20a es hasta ${max}%, vuelva a intentarlo.`;
  toast.style.display = 'block'
  // Reinicia la animación
  toast.style.animation = 'none';
  void toast.offsetWidth;
  toast.style.animation = null;

  setTimeout(() => {
    toast.style.display = 'none';
  }, duracion);
}

const carbono = document.querySelector ('[name="Carbono"]');
carbono.addEventListener('input', function(){
  const valor = parseFloat(carbono.value);
  if (valor < 0 || valor > 0.9){
    mensaje('Carbono',0.9,2000);
    carbono.value = '';
  }
})

const Manganeso = document.querySelector ('[name="Manganeso"]');
Manganeso.addEventListener('input', function(){
  const valor = parseFloat(Manganeso.value)
  if (valor < 0 || valor > 1.95){
    mensaje('Manganeso',1.95,2000);
    Manganeso.value = '';
  }
})
```

```
const Silicio = document.querySelector ('[name="Silicio"]');

Silicio.addEventListener('input', function(){
  const valor = parseFloat(Silicio.value)
  if (valor < 0 || valor > 2){
    mensaje('Silicio',2,2000);
    Silicio.value = '';
  }
})

const Niquel = document.querySelector ('[name="Niquel"]');

Niquel.addEventListener('input', function(){
  const valor = parseFloat(Niquel.value)
  if (valor < 0 || valor > 3.5){
    mensaje('Niquel',3.5,2000);
    Niquel.value = '';
  }
})

const Cromo = document.querySelector ('[name="Cromo"]');

Cromo.addEventListener('input', function(){
  const valor = parseFloat(Cromo.value)
  if (valor < 0 || valor > 2.5){
    mensaje('Cromo',2.5,2000);
    Cromo.value = '';
  }
})

const Molibdeno = document.querySelector ('[name="Molibdeno"]');

Molibdeno.addEventListener('input', function(){
  const valor = parseFloat(Molibdeno.value)
  if (valor < 0 || valor > 0.55){
    mensaje('Molibdeno',0.55,2000);
    Molibdeno.value = '';
  }
})

const Cobre = document.querySelector ('[name="Cobre"]');

Cobre.addEventListener('input', function(){
```

```

    const valor = parseFloat(Cobre.value)
    if (valor < 0 || valor > 0.55){
        mensaje('Cobre',0.55,2000);
        Cobre.value = '';
    }
})

const Vanadio = document.querySelector ('[name="Vanadio"]');

Vanadio.addEventListener('input', function(){
    const valor = parseFloat(Vanadio.value)
    if (valor < 0 || valor > 0.2){
        mensaje('Vanadio',0.2,2000);
        Vanadio.value = '';
    }
})

const Zirconio = document.querySelector ('[name="Zirconio"]');

Zirconio.addEventListener('input', function(){
    const valor = parseFloat(Zirconio.value)
    if (valor < 0 || valor > 0.25){
        mensaje('Zirconio',0.25,2000);
        Zirconio.value = '';
    }
})
})

```

SinBoroScript/1main.js:

```

import { calcularDi } from './3calcDi.js';
import { mar100,mar50 } from './2calcDurezas.js';
import {factJominy} from './4factJominy.js';
import { calcularDurezas } from './5Durezas.js';

// Obtener el botón por su clase
const boton = document.querySelector('.boton');
// Agregar un event listener al botón
boton.addEventListener('click', function () {
    // Obtener el formulario
    let formData = document.querySelector('.Formulario-Composicion');
    const formulario = new FormData(formData);
    const compQuimica = Object.fromEntries(formulario.entries());
    const [Di,C] = calcularDi(compQuimica,'sinBoro');
    const dur100Mar = mar100(compQuimica.Carbono);
    const dur50Mar = mar50(compQuimica.Carbono);

```

```

let FactoresJ = null
if (Di <= 7){

    FactoresJ = factJominy(Di);
}else{
    FactoresJ = factJominy(7);
}
const durezas = calcularDurezas(dur100Mar,FactoresJ);

console.log(Di + 'estamos antes de url');
let url =
`jominyComp.html?durezas=${durezas}&dur50Mar=${dur50Mar}&dur100Mar=${dur100Mar}&D
i=${Di}&cQ=${compQuimica}`

if (compQuimica.Carbono !=0 && Di >=0.6){
    window.open(url, '_blank');
}
})

```

SinBoroScript/2calcDurezas.js:

```

export function mar50(Carbono){

if (Carbono === '' || isNaN(Carbono)) {
    mensaje(2000);

}else if(Carbono > 0.74){

    Carbono = 0.74
    return 21.93 + 27.153 * Carbono + 226.89 * (Carbono ** 2) - 717.17 *
(Carbono ** 3) + 958.62 * (Carbono ** 4) - 491.25 * (Carbono ** 5);

}else{
    return 21.93 + 27.153 * Carbono + 226.89 * (Carbono ** 2) - 717.17 *
(Carbono ** 3) + 958.62 * (Carbono ** 4) - 491.25 * (Carbono ** 5);
}
}

export function mar100(Carbono){

if (Carbono === '' || isNaN(Carbono)) {
    mensaje(2000);

```

```

    }else if(Carbono > 0.74){

        Carbono = 0.74
        return 33.087 + 50.723 * Carbono + 33.662 * (Carbono ** 2) - 2.7048 *
(Carbono ** 3) - 107.02 * (Carbono ** 4) + 43.523 * (Carbono ** 5) ;

    }else{
        return 33.087 + 50.723 * Carbono + 33.662 * (Carbono ** 2) - 2.7048 *
(Carbono ** 3) - 107.02 * (Carbono ** 4) + 43.523 * (Carbono ** 5) ;
    }
}

function mensaje (duracion){

    const toast =document.querySelector('#toast');
    toast.textContent = `Upps parece que olvidaste digitar la cantidad de Carbono
del acero en cuestion, por favor vuelve a intentarlo.`;

    toast.style.display = 'block';
    // Reinicia la animación
    toast.style.animation = 'none';
    void toast.offsetWidth;
    toast.style.animation = null;

    setTimeout(() => {
        toast.style.display = 'none';
    }, duracion);
}

```

SinBoroScript/3calcDi.js:

```

export function calcularDi (compQuimica, llave){

    let C = factCarbon(parseFloat(compQuimica.Carbono));
    let Mn = factManganeso(parseFloat(compQuimica.Manganeso));
    let Si = factSilicio(parseFloat(compQuimica.Silicio));
    let Ni = factNiquel(parseFloat(compQuimica.Niquel));
    let Cr = factCromo(parseFloat(compQuimica.Cromo));
    let Mo = factMolibdeno(parseFloat(compQuimica.Molibdeno));
    let Cu = factCobre(parseFloat(compQuimica.Cobre));
    let V = factVanadio(parseFloat(compQuimica.Vanadio));
    let Zr = factZirconio(parseFloat(compQuimica.Zirconio));

```

```
//Se hace una funcion especial para cada elemento, la cual contenga la
expresion matematica que define el factor a calcular.
if (C == 1 && Mn == 1 && Si == 1 && Ni == 1 && Cr == 1 && Mo == 1 && Cu == 1
&& V == 1 && Zr == 1){
  setTimeout(() => {
    location.reload();
  }, 2000);

}else if(C * Mn * Si * Ni * Cr * Mo * Cu * V * Zr <= 0.6){
  mensaje(2000)

}else if (C * Mn * Si * Ni * Cr * Mo * Cu * V * Zr > 0.6 && llave ==
'sinBoro'){
  return [C * Mn * Si * Ni * Cr * Mo * Cu * V * Zr, C];

}else if (C * Mn * Si * Ni * Cr * Mo * Cu * V * Zr > 0.6 && llave ==
'conBoro'){
  return [C * Mn * Si * Ni * Cr * Mo * Cu * V * Zr, C];
}
}

function mensaje (duracion){
  document.querySelector("#toast").style.textAlign = "center"
  const toast =document.querySelector('#toast');
  toast.textContent = `Upps, parece que el diametro ideal de este acero es
menor que 1 in, esto se sale del alcance de la norma, por lo tanto
TEMPLABILIMETER, no puede ayudarte`;

  toast.style.display = 'block';
  // Reinicia la animación
  toast.style.animation = 'none';
  void toast.offsetWidth;
  toast.style.animation = null;

  setTimeout(() => {
    toast.style.display = 'none';
  }, duracion);
}

function factCarbon(Carbono){
```

```
if (Carbono === '' || isNaN(Carbono) || Carbono === 0 ) {
    return 1;
}

if (Carbono <= 0.39){
    return 0.54 * Carbono;
}

if (0.39 < Carbono && Carbono<= 0.55){
    return 0.171 + 0.001 * Carbono + 0.265 * ((Carbono)**2);
}

if (0.55 < Carbono && Carbono<= 0.65){
    return 0.115 + 0.268 * Carbono - 0.038 * ((Carbono)**2);
}

if (0.65 < Carbono && Carbono<= 0.75){
    return 0.143 + 0.2 * Carbono;
}

if (0.75 < Carbono && Carbono<= 0.90){
    return 0.062 + 0.409 * Carbono - 0.135 * ((Carbono)**2);
}
}

function factManganeso(Manganeso){
    if (Manganeso === '' || isNaN(Manganeso) || Manganeso === 0) {
        return 1;
    }

    if (Manganeso <= 1.20){
        return (3.3333 * Manganeso) + 1 ;
    }

    if (1.20 < Manganeso && Manganeso <= 1.95){
        return 5.10 * Manganeso - 1.12;
    }
}

function factSilicio(Silicio){
```

```
    if (Silicio === '' || isNaN(Silicio) || Silicio === 0) {
        return 1;
    }

    if (Silicio <= 2){
        return 1 + 0.7 * Silicio;
    }
}

function factNiquel(Niquel){

    if (Niquel === '' || isNaN(Niquel) || Niquel === 0) {
        return 1;
    }

    if (Niquel <= 1.5){
        return 1 + 0.363 * Niquel;
    }

    if (1.5 < Niquel && Niquel <= 3.5){
        return 0.3211 + 1.4501 * Niquel - 0.6119 * ((Niquel)**2) + 0.1253 *
((Niquel)**3);
    }
}

function factCromo(Cromo){

    if (Cromo === '' || isNaN(Cromo)) {
        return 1;
    }

    if (Cromo <= 2.5){
        return 1 + 2.16 * Cromo;
    }
}

function factMolibdeno(Molibdeno){

    if (Molibdeno === '' || isNaN(Molibdeno) || Molibdeno === 0) {
        return 1;
    }

    if (Molibdeno <= 0.55){
```

```
        return 1 + 3 * Molibdeno;
    }
}

function factCobre(Cobre){

    if (Cobre === '' || isNaN(Cobre) || Cobre === 0) {
        return 1;
    }

    if (Cobre <= 0.55){
        return 1 + 0.365 * Cobre;
    }
}

function factVanadio(Vanadio){

    if (Vanadio === '' || isNaN(Vanadio) || Vanadio === 0) {
        return 1;
    }

    if (Vanadio <= 0.20){
        return 1 + 1.73 * Vanadio;
    }
}

function factZirconio(Zirconio){

    if (Zirconio === '' || isNaN(Zirconio) || Zirconio === 0) {
        return 1;
    }

    if (Zirconio <= 0.25){
        return 1 + 2.5 * Zirconio;
    }
}
}
```

SinBoroScript/4factJominy.js:

```
export function factJominy(Di){
    let fac2 = dos(Di);
    let fac3 = tres(Di);
    let fac4 = cuatro(Di);
```

```
let fac5 = cinco(Di);
let fac6 = seis(Di);
let fac7 = siete(Di);
let fac8 = ocho(Di);
let fac9 = nueve(Di);
let fac10 = diez(Di);
let fac12 = doce(Di);
let fac14 = catorce(Di);
let fac16 = diesiseis(Di);
let fac18 = diesiocho(Di);
let fac20 = veinte(Di);
let fac24 = ventiCuatro(Di);
let fac28 = ventiOcho(Di);
let fac32 = treintayDos(Di);

return
[fac2, fac3, fac4, fac5, fac6, fac7, fac8, fac9, fac10, fac12, fac14, fac16, fac18, fac20, fac24, fac28, fac32]
}

function dos(Di){
  if (Di <= 2.1){

    return 4.68961 - 11.00832 * Di + 13.83314 * Di**2 - 8.80283 * Di**3 +
2.78698 * Di**4 - 0.34880 * Di**5;

  }else{

    return 1;

  }
}

function tres(Di){

  if (Di <= 3.1){

    return 2.34904 - 0.28254 * Di - 1.42995 * Di**2 + 1.16697 * Di**3 -
0.33813 * Di**4 + 0.03403 * Di**5;

  }else{

    return 1;

  }
}
```

```
    }  
}  
  
function cuatro(Di){  
    if (Di <= 4.1){  
        return 5.66795 - 6.14648 * Di + 3.52874 * Di**2 - 1.06026 * Di**3 +  
0.16301 * Di**4 - 0.01015 * Di**5;  
    }else{  
        return 1;  
    }  
}  
  
function cinco(Di){  
    if (Di <= 4.4){  
        return 4.52902 - 2.90739 * Di + 0.986508 * Di**2 - 0.163586 * Di**3 +  
0.012095 * Di**4 - 0.000257202 * Di**5;  
    }else{  
        return 1;  
    }  
}  
  
function seis(Di){  
    if (Di <= 5.0){  
        return 4.39436 - 2.16072 * Di + 0.56027 * Di**2 - 0.08145 * Di**3 +  
0.00840 * Di**4 - 0.000530827 * Di**5;  
    }else{  
        return 1;  
    }  
}
```

```
function siete(Di){  
    if (Di <= 5.3){  
        return 4.15002 - 1.43154 * Di + 0.00235893 * Di**2 + 0.112947 * Di**3 -  
0.0237546 * Di**4 + 0.00150903 * Di**5;  
    }else{  
        return 1;  
    }  
}  
  
function ocho(Di){  
    if (Di <= 5.6){  
        return 4.44473 - 1.79085 * Di + 0.24617 * Di**2 + 0.03378 * Di**3 -  
0.01189 * Di**4 + 0.000841843 * Di**5;  
    }else{  
        return 1;  
    }  
}  
  
function nueve(Di){  
    if (Di <= 5.8){  
        return 4.95421 - 2.43521 * Di + 0.62983 * Di**2 - 0.07914 * Di**3 +  
0.00399154 * Di**4 - 0.0000120363 * Di**5;  
    }else{  
        return 1;  
    }  
}  
  
function diez(Di){  
    if (Di <= 6.1){
```

```
        return 5.31610 - 2.80977 * Di + 0.84183 * Di**2 - 0.141781 * Di**3 +
0.0130138 * Di**4 - 0.000512388 * Di**5;

    }else{

        return 1;

    }
}

function doce(Di){

    if (Di <= 6.6){

        return 5.63649 - 2.89264 * Di + 0.90309 * Di**2 - 0.17297 * Di**3 +
0.01881 * Di**4 - 0.00086593 * Di**5;

    }else{

        return 1;

    }
}

function catorce(Di){

    return 5.83176 - 2.99646 * Di + 0.94088 * Di**2 - 0.17734 * Di**3 +
0.0183885 * Di**4 - 0.000790018 * Di**5;

}

function diesiseis(Di){

    return 6.06952 - 3.15198 * Di + 0.99297 * Di**2 - 0.18010 * Di**3 +
0.0172029 * Di**4 - 0.000664079 * Di**5;

}

function diesiocho(Di){

    return 7.32018 - 4.60605 * Di + 1.68442 * Di**2 - 0.338443 * Di**3 +
0.0345114 * Di**4 - 0.00138927 * Di**5;

}
```

```
function veinte(Di){
    return 7.81382 - 5.10022 * Di + 1.921410 * Di**2 - 0.394591 * Di**3 +
    0.040784 * Di**4 - 0.00165327 * Di**5;
}

function ventiCuatro(Di){
    return 9.18138 - 6.69048 * Di + 2.75891 * Di**2 - 0.611613 * Di**3 +
    0.0677165 * Di**4 - 0.002930700 * Di**5;
}

function ventiOcho(Di){
    return 9.27904 - 6.21461 * Di + 2.33158 * Di**2 - 0.46972 * Di**3 +
    0.0472654 * Di**4 - 0.00186035 * Di**5;
}

function treintayDos(Di){
    return 8.62857 - 5.16125 * Di + 1.81214 * Di**2 - 0.35489 * Di**3 + 0.035687
    * Di**4 - 0.001434 * Di**5;
}
```

SinBoroScript/5Durezas.js:

```
export function calcularDurezas(m100,FactoresJ){
    const durezas = [m100.toFixed(1)];
    // se itera sobre la lista facortes para calcular la dureza en cada
    // punto de la curva jominy
    for (let fac of FactoresJ){

        let d = m100/fac;

        durezas.push(d.toFixed(1));
    }
    return durezas
}
```

sinBoroScript/6main.js:

```
import { plot } from './7plotDi.js';
import { Lamont } from './8lamont.js';

document.addEventListener("DOMContentLoaded", recibirDatos)
function recibirDatos(){
    let datos = new URLSearchParams(window.location.search);
    let Di = parseFloat(datos.get('Di'));
    let mar100 = parseFloat(datos.get('dur100Mar'));
    let mar50 = parseFloat(datos.get('dur50Mar'));
    let comQuim = datos.get('cQ').split(',').map(Number);
    let durezas = datos.get('durezas').split(',').map(Number);

    const [datosPlot, personalizar] = plot(durezas, Di)
    window.Plotly.newPlot('Jominychart', datosPlot, personalizar)

    let [H1, HInfinito] = Lamont(mar50, durezas)

    if (typeof(H1) === 'number'){
        document.querySelector('#InformacionJ').innerHTML = `El diametro
ideal del acero por Norma es: <b>${Di.toFixed(3)} in</b>.<br>
El diametro ideal del acero por Lamont es: <b>${HInfinito.toFixed(3)}
in</b>.<br>
La dureza del 50% de martensita es: <b>${mar50.toFixed(1)} HRC</b>.`
<br>
El maximo diametro que se puede templar en agua es:
<b>${H1.toFixed(3)} in</b>.<br>
    }else{
        document.querySelector('#InformacionJ').innerHTML = `El diametro
ideal del acero por Grossman es: <b>${Di.toFixed(3)} in</b>.<br>
        ${H1}`
    }
}
```

SinBoroScript/7plotDi.js:

```
export function plot(durezas, Di){
    const facJ =
[1/16, 2/16, 3/16, 4/16, 5/16, 6/16, 7/16, 8/16, 9/16, 10/16, 12/16, 14/16, 16/16, 18/16, 20/16
, 24/16, 28/16, 32/16]
```

```
const etiquetasx
=['1/16', '2/16', '3/16', '4/16', '5/16', '6/16', '7/16', '8/16', '9/16', '10/16', '12/16',
'14/16', '16/16', '18/16', '20/16', '24/16', '28/16', '32/16']
console.log(Di)

const datosPlot =[{
  x: facJ,
  y: durezas,
  type: 'scatter',
  mode: 'lines+markers',
  name: `Di = ${Di.toFixed(3)} in`,
  marker: {size: 8,
    color: 'orange', // Puntos en rojo brillante
    line: { width: 2, color: 'black' }},
  },
  line: {width: 3,
    color: 'gold'},
  connectgaps: true
}];

const personalizar ={
  title: {
    text: 'Curva Jominy', font:{ family: 'Arial Black', size: 30, color:
'black' }},
  width: 590, // Ancho en píxeles
  height: 440, // Alto en píxeles

  margin: { l: 80, r: 10, t: 80, b: 80 },

  xaxis: {
    title: 'Distancia (in)',
    titlefont: { size: 16, color: 'black' },
    tickfont: { size: 14, color: 'black' },
    tickvals: facJ, //son los valores que voy a graficar en el eje x
    ticktext: etiquetasx, //son los valores que apareceran en el eje x
    tickmode: 'array',
    // type: 'category',
    showgrid: true, // Quitar rejilla
    zeroline: false

  },
  yaxis: {
    range: [0,70],
```

```

    title: 'Durezas (HRC)',
    titlefont: { size: 16, color: 'black' },
    tickfont: { size: 14, color: 'black' },
    showgrid: true, // Quitar rejilla
  },
  showlegend: true,
  // 💡 NUEVA CONFIGURACIÓN PARA LA POSICIÓN DE LA LEYENDA
  legend: {
    x: 0.98, // Cerca del borde derecho (ajusta si necesitas más
espacio)
    y: 0.98, // Cerca del borde superior
    xanchor: 'right', // Indica que el punto 'x' es el borde DERECHO de
La Leyenda
    yanchor: 'top', // Indica que el punto 'y' es el borde SUPERIOR de
La Leyenda
    bgcolor: 'rgba(255, 255, 255, 0.5)', // Fondo semitransparente para
que se vea sobre Las líneas
  },
  // 💡 ¡AQUÍ ESTÁ LA CLAVE! Configuración de La fuente
  font: {
    color: 'black', // Establece el color de la letra a negro
    // Puedes añadir otras propiedades como size o family si lo deseas
    // size: 14,
    // family: 'Arial',
  },
  plot_bgcolor: 'rgba(255, 255, 255, 0.7)', // Fondo oscuro
semitransparente
  paper_bgcolor: 'white', // Fondo negro
  hovermode: 'closest' // Mejor interacción al pasar el cursor
};

return [datosPlot,personalizar];
}

```

SinBoroScript/8lamont.js:

```

export function Lamont(mar50,durezas){
  const conjuntoJD =
[[1/16,durezas[0]],[2/16,durezas[1]],[3/16,durezas[2]],[4/16,durezas[3]],[5/16,du
rezas[4]],[6/16,durezas[5]],[7/16,durezas[6]],[8/16,durezas[7]],[9/16,durezas[8]]
,[10/16,durezas[9]],[12/16,durezas[10]],[14/16,durezas[11]],[16/16,durezas[12]],[
18/16,durezas[13]],[20/16,durezas[14]],[24/16,durezas[15]],[28/16,durezas[16]],[3
2/16,durezas[17]]]

```

```
if (mar50 > conjuntoJD[17][1]){
  const [anterior,siguiente,sup,inf] = buscarDureza(mar50,conjuntoJD)
  let DistanciaJ = interpolacion(anterior,sup,siguiente,inf,mar50)
  let [H1,HInfinito] = lamontMedioEnfriamiento(DistanciaJ)
  return [H1,HInfinito]
}else{
  let mensajeDeVuelta = `No es posible calcular el diametro ideal por el
metodo de Lamont.<br>
Cualquier diametro templado en agua tendra un temple efectivo.`
  return[mensajeDeVuelta,1]
}
}
}

function buscarDureza(mar50,conjuntoJD){

  for (let i = 0; i < conjuntoJD.length - 1; i++) {

    const anterior = conjuntoJD[i][1];
    const siguiente = conjuntoJD[i + 1][1];

    if (mar50 <= anterior && siguiente <= mar50 ) {

      return [anterior,siguiente,conjuntoJD[i][0],conjuntoJD[i+1][0]]
    }
  }
}

function interpolacion(x0, y0, x1, y1, x){
  return y0 + ((y1 - y0) / (x1 - x0)) * (x - x0);
}

function lamontMedioEnfriamiento(DistanciaJ){
  let H1 = (-0.8522 *DistanciaJ**2) + 4.4449 *DistanciaJ + 0.1399
  // let HInfinito = (-1.048 * DistanciaJ**2) + 4.8761 * DistanciaJ + 0.8007

  let HInfinito = (-0.9979 * DistanciaJ**2) + 4.764 * DistanciaJ + 0.809

  return [H1,HInfinito]
}
```