

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	30-09-2024	C
	Dependencia	Aprobado		Pág.
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA		SUBDIRECTOR ACADEMICO		1(1)

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Jorge Luis Quintero Tafur		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería mecánica		
DIRECTOR	Dr. Ricardo Andrés García León		
CODIRECTOR (si aplica)	No aplica		
TÍTULO DE LA TESIS	Evaluación de la resistencia al impacto (Charpy) en los aceros grado AISI (1045-1020-4140) aplicando tratamientos térmicos de temple y revenido para aplicaciones industriales		
TITULO EN INGLES	Impact resistance (Charpy) evaluation in AISI grade steels (1045-1020-4140) applying heat treatments of quenching and tempering for industrial applications		
RESUMEN (70 palabras)			
Este trabajo de investigación evaluó la influencia de los tratamientos térmicos de temple y revenido en la resistencia al impacto de los aceros AISI 1020, 1045 y 4140, mediante ensayos Charpy y simulaciones numéricas (FEA). También se caracterizaron las propiedades físicas, mecánicas y microestructurales de las muestras, identificando parámetros óptimos de temperatura y medio de enfriamiento. Los resultados demostraron que el tratamiento combinado de temple y revenido en el acero AISI 1045 mejora la tenacidad, logrando un equilibrio entre dureza y ductilidad, lo que favorece su desempeño en aplicaciones industriales exigentes que requieren alta resistencia al impacto.			
RESUMEN EN INGLES			
This research study evaluated the influence of quenching and tempering heat treatments on the impact resistance of AISI 1020, 1045, and 4140 steels through Charpy tests and numerical simulations (FEA). The physical, mechanical, and microstructural properties of the samples were also characterized, identifying optimal temperature and cooling medium parameters. The results exposed that the combined quenching and tempering treatment in AISI 1045 steel enhances toughness by achieving a balance between hardness and ductility, improving its performance in demanding industrial applications requiring high impact resistance.			
PALABRAS CLAVES	Aceros AISI, tratamientos térmicos, resistencia al impacto, ensayo Charpy, temple, revenido.		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	AISI steels, heat treatments, impact resistance, Charpy test, quenching, tempering.		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 104	PLANOS:	ILUSTRACIONES: 28	CD-ROM: 1



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
 Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88
 atencionalciudadano@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

Evaluación de la resistencia al impacto (Charpy) en los aceros grado AISI (1045-1020-4140) aplicando tratamientos térmicos de temple y revenido para aplicaciones industriales

Jorge Luis Quintero Tafur

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Mecánica

PhD. Ricardo Andrés García León

19 de agosto de 2025

Índice

	Pág.
Capítulo 1. Evaluación de la resistencia al impacto (Charpy) en los aceros grado AISI (1045-1020-4140) aplicando tratamientos térmicos de temple y revenido para aplicaciones industriales.	7
1.1. Planteamiento del problema.....	7
1.2. Formulación del problema	10
1.3. Objetivos	10
1.4. Justificación	11
1.5. Delimitaciones	13
Capítulo 2. Marco referencial	15
2.1. Marco histórico.	15
2.2. Marco conceptual.....	20
2.3 Marco teórico.	26
2.4. Marco legal.	40
Capítulo 3. Diseño metodológico	44
3.1 Tipo de investigación.....	44
3.2. Población y muestra.....	45
3.3. Diseño de instrumentación de la información y técnicas de análisis de datos.....	46
3.4. Análisis de información.	46
Capitulo 4. Resultados.	47

4.1 Identificar las propiedades físicas y mecánicas de los aceros grado AISI (1045, 1020 y 4140) utilizando diferentes bases de datos con la finalidad de establecer los parámetros de los tratamientos térmicos.	47
4.2 Determinar el efecto del tratamiento térmico de temple y revenido en la resistencia al impacto de los aceros grado AISI 1045, 1020 y 4140 mediante el ensayo de impacto Charpy, utilizando el software Statgraphics	52
4.3 Analizar el estado de esfuerzos generados durante el ensayo de impacto para los aceros grado AISI mediante simulación numérica (FEA) utilizando el software Solidworks.	77
5. Conclusiones	91
6. Recomendaciones	92
Referencias.....	93

Lista de tablas.

Tabla 1. Diseño de experimentos.....	46
Tabla 2. Matriz de análisis documental	48
Tabla 3. Propiedades físicas de los aceros 1020, 1045 y 4140	49
Tabla 4. Propiedades físicas y mecánicas de los aceros 1020, 1045 y 4140	50
Tabla 5. Parámetros para los tratamientos térmicos	52
Tabla 6. Especificaciones técnicas de máquina de impacto IT 406.....	58
Tabla 7. Valores de energía absorbida en Julios.....	59
Tabla 8. Diseño experimental	60
Tabla 9. Análisis de varianza para energía - Suma de cuadrados tipo III.....	62
Tabla 10. Medias por mínimos cuadrados	63
Tabla 11 Dureza de las probetas	65

Lista de figuras

Figura 1. Curvas de enfriamiento para tratamientos térmicos	26
Figura 2. Diagrama Hierro-carbono.....	27
Figura 3. Máquina de impacto Charpy	29
Figura 4. Diagrama de proceso para FEA.....	33
Figura 5. Zona de fractura.....	37
Figura 6. Modelo 3D de la probeta	54
Figura 7. Vista lateral de la probeta	54
Figura 8. Probetas mecanizadas	55
Figura 9. Programación del horno para el temple.....	57
Figura 10. Programación del horno para el revenido.....	57
Figura 11. Gráfico de medias.....	64
Figura 12. Microestructura AISI 1020 sin tratamiento térmico.....	66
Figura 13. Microestructura AISI 1020 con temple	67
Figura 14. Microestructura AISI 1045.....	69
Figura 15. Microestructura AISI 1045 con temple	70
Figura 16. Microestructura AISI 1045 con revenido	71
Figura 17. Microestructura AISI 4140.....	72
Figura 18. Microestructura AISI 4140 con temple	73
Figura 19. Microestructura AISI 4140 revenido.....	75
Figura 20. Gráfico de interacciones	77
Figura 21. Asignacion de material desde la biblioteca de materiales	78
Figura 22. Interfaz modulo de simulacion no lineal	80
Figura 23. Sujeciones de la probeta	81
Figura 24. Mallado y calidad de mayado.....	82
Figura 25. Antes y despues control mallado.....	83
Figura 26. Restricciones de geometria fija	86
Figura 27. Tensiones de vonMisses	88
Figura 28. Trazado de esplazamientos.....	89

Lista de apéndices

Apéndice A. Registro fotográfico – tratamientos térmicos	102
Apéndice b. Registro fotográfico – ensayos de impacto.....	103

Capítulo 1. Evaluación de la resistencia al impacto (Charpy) en los aceros grado AISI (1045-1020-4140) aplicando tratamientos térmicos de temple y revenido para aplicaciones industriales

1.1. Planteamiento del problema

La mejora de las propiedades mecánicas de los aceros tradicionales es un tema de creciente interés en el sector industrial. A lo largo de las décadas, los aceros han sido el pilar de la construcción, la automoción, y muchas otras industrias debido a su versatilidad, resistencia y costo relativamente bajo. Sin embargo, las exigencias actuales, como la necesidad de reducir el peso de los componentes, mejorar la resistencia al desgaste y aumentar la vida útil de las piezas, han impulsado la investigación en alternativas que permitan superar las limitaciones inherentes de los aceros convencionales (Macías-Delgado, 2019b).

Con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas de los aceros tradicionales de grado AISI, algunos autores han propuesto la aplicación de tratamientos térmicos de interfaces en un solo paso, lo que permite eliminar el proceso de revenido y su consecuente riesgo de fragilidad, esto permitiría mejorar sus propiedades mecánicas al punto de poder compararse con aceros avanzados de alta resistencia (Herrera et al., 2021). Considerando lo anterior, el acero AISI 4140 es ampliamente utilizados en la industria aeronáutica, automovilística y petrolera, debido a su sobresaliente desempeño mecánico en condiciones estáticas. Sin embargo, este acero es susceptible a la mejora de sus propiedades cuando es sometido a diferentes tratamientos térmicos, como el temple, revenido o nitruración, los cuales brindan la posibilidad de modificar

su microestructura, lo que resulta en el incremento de las propiedades mecánicas y físicas. Así lo afirma Solis Romero et al., (2024), quien además recomienda mayores tiempos durante los tratamientos térmicos para obtener mejores resultados en su microestructura (cambios microestructurales en la morfología del material).

Mejias M., Arruti R., Cepeda I., (2010), realizó el tratamiento térmico de envejecimiento a un acero inoxidable dúplex donde validó un aumento en el esfuerzo de ruptura, así como la reducción de la ductilidad del material a medida que el tratamiento térmico se prolonga. Además, los autores desarrollaron un tratamiento térmico posterior evidenciando el mecanismo de fractura frágil, contrario a lo ocurrido con las muestras en condiciones originales (sin tratamiento).

Para el acero AISI 1045, Santos & Vilca, (2020) determinó que al aplicar el tratamiento térmico de recocido, presenta una disminución en la resistencia a la tracción de alrededor 3%, como también una disminución en la dureza. Para el tratamiento térmico, los autores utilizaron temperaturas entre 850 °C a 900 °C, con tiempos de 30, 60 y 120 minutos, con un enfriamiento controlado hasta los 25°C en un tiempo de 10 horas. En tratamientos térmicos como el templeado, se requiere de un fluido como medio de enfriamiento, comúnmente suele utilizarse agua o aceite. En caso del aceite, los autores validaron la influencia de la viscosidad en la dureza superficial obtenida, dando como resultado que la mayor ganancia de dureza se obtiene al utilizar aceite 15W40, con temperaturas de temple de 790 y 850°C. Los autores recomiendan utilizar un equipo de agitación para garantizar un enfriamiento uniforme de las probetas (Cumbajin A. & Andrago A., 2022).

Otros autores enfatizan en los procesos de fabricación de los aceros, teniendo en cuenta que la elección del proceso más recomendado, el cual depende de la aplicación, como la profundidad de modificación de la superficie, la integridad del material y las propiedades mecánicas deseadas. Por ejemplo, el tratamiento de rectificado es ventajoso para obtener estructuras martensíticas finas y mejorar la dureza superficial, mientras que el mecanizado electroquímico (ECM) es ideal para lograr altas tasas de remoción de material sin introducir tensiones mecánicas o térmicas significativas en la pieza de trabajo, lo que resulta en una excelente calidad superficial (Borchers et al., 2020).

En este sentido, surge la problemática de que, sin la aplicación de tratamientos térmicos, estos aceros no alcanzan los niveles de absorción de energía requeridos para ciertas aplicaciones industriales críticas. Esto no solo limita su competitividad frente a materiales de mayor desempeño, sino que también incrementa la probabilidad de fallas prematuras en servicio, generando sobrecostos y riesgos operativos. Por lo tanto, resulta indispensable analizar y comparar el comportamiento de estos materiales antes y después de aplicar procesos como el temple y el revenido, con el fin de determinar la efectividad de dichos tratamientos en la mejora de su tenacidad.

Considerando lo anterior, el presente trabajo de investigación propone evaluar la influencia de los tratamientos térmicos de temple y revenido en la resistencia al impacto (tenacidad) de los aceros AISI 1045, 1020 y 4140, variando parámetros como velocidad y distancia de impacto, así como la modificación de la estructura cristalina por medio de la

aplicación de temperatura y medios de enfriamiento para los diferentes materiales, como lo sugiere Bohórquez, (2012).

1.2. Formulación del problema

Este trabajo plantea la siguiente pregunta, la cual será resuelta con el desarrollo de la investigación:

¿Cómo influyen los tratamientos térmicos de temple y recocido en la resistencia al impacto (Charpy) de los aceros AISI 1045, AISI 1020 y AISI 4140, y cuáles son los parámetros óptimos de tratamiento para maximizar la resistencia al impacto de los aceros para aplicaciones industriales?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la resistencia al impacto (Charpy) en acero grado AISI (1045, 1020 y 4140) aplicando los tratamientos térmicos de temple y revenido para aplicaciones industriales.

1.3.2. Objetivos específicos

Identificar las propiedades físicas y mecánicas de los aceros grado AISI (1045, 1020 y 4140) utilizando diferentes bases de datos con la finalidad de establecer los parámetros de los tratamientos térmicos.

Determinar el efecto del tratamiento térmico de temple y revenido en la resistencia al impacto de los aceros grado AISI 1045, 1020 y 4140 mediante el ensayo de impacto Charpy, utilizando el software Statgraphics.

Analizar el estado de esfuerzos generados durante el ensayo de impacto para ambos aceros grado AISI mediante simulación numérica (FEA) utilizando el software SolidWorks.

1.4. Justificación

El estudio de los tratamientos térmicos como el temple y el revenido en aceros de grado AISI (1045, 1020 y 4140) es fundamental para entender cómo estos procesos influyen en las propiedades mecánicas, específicamente en la resistencia al impacto (tenacidad). La resistencia al impacto es una propiedad crucial en muchas aplicaciones industriales, incluyendo la automoción, la industria aeroespacial y la fabricación de herramientas, donde los materiales están sujetos a cargas dinámicas y condiciones adversas que pueden generar fallas en los componentes mecánicos. Por lo tanto, comprender y optimizar estos tratamientos puede traducirse en mejoras significativas en la seguridad, rendimiento y vida útil de los componentes fabricados (Callister Jr. & Rethwisch, 2020).

Por otra parte, los aceros AISI 1045, 1020 y 4140 presentan composiciones químicas y microestructurales diferentes que afectan sus propiedades mecánicas debido a los tratamientos térmicos. Por ejemplo, el acero AISI 4140, con un contenido medio de carbono, es reconocido por su alta resistencia mecánica y dureza cuando es tratado térmicamente, haciéndolo ideal para aplicaciones en la industria automotriz y aeroespacial (Davis, 1993). Por otro lado, los aceros AISI 1045 y 1020, ofrecen diversas oportunidades para mejorar sus características mediante diferentes configuraciones experimentales en los parámetros del tratamiento térmico, como la temperatura, el tiempo de exposición y el medio de enfriamiento (Totten, 2013).

Por otra parte, diversos estudios han demostrado que los tratamientos térmicos adecuados dependen de la aplicación y el tipo de material, con lo cual se puede aumentar la resistencia al impacto de los materiales. Macías-Delgado, (2019a) discute que el temple y el recocido modifican la microestructura del acero, afectando la tenacidad y otras propiedades mecánicas críticas. En el caso de los aceros dúplex, Mejías M., Arruti R., (2010) observaron un aumento en el esfuerzo de ruptura tras un tratamiento térmico de envejecimiento, aunque a costa de una reducción en la ductilidad, lo cual sugiere que existe un equilibrio entre la dureza y la tenacidad que debe ser cuidadosamente evaluado dependiendo de la aplicación.

El presente estudio es relevante para el sector industrial debido a que permitió identificar los parámetros óptimos para cada tipo de acero AISI estudiado, optimizando su rendimiento en condiciones de impacto considerando diferentes tratamientos térmicos. Además, la integración de herramientas de simulación numérica como el análisis de elementos finitos (FEA) con datos experimentales ofrece un enfoque más profundo y predictivo en la evaluación de los tratamientos

térmicos, facilitando la toma de decisiones en aplicaciones industriales (Bouchard et al., 2022).

Por lo tanto, esta investigación no solo contribuyo al conocimiento académico sobre los tratamientos térmicos y la resistencia al impacto de los aceros, sino que también proporciono guías prácticas para la industria, mejorando la eficiencia y seguridad en la fabricación y uso de elementos mecánicos.

1.5. Delimitaciones

1.5.1. Geográfica

El actual proyecto de investigación se realizó utilizando el laboratorio de resistencia de materiales y sísmica para la realización del ensayo de impacto Charpy, el laboratorio de metales y aleaciones para analizar la microestructura de los aceros al aplicarle el tratamiento térmico de revenido-temple. Por otra parte, se realizó la búsqueda de información asesorada por el director de tesis, en la oficina del grupo de investigación INGAP, del semillero de investigación SIIST de la Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña.

1.5.2. Temporal

El trabajo comprende un periodo de 8 semanas del año en curso a partir de la fecha de aprobación del anteproyecto

1.5.3. Conceptual

El presente trabajo de investigación hace referencia a los conocimientos derivados de las asignaturas de ciencias de los materiales e ingeniería de los materiales. Estos conceptos se fundamentan en la tenacidad del material, es decir, la capacidad que este tiene para absorber energía antes de fracturarse. En este ensayo se puede determinar la tenacidad a la fractura del material, así como su comportamiento dúctil o frágil. Para ello se utilizarán los parámetros recomendados por la norma ASTM E23 para ensayos de péndulo Charpy con entalladura en v. También se evaluarán los efectos de los tratamientos térmicos de temple y revenido mediante el análisis de microestructura y dureza de los aceros utilizados en las probetas del ensayo.

1.5.4. Operativa

El desarrollo del proyecto se realiza en los laboratorios de metales y aleaciones, en el laboratorio de máquinas y herramientas, resistencia de materiales y sísmica, en la sala de cómputo de ingeniería mecánica, la biblioteca y en la oficina del grupo de investigación INGAP, del semillero de investigación SIIST, de la Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña.

Capítulo 2. Marco referencial

2.1. Marco histórico

La caracterización y optimización de materiales ha sido objeto de numerosos estudios científicos, abarcando diversos aspectos cruciales para la ingeniería de materiales. Estas investigaciones se han centrado en varios ejes fundamentales:

Caracterización integral de materiales. En la literatura científica se han realizado exhaustivos estudios sobre las propiedades mecánicas de los materiales, incluyendo resistencia, ductilidad, tenacidad y fatiga (J. R. Smith et al., 2022). Los investigadores han profundizado en la comprensión de la estructura interna de los materiales a nivel microscópico, utilizando técnicas avanzadas como microscopía electrónica y difracción de rayos X (Johnson, K. L. & Lee, 2021).

Mejora de propiedades mecánicas. En la literatura se han desarrollado diversas estrategias para potenciar las características mecánicas de los materiales, tales como: tratamientos térmicos optimizados, adición de aleantes específicos, procesamiento termo mecánico controlado. Estos métodos han demostrado ser efectivos en la mejora de las propiedades mecánicas de diversos materiales (García-Rodríguez et al., 2023).

Modelación y simulación avanzada. Los científicos han creado modelos matemáticos sofisticados y simulaciones por computadora para predecir y analizar el comportamiento de los materiales bajo diversas condiciones, con especial énfasis en: respuesta a cargas dinámicas,

comportamiento a altas temperaturas, fenómenos de fatiga y fractura. Estas simulaciones han permitido un diseño más eficiente y una mejor comprensión de los materiales en condiciones extremas (Zhang, L. & Patel, 2024).

Recientes investigaciones han demostrado la viabilidad sobre la relación entre la microestructura y el comportamiento mecánico y endurecimiento por deformación en aleaciones avanzadas (Nakamura et al., 2023)(García-León et al., 2024). Estos avances en la investigación de materiales han permitido el desarrollo de nuevos materiales con propiedades mejoradas y han optimizado los procesos de diseño y fabricación en diversas industrias, desde la aeroespacial hasta la biomédica (Thompson, 2022).

2.1.1. Antecedentes internacionales

El desarrollo de tratamientos térmicos en aceros se ha investigado extensamente a nivel internacional debido a la importancia de mejorar sus propiedades mecánicas para diversas aplicaciones industriales. Por ejemplo, investigaciones realizadas en Europa han enfocado sus esfuerzos en el estudio de la optimización de procesos de temple en aceros de alta resistencia, mejorando la resistencia al desgaste en componentes automotrices (Borchers et al., 2020). En Japón, los estudios han dirigido su atención hacia los aceros inoxidables, particularmente el AISI 304, para mejorar la resistencia a la corrosión y la ductilidad mediante tratamientos térmicos controlados (Sato, T. & Kokubo, 2016). En Estados Unidos, el enfoque ha estado en la simulación de los procesos de tratamiento térmico para predecir el comportamiento de los

materiales bajo condiciones extremas, optimizando el uso de simulación numérica (FEA) para evaluar la resistencia al impacto (Bouchard, P. et al., 2022).

Sharma et al., (2021) desarrollaron un estudio comprehensivo sobre la influencia de los parámetros de temple en aceros AISI 4140, encontrando que temperaturas de austenización entre 850-870°C, combinadas con medios de enfriamiento con bajo choque térmico durante el proceso, lo cual proporciona la mejor combinación de resistencia al impacto y dureza.

En Alemania, el instituto Fraunhofer realizó investigaciones pioneras sobre tratamientos térmicos intercríticos. Weber, H. & Schmidt, (2023) documentaron mejoras de hasta 45% en la resistencia al impacto de aceros AISI 304 mediante ciclos térmicos controlados que promovieron la formación de austenita revertida, los resultados demostraron que:

- Temperaturas intercríticas: 750-780°C
- Tiempo de sostenimiento: 30-45 minutos
- Velocidad de enfriamiento: 15-20 °C/s

En Japón, Tanaka et al., (2022) desarrollaron una metodología innovadora para el control microestructural durante el recocido de aceros inoxidables, logrando incrementos significativos en la ductilidad sin comprometer la resistencia mecánica.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En Colombia, la investigación en tratamientos térmicos ha ganado relevancia en la última década. El grupo de investigación en Materiales Avanzados de la Universidad Nacional de Colombia desarrolló estudios significativos sobre la optimización de tratamientos térmicos para aceros de fabricación nacional. Ramírez, J. & Gómez, (2023) investigaron el efecto de diferentes medios de temple en aceros AISI 1020 producidos en la región andina, encontrando particularidades en la respuesta al tratamiento debido a las variaciones en la composición de elementos residuales.

La Universidad Industrial de Santander, a través de su centro de caracterización de materiales, ha realizado importantes contribuciones en el campo de los tratamientos térmicos. Martínez et al., (2024) estudiaron la influencia de la atmósfera de tratamiento en la formación de capas de óxido durante el recocido de aceros AISI 304, estableciendo parámetros óptimos para minimizar la degradación superficial:

- Contenido de oxígeno: < 50 ppm
- Punto de rocío: -40°C
- Velocidad de calentamiento: 200°C/h

La investigación en tratamientos térmicos ha estado orientada a la industria manufacturera y de la construcción, con estudios que abordan la mejora de la resistencia al impacto de los aceros al carbono. La Universidad Nacional de Colombia ha realizado investigaciones sobre el recocido y temple en aceros AISI 1020, obteniendo mejoras

significativas en su tenacidad al modificar los parámetros de enfriamiento (Hernández, C. & González, 2018). En la Universidad del Valle, se han explorado tratamientos térmicos en aceros inoxidables para aplicaciones petroquímicas, encontrando que el uso de medios de enfriamiento no convencionales, como aceites de alta viscosidad, mejora la dureza superficial sin comprometer la ductilidad (Mejía, F. & Rodríguez, 2017).

Estos antecedentes resaltan la importancia de continuar con la investigación en tratamientos térmicos en el contexto nacional e internacional, ya que permiten obtener materiales con mejores propiedades mecánicas, adaptados a las necesidades industriales actuales.

2.1.3. Antecedentes a nivel regional

En Ocaña, Angarita A. & Castilla P., (2023) llevaron a cabo un estudio para evaluar el comportamiento mecánico y microestructural de los aceros AISI 304 y 1045, sometiéndolos a endurecimiento por deformación plástica y a tratamientos térmicos como el temple y el recocido. Los resultados mostraron que el tratamiento térmico de recocido disminuyó la dureza en ambos aceros, AISI 304 y 1045, favoreciendo una microestructura más dúctil. En comparación con el tratamiento de temple, se logró un incremento significativo de la dureza del acero AISI 1045, debido a la formación de martensita, lo que mejora su resistencia, pero puede reducir su tenacidad. Adicionalmente los autores implementaron el uso de simulaciones virtuales en SolidWorks, demostrando como una herramienta eficaz para replicar ensayos de tensión, con la simulación por elementos finitos proporcionando resultados que se aproximan fielmente al comportamiento real del material bajo cargas mecánicas. Esto es especialmente valioso para el

diseño y análisis estructural en diversas aplicaciones industriales, permitiendo optimizar procesos y materiales con base en datos predictivos y simulaciones precisas.

2.2. Marco conceptual

En el campo de los materiales de ingeniería, el ensayo de impacto Charpy es una prueba fundamental para evaluar la tenacidad de los materiales, es decir, su capacidad de absorber energía antes de fracturarse (Callister Jr. & Rethwisch, 2020). Este ensayo consiste en romper una probeta con entalla en V mediante el impacto de un péndulo, midiendo la energía absorbida por el material durante el proceso de fractura. Esta prueba permite determinar si un material se comporta de manera dúctil o frágil bajo condiciones de carga dinámica (ASTM E23-18, 2018).

Con la finalidad de facilitar la comprensión de la investigación se hace necesario definir algunos conceptos relevantes para la investigación.

2.2.1. Conceptos relevantes para la investigación.

2.2.1.1. Ensayo charpy. El ensayo Charpy es una prueba de impacto ampliamente utilizada para evaluar la resistencia de materiales frente a cargas dinámicas. Consiste en una muestra entallada que se somete al impacto de un péndulo, midiendo la energía absorbida durante la fractura (Callister Jr. & Rethwisch, 2020). Este ensayo es fundamental en la ingeniería de materiales, especialmente en la selección de materiales para aplicaciones donde las cargas de impacto son críticas.

2.2.1.2. Máquina de impacto charpy. Una máquina para ensayos Charpy es un dispositivo diseñado para evaluar la tenacidad al impacto de materiales mediante la medición de la energía absorbida por una probeta con muesca al fracturarse. Estas máquinas suelen operar mediante un péndulo que impacta la muestra con una energía específica, mientras un sistema de medición registra la cantidad de energía absorbida durante la fractura. Están diseñadas conforme a normas internacionales como la ASTM E23 e ISO 148, que especifican las dimensiones de la probeta, las características del péndulo y los procedimientos del ensayo. El objetivo es determinar la capacidad de un material para resistir fracturas bajo condiciones de impacto (Krause et al., 2017).

2.2.1.3. Masa pendular. La masa pendular es un componente clave en el ensayo de impacto Charpy, y su peso afecta directamente la cantidad de energía transferida a la muestra durante el impacto. El peso del péndulo debe seleccionarse de acuerdo con la resistencia esperada del material evaluado, y junto con la altura de caída, determina la energía potencial inicial disponible para fracturar la muestra (Davis, 2004).

2.2.1.4. Energía absorbida. En el contexto del ensayo Charpy, la energía absorbida es la cantidad de energía transferida desde el péndulo a la muestra hasta su fractura completa. Este valor es un indicador directo de la tenacidad de un material, pues muestra la capacidad de absorber energía sin fallar catastróficamente (ASTM International, 2017).

2.2.1.5. Velocidad de impacto. La velocidad de impacto es la rapidez con la que el péndulo golpea la muestra en el ensayo de impacto. Esta velocidad, combinada con la masa del

péndulo, determina la energía cinética disponible. La velocidad de impacto influye en el modo de fractura del material, ya que una velocidad alta tiende a inducir fracturas frágiles (Dieter, 2012).

2.2.1.6. Tenacidad. La tenacidad es la capacidad de un material para absorber energía antes de la fractura. Es una propiedad crítica en aplicaciones donde se requiere resistencia a fallos bruscos y se evalúa mediante ensayos de impacto como el Charpy, entre otros (Rethwisch & Callister, 2018).

2.2.1.7 Ductilidad. La ductilidad mide la capacidad de un material para deformarse plásticamente antes de romperse. Los materiales dúctiles, como ciertos aceros, pueden absorber deformación significativa sin fracturarse, lo que es ventajoso en aplicaciones donde se necesita resistencia a la fractura (Shackelford, 2015).

2.2.1.8 Fractura. La fractura es el proceso de separación de un material en dos o más partes cuando se le aplica una carga que supera su resistencia. Este fenómeno implica la formación y propagación de grietas dentro del material, lo cual puede resultar en una falla catastrófica, especialmente en materiales con baja tenacidad o expuestos a condiciones críticas (Anderson, 2017).

2.2.1.8.1 Tipos de Fractura. Los tipos de fractura en los materiales generalmente se clasifican en dos categorías principales: dúctil y frágil. La fractura dúctil implica una deformación plástica significativa antes de que ocurra la ruptura, y es común en materiales que pueden absorber energía a través de deformación. Por otro lado, la fractura frágil se caracteriza

por una falta de deformación plástica visible y ocurre de manera súbita y catastrófica, lo cual es común en materiales más duros y menos dúctiles, especialmente a bajas temperaturas (Anderson, 2017).

2.2.1.9 Resiliencia. La resiliencia es la capacidad de un material para recuperar su forma original después de ser deformado elásticamente, y se relaciona con la energía almacenada en la deformación elástica. Aunque no es lo mismo que la tenacidad, está vinculada con la capacidad del material para resistir impactos sin fracturarse (Budynas, R. G. & Nisbett, 2011).

2.2.1.10 Curva de transición dúctil-frágil. La curva de transición dúctil-frágil muestra la variación de la tenacidad de impacto en función de la temperatura. A temperaturas bajas, muchos materiales muestran un comportamiento frágil, mientras que a temperaturas altas presentan un comportamiento más dúctil. Esta curva es especialmente importante para materiales como el acero, que experimentan cambios notables en su comportamiento en función de la temperatura (Dieter, 2012).

2.2.1.11 Fractografía. La fractografía es el estudio de las superficies de fractura de un material para determinar las causas y el tipo de fractura que ocurrió. A través de un análisis fractográfico, se pueden identificar características como patrones de fractura, modos de fallo y posibles defectos internos que contribuyeron a la fractura (ASM, 2002).

2.2.1.12 Microestructura. La microestructura de un material describe su organización interna, incluyendo el tamaño de grano, fases presentes y la distribución de los componentes. En

los aceros, la microestructura depende de su composición química y de los tratamientos térmicos aplicados, lo cual afecta directamente propiedades como dureza, tenacidad y ductilidad (W. F. Smith, 2011).

2.2.1.13. Escala de dureza. La dureza es la resistencia de un material a la deformación permanente y se mide utilizando escalas como Rockwell, Brinell y Vickers. Estas escalas permiten clasificar los materiales en función de su capacidad para resistir rayaduras, indentación y otros tipos de desgaste superficial (Shackelford, 2015).

2.2.1.14. Composición química. La composición química de un material determina sus propiedades fundamentales y su capacidad para responder a tratamientos térmicos y mecánicos. En aceros, los elementos de aleación como el carbono, manganeso y cromo son críticos, ya que modifican propiedades como la dureza, la resistencia a la corrosión y la tenacidad (Rethwisch & Callister, 2018).

2.2.1.15 Tratamientos térmicos. Los tratamientos térmicos son procesos controlados de calentamiento y enfriamiento aplicados a los materiales, especialmente a los metales, para modificar sus propiedades mecánicas y microestructurales. Estos tratamientos permiten optimizar características como la dureza, tenacidad, ductilidad y resistencia al desgaste de un material, adecuándolo para aplicaciones específicas. Los tratamientos térmicos son fundamentales en la ingeniería de materiales, ya que permiten adaptar los metales a diversas condiciones de servicio (Davis, 2004).

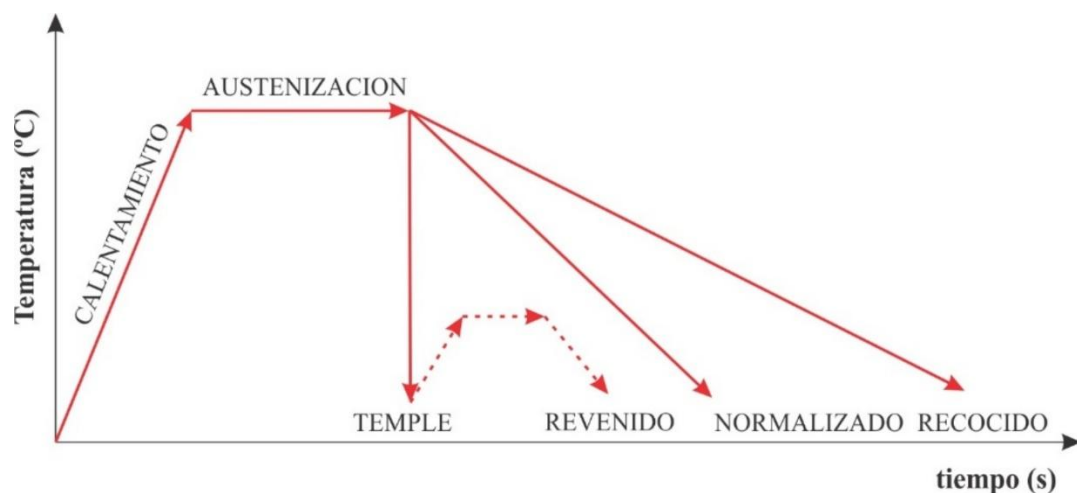
2.2.1.16 Temple. El temple es un tipo de tratamiento térmico que implica calentar un material, generalmente acero, a una temperatura específica y luego enfriarlo rápidamente, típicamente en agua o aceite. Este proceso genera una microestructura dura y resistente debido a la formación de martensita, una fase microestructural que aumenta la dureza y la resistencia mecánica del material. Sin embargo, el temple también puede incrementar la fragilidad del acero, lo que en ocasiones requiere un tratamiento posterior como el revenido (Rethwisch & Callister, 2018).

2.2.1.17 Recocido. El recocido es un tratamiento térmico que consiste en calentar el material a una temperatura elevada, mantenerlo en esa temperatura durante un período específico y luego enfriarlo lentamente, generalmente en un horno. Este proceso reduce la dureza del material y aumenta su ductilidad, facilitando su posterior mecanizado o deformación plástica. El recocido también ayuda a aliviar tensiones internas y a refinar la microestructura, mejorando la homogeneidad del material (W. F. Smith, 2011).

En la Figura 1 se ilustran los diferentes tratamientos térmicos aplicados a aceros de grado AISI, destacando su relación con la temperatura y los tiempos de enfriamiento. Se observa una marcada diferencia en los tiempos de enfriamiento entre los tratamientos de temple y recocido. Mientras que el temple requiere un enfriamiento rápido para inducir transformaciones en la microestructura que aumenten la dureza, el recocido se caracteriza por un enfriamiento más lento, diseñado para aliviar tensiones internas y mejorar la ductilidad del material. Esta comparación subraya la influencia crítica del control térmico en las propiedades finales del acero.

Figura 1.

Curvas de enfriamiento para tratamientos térmicos.



Nota. Imagen tomada de (Grupo.us.es, 2024)

2.3 Marco teórico

2.3.1 Clasificación de los materiales y propiedades mecánicas

El área de estudio de la ciencia e ingeniería de los materiales permite clasificar los materiales en diferentes categorías según sus propiedades físicas, mecánicas y su comportamiento bajo diversas condiciones. Los materiales metálicos, cerámicos, polímeros y compuestos presentan propiedades distintas que los hacen adecuados para aplicaciones específicas. En el caso de los aceros, su clasificación se realiza en función de su composición química y tratamiento térmico, aspectos que influyen en su resistencia, ductilidad, dureza y otras propiedades críticas para el diseño mecánico (Smith, 2011). Los aceros grado AISI 1045, 1020 y 4140 son conocidos por su versatilidad en aplicaciones industriales, destacándose por su

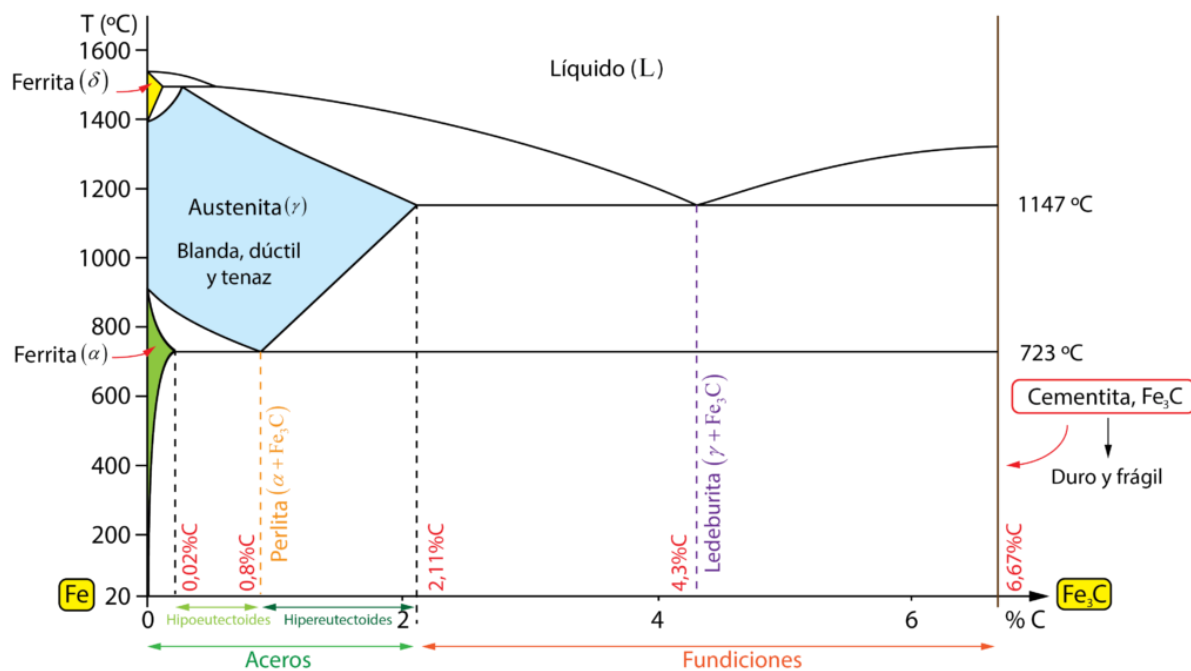
resistencia a la corrosión, maleabilidad y alta dureza, respectivamente (Callister & Rethwisch, 2018).

2.3.1.1 Diagrama de hierro-carbono y microestructura de los aceros AISI

El diagrama de hierro-carbono (figura 2) es fundamental para comprender las fases microestructurales de los aceros y su relación con la temperatura y el contenido de carbono.

Figura 2.

Diagrama Hierro-carbono



Nota. Imagen tomada de (Ingeniosos, 2024).

Este diagrama muestra las transiciones de fases, como la austenita, ferrita y cementita, así como las transformaciones que ocurren durante los tratamientos térmicos. La presencia de fases

como martensita o perlita afecta directamente las propiedades mecánicas y la resistencia al impacto de los aceros tratados (Dieter, 2012). Los aceros seleccionados tienen composiciones que permiten diversas transformaciones bajo tratamientos de temple y recocido, optimizando sus propiedades para aplicaciones industriales (Smith, 2011).

2.3.2 Resistencia de materiales y comportamiento al impacto

La resistencia de materiales estudia cómo los materiales soportan cargas externas sin experimentar fallas. En aplicaciones industriales, es crucial que los materiales tengan alta resistencia al impacto y buena tenacidad, especialmente en condiciones de trabajo extremas. Los ensayos de impacto, como el Charpy, son métodos clave para medir la capacidad de un material para absorber energía en situaciones de impacto (Budynas & Nisbett, 2011).

2.3.3 Ensayo de impacto charpy y máquinas de ensayo

El ensayo Charpy es una técnica estandarizada para medir la tenacidad mediante el impacto de un péndulo en una muestra entallada. Las máquinas de ensayo Charpy están diseñadas para aplicar un impacto controlado y medir la energía absorbida por el material hasta la fractura. Este ensayo es esencial para evaluar la transición dúctil-frágil y determinar la viabilidad de los aceros tratados en aplicaciones específicas (ASTM International, 2017).

Figura 3.

Máquina de impacto Charpy.



Nota. Laboratorio de resistencia de materiales y sísmica.

2.3.4 Métodos de análisis en el ensayo charpy

Los métodos de análisis incluyen la medición de la energía absorbida, la fractografía de la superficie de fractura y el análisis microestructural. Estos datos permiten caracterizar el comportamiento del material bajo impacto, diferenciando fracturas dúctiles de frágiles. El uso de microscopía electrónica y óptica es clave para identificar características microestructurales como tamaño de grano y fases presentes tras los tratamientos térmicos (ASM International, 2002).

2.3.5 Tratamientos térmicos: temple y revenido

El temple consiste en calentar el acero a una temperatura alta seguido de un enfriamiento rápido, lo cual forma martensita, una fase que incrementa la dureza, pero puede reducir la tenacidad. Por otro lado, el revenido implica un enfriamiento lento, generando estructuras más homogéneas que aumentan la ductilidad y alivian tensiones internas (Callister & Rethwisch, 2018; Davis, 2004).

2.3.6 Diagramas TTT y CCT de los aceros AISI 1020, 1045 y 4140.

Los diagramas de Transformación Isotérmica (TTT) y de Enfriamiento Continuo (CCT) constituyen la base gráfica para predecir la microestructura resultante tras cualquier tratamiento térmico. En los aceros hipoeutectoides (AISI 1020) y medio carbono (AISI 1045), la posición relativa de las curvas de perlita y bainita determina la temperatura mínima de austenización y el medio de temple apropiado, mientras que en los aceros aleados (AISI 4140) el contenido de Cr-Mo desplaza la “nariz” de la bainita hacia la derecha, ampliando la ventana de temple y reduciendo la severidad de enfriamiento requerida. (Elmer, J. W., Palmer, T. A., & Babu, 2004) demostraron que, para el AISI 1045, un enfriamiento superior a $60\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$ evita la formación de martensita, mientras que los modelos cinéticos de (Varela-Castro, G., Cabrera, J.-M., & Prado, 2020) permiten extrapolar estos límites a otros contenidos de carbono.

2.3.7 Curva de transición dúctil-frágil en aceros AISI

La curva de transición dúctil-frágil muestra cómo varía la tenacidad de los aceros con la temperatura. A bajas temperaturas, los aceros tienden a fracturarse de manera frágil, mientras que a temperaturas más altas presentan fracturas dúctiles. Este análisis es crucial para materiales usados en ambientes extremos donde las fluctuaciones de temperatura afectan su rendimiento (Dieter, 2012).

2.3.8 Modelos de correlación dureza-tenacidad

La energía absorbida en el ensayo Charpy no solo depende de la microestructura sino también de la dureza lograda tras el tratamiento térmico. Correlaciones empíricas, como la de Rolfe-Novak-Barsom, relacionan la dureza Rockwell (HRC) y la energía Charpy (J) con un coeficiente de forma que integra la temperatura de ensayo. (Wallin, 2021) revisó críticamente la validez de esta correlación para aceros de alta resistencia, encontrando un error medio inferior al 10 % en la región “upper-shelf”. Estudios más recientes sobre soldaduras estructurales confirman que, para energías superiores a 80 J, la dureza HRC puede predecirse con una desviación estándar de ± 2 puntos.

2.3.9 Efecto de la temperatura en el comportamiento mecánico de los aceros

La temperatura influye en la movilidad de los defectos cristalinos, lo que afecta propiedades como la ductilidad y la resistencia. A altas temperaturas, los aceros tienden a ser más dúctiles, mientras que a bajas temperaturas su comportamiento se vuelve más frágil, un aspecto evaluado en el ensayo Charpy (Callister & Rethwisch, 2018).

2.3.10 Fundamentos de fractomecánica lineal elástica y su vínculo con el ensayo Charpy

El criterio de tenacidad a la fractura K_{IC} se define bajo condiciones de deformación plana y lineal, mientras que el ensayo Charpy introduce flexión multi-eje. Diversas investigaciones han propuesto factores de conversión basados en la temperatura de transición dúctil-frágil y en la energía absorbida. (Jackson, 2009) indica que, para aceros al carbono de grano fino, una energía Charpy de 27 J corresponde aproximadamente a $50 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ de K_{IC} .

2.3.11 Efectos residuales de los tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos generan tensiones residuales que pueden influir en la resistencia a la fatiga y al impacto. Estas tensiones, que se generan durante el enfriamiento, afectan la durabilidad del material y deben controlarse mediante técnicas avanzadas como la difracción de rayos X (Davis, 2004).

2.3.12 Técnicas avanzadas de caracterización microestructural (SEM, EBSD y DRX)

La identificación cuantitativa de fases exige combinar microscopía electrónica de barrido (SEM) con difracción de electrones retro dispersados (EBSD) y difracción de rayos X (DRX). (Randle, 2009) detalla estrategias de adquisición y “clean-up” que permiten obtener mapas de orientación con precisión angular $<0,5^\circ$, mientras que (Procter et al., 2024) demuestran la capacidad de EBSD para revelar texturas heredadas tras procesos de temple y revenido. Para la

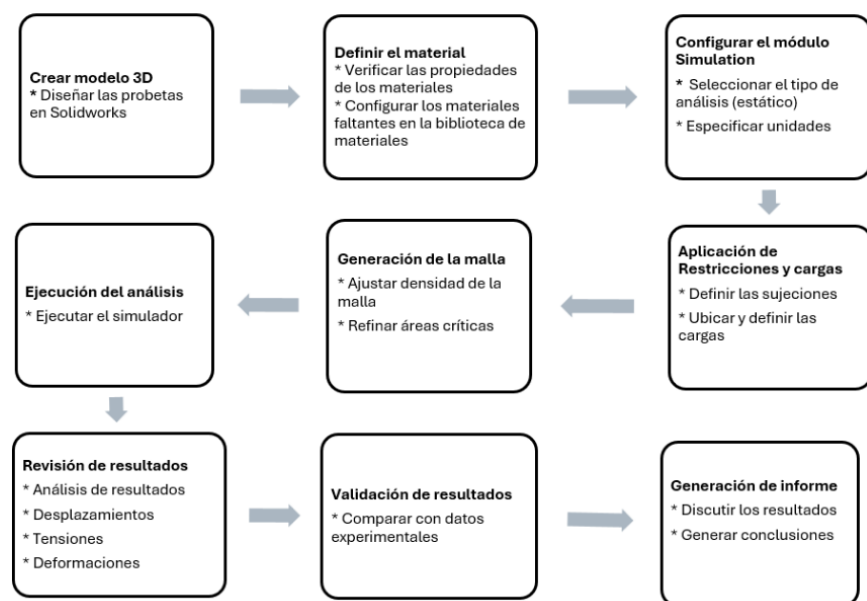
fase martensítica, la DRX en modo Bragg-Brentano permite diferenciar picos $(110)\alpha'$ y $(200)\alpha'$, cuantificando el porcentaje retenido de austenita.

2.3.13 Simulación por elementos finitos en el ensayo charpy

La simulación por elementos finitos (FEA) permite modelar la respuesta del material al impacto, simulando variables como la geometría de la muestra y las condiciones de carga. Esto complementa los ensayos experimentales y optimiza los diseños industriales basados en aceros tratados térmicamente (Budynas & Nisbett, 2011). En la figura 4 se ilustra mediante un diagrama de procesos como se llevó cabo el análisis de elementos finitos para su posterior contraste con los resultados experimentales.

Figura 4.

Diagrama de proceso para FEA.



Nota. Proceso para crear un análisis de elementos finitos.

Las simulaciones explícitas incorporan leyes constitutivas dependientes de la velocidad de deformación. El modelo Johnson-Cook, propuesto originalmente para grandes deformaciones y altas tasas de esfuerzo (Johnson & Cook, 1983), continúa siendo el estándar para impactos transitorios. Kori et al. (2025) validaron la capacidad predictiva del modelo en una probeta Charpy de acero Q&P, reportando un error <5 % entre energía simulada y experimental.

2.3.14 Diseño de experimentos factorial completo y análisis ANOVA

El empleo de un diseño factorial 2^3 —material (AISI 1020, 1045, 4140) $\times$ tratamiento (temple, revenido, normalizado) $\times$ medio de enfriamiento (agua, aceite)—permite estimar efectos principales e interacciones con un mínimo de ocho corridas base. (Box, G. E. P., Hunter, J. S., & Hunter, 2005) recomiendan este esquema cuando se espera interacción de segundo orden. En ensayos de post - soldadura sobre aceros 12Cr-1Mo, el diseño 2^3 redujo en 25 % la varianza residual y mejoró el poder predictivo del modelo. El análisis ANOVA y las pruebas de normalidad de residuos garantizarán la robustez estadística de los resultados Charpy.

2.3.15 Comparación entre ensayos charpy e izod

Aunque el ensayo Charpy es el más utilizado, el ensayo Izod también mide la resistencia al impacto, con diferencias clave en la orientación de la muestra y la posición del impacto. Esta comparación ayuda a entender por qué el Charpy es preferido en aplicaciones industriales (ASTM International, 2017).

2.3.16 Aplicaciones industriales de los aceros tratados

Los aceros AISI tratados térmicamente tienen aplicaciones específicas en la industria. Por ejemplo, el AISI 4140 es usado en componentes de alta resistencia como engranajes y ejes, mientras que el AISI 304 es ideal para ambientes corrosivos en las industrias alimentaria y química (Callister & Rethwisch, 2018).

2.3.17 Impacto ambiental y sostenibilidad de los tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos consumen grandes cantidades de energía y generan emisiones. La implementación de hornos eficientes y el desarrollo de técnicas alternativas como el endurecimiento por láser son estrategias sostenibles que pueden minimizar el impacto ambiental (Davis, 2004).

2.3.18 Relación entre tenacidad y ductilidad

La tenacidad y la ductilidad son propiedades relacionadas pero distintas. La ductilidad mide la capacidad de un material para deformarse plásticamente antes de romperse, mientras que la tenacidad se refiere a la capacidad del material para absorber energía antes de fracturarse, incluyendo tanto deformación plástica como elástica. Los tratamientos térmicos, como el temple y el revenido, equilibran estas propiedades, mejorando la tenacidad al modificar la microestructura del acero, especialmente en aplicaciones donde el impacto es crítico (Callister & Rethwisch, 2018).

2.3.19 Influencia de la composición química en el comportamiento al impacto

La composición química es un factor determinante en las propiedades mecánicas de los aceros. Por ejemplo, el carbono influye directamente en la dureza y la capacidad de formación de martensita durante el temple, mientras que elementos como el cromo y níquel mejoran la resistencia a la corrosión y estabilidad de fases en el AISI 304. La presencia de manganeso y molibdeno en el AISI 4140 contribuye a una mayor resistencia al desgaste y tenacidad en condiciones de alta carga (Smith, 2011; Shackelford, 2015).

La composición química del acero influye significativamente en las condiciones requeridas para los tratamientos térmicos, como el temple. Por ejemplo, el acero AISI 1020, que se caracteriza por su bajo contenido de carbono (aproximadamente 0.18-0.20 %), tiene una temperatura de temple recomendada entre 760 y 800 °C. Esta baja concentración de carbono limita la formación de martensita durante el enfriamiento, lo que resulta en propiedades mecánicas moderadas y una mayor ductilidad (Totten, 2018). En contraste, el acero AISI 4140, una aleación de acero de mediano contenido de carbono con aproximadamente 0.40 % de carbono y elementos como cromo y molibdeno, requiere temperaturas de temple más altas, con un valor mínimo recomendado de 830 °C, para garantizar una transformación efectiva de su microestructura y maximizar su resistencia mecánica y dureza (ASM International., 2013).

Estas diferencias reflejan la relación directa entre la composición química de los aceros y las temperaturas necesarias para los tratamientos térmicos, destacando la importancia de ajustar los parámetros del proceso según el material para lograr las propiedades deseadas. El carbono,

como principal elemento endurecedor, junto con los elementos de aleación, define las temperaturas críticas para los procesos de austenización y temple (Callister, W. D. & Rethwisch, 2018).

2.3.20 Evaluación de fractografía y modos de fractura

La fractografía es el estudio de las superficies de fractura para identificar el modo de fallo y las condiciones que llevaron a la fractura. Los modos principales incluyen fractura dúctil, caracterizada por cavidades y estrías, y fractura frágil, con superficies brillantes y patrones de clivaje. La fractura dúctil suele asociarse a alta absorción de energía, mientras que la fractura frágil ocurre con menor absorción, y es más común en temperaturas bajas o materiales mal tratados térmicamente (ASM International, 2002).

Figura 5.

Zona de fractura.



Nota. Imagen tomada de (Proaño Sánchez, 2018)

2.3.21 Comparativa entre Aceros AISI 1045, 1020 y 4140

Los aceros estudiados en esta investigación presentan diferencias significativas:

- AISI 1045: acero de medio contenido de carbono ($\approx 0,45\%$), capaz de alcanzar buenas combinaciones de resistencia y dureza tras ciclos de temple y revenido moderados. Presenta mayor límite de fluencia y resistencia a la fatiga que el AISI 1020, lo que lo hace idóneo para ejes, cigüeñales y engranajes sometidos a cargas dinámicas.
- AISI 1020: un acero de bajo contenido de carbono, con buena ductilidad y facilidad de mecanizado. Es adecuado para aplicaciones que requieren maleabilidad.
- AISI 4140: un acero de aleación media, con alta resistencia al desgaste y capacidad de endurecimiento. Es preferido para componentes sometidos a alta carga, como engranajes y ejes (Callister & Rethwisch, 2018; Smith, 2011).

2.3.22 Propiedades mecánicas de los aceros tratados térmicamente

Los tratamientos térmicos modifican las propiedades fundamentales de los aceros:

- Temple: incrementa la dureza y la resistencia al desgaste mediante la formación de martensita.
- Revenido: mejora la ductilidad y alivia tensiones internas, aumentando la tenacidad y reduciendo la probabilidad de fracturas frágiles.

Estos cambios son críticos en aplicaciones industriales, donde las propiedades mecánicas deben ser optimizadas según los requerimientos específicos (Budynas & Nisbett, 2011).

2.3.23 Modelos matemáticos para el ensayo de impacto

Los modelos matemáticos son útiles para predecir y analizar los resultados del ensayo Charpy. Las ecuaciones de Ramberg-Osgood permiten relacionar la tensión con la deformación en materiales metálicos, mientras que las simulaciones computacionales por elementos finitos ofrecen una visión más detallada de cómo se distribuyen las tensiones y deformaciones durante el impacto (Budynas & Nisbett, 2011).

La ecuación 1 que rige el modelo de Ramberg-Osgood, la cual se presenta a continuación:

$$\varepsilon = E \times \sigma + \alpha \times \left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \quad Ec. 1$$

Donde:

ε : Deformación total.

σ : Tensión aplicada.

E: Módulo de elasticidad (módulo de Young), representa el comportamiento elástico.

α : Coeficiente relacionado con la resistencia del material.

n: Exponente de endurecimiento por deformación, que describe la relación entre tensión y deformación plástica.

2.3.24 Tendencias y desafíos en el uso de tratamientos térmicos

Aunque los tratamientos térmicos han sido usados ampliamente, nuevos desarrollos buscan mejorar su eficiencia energética y reducir su impacto ambiental. Entre estas innovaciones destacan:

- Uso de hornos más eficientes.
- Tratamientos por inducción y láser.
- Modelos computacionales para optimizar parámetros de tratamiento (Davis, 2004).

2.4. Marco legal

El presente trabajo de investigación se rige por un conjunto de normas, estándares y regulaciones tanto nacionales como internacionales que garantizan la calidad, reproducibilidad y seguridad de los procedimientos experimentales realizados.

2.4.1. Normas técnicas internacionales

Normas ASTM (American Society for Testing and Materials)

ASTM E23-18: "Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials"

Especifica los métodos estandarizados para realizar ensayos de impacto Charpy y Izod en materiales metálicos utilizando barras entalladas. El objetivo es evaluar la tenacidad o resistencia al impacto de los materiales midiendo la energía absorbida por una muestra entallada al ser golpeada por un péndulo.

Para las probetas a utilizar, esta norma define las geometrías estándar (55 x 10 x 10 mm, entalla de 45°) y tolerancias de maquinado.

ASTM A255-20: "Standard test methods for determining hardenability of steel"

Define los métodos para determinar la templabilidad del acero, es decir, la capacidad del material para endurecerse mediante tratamientos térmicos. Incluye pruebas como el ensayo de Jominy, que mide la dureza en una muestra de acero enfriada desde un extremo.

ASTM E3-11(2017): "standard guide for preparation of metallographic specimens"

Proporciona una guía para la preparación de muestras metalográficas, que incluye el corte, montaje, pulido y ataque químico de materiales metálicos para el examen microscópico de su microestructura.

Normas ISO (international organization for standardization)

ISO 148-1:2016: "Metallic materials — Charpy pendulum impact test"

Establece los requisitos para el ensayo de impacto con péndulo Charpy en materiales metálicos, determinando la tenacidad de los materiales a temperaturas específicas. Es similar a la norma ASTM E23, pero con especificaciones internacionales.

ISO 6508-1:2016: "Metallic materials — Rockwell hardness test"

Describe el método para realizar ensayos de dureza Rockwell en materiales metálicos, midiendo la profundidad de penetración de un indentador bajo una carga específica. Es una técnica comúnmente usada para evaluar la dureza de diferentes metales.

2.4.2. Normas Técnicas Colombianas (NTC)

NTC 3353:1997: "Siderurgia. definiciones y métodos de ensayo para aceros"

Define los términos y métodos de ensayo aplicables a la siderurgia en Colombia, específicamente para evaluar las propiedades mecánicas de los aceros mediante pruebas estandarizadas, garantizando la uniformidad en la calidad de los productos siderúrgicos.

2.4.3. Normativas de seguridad industrial

GTC 45:2012: "Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional"

Proporciona una guía para identificar peligros y evaluar riesgos en el ámbito de la seguridad y salud ocupacional, con el fin de implementar medidas de control y prevención de riesgos en el lugar de trabajo.

2.4.4. Normativas ambientales

Decreto 4741 de 2005: "Prevención y manejo de residuos peligrosos"

Regula la gestión integral de los residuos peligrosos en Colombia, estableciendo las obligaciones para su manejo, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final, con el objetivo de proteger la salud humana y el medio ambiente.

ISO 14001:2015: "Sistemas de gestión ambiental"

Especifica los requisitos para un sistema de gestión ambiental efectivo, proporcionando un marco que permite a las organizaciones mejorar su desempeño ambiental, cumplir con las normativas legales y abordar riesgos ambientales.

2.4.5. Propiedad intelectual

Acuerdo 035 de 2003: "Reglamento sobre Propiedad Intelectual en la Universidad Francisco de Paula Santander"

Establece las políticas y regulaciones sobre la propiedad intelectual en la universidad, incluyendo derechos de autor, patentes y derechos sobre trabajos de investigación, para garantizar la protección y gestión adecuada de los productos intelectuales generados en la institución.

El cumplimiento de este marco normativo garantiza:

- Validez científica de los resultados
- Reproducibilidad de los experimentos
- Seguridad en los procedimientos
- Protección ambiental
- Respeto a la propiedad intelectual

Capítulo 3. Diseño metodológico

3.1 Tipo de investigación

Para el desarrollo de esta investigación, se adoptó un enfoque científico, dado que se trata de un proceso metódico y sistemático orientado a resolver problemas a través de la obtención de nueva información basada en datos experimentales. El estudio se centra en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del acero, utilizando un diseño experimental en el área de tratamiento de materiales. Con base en estas premisas, se consideraron los siguientes aspectos de la investigación:

Según el nivel de profundidad: La investigación es de tipo descriptivo, ya que incluye un análisis exhaustivo del estado del arte relacionado con el endurecimiento por deformación plástica de materiales y la aplicación de tratamientos térmicos en diversas aleaciones. Se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica detallada para comprender mejor las técnicas existentes y los efectos de dichos tratamientos en las propiedades mecánicas de los aceros.

Según el diseño de la investigación: Este trabajo es de naturaleza documental y experimental. Por un lado, se recopilaban datos de múltiples fuentes, como artículos científicos, libros y recursos en línea, para reunir información relevante sobre aceros, sus propiedades mecánicas y los métodos de evaluación empleados en su estudio. Por otro lado, se aplicó un diseño experimental que involucra la realización de ensayos de laboratorio con diferentes aceros grado AISI, siguiendo las normas técnicas establecidas, incluidas las ASTM. Estos experimentos permitirán evaluar los efectos de los tratamientos térmicos en las propiedades de los materiales.

Según el propósito de la investigación: El estudio es de carácter básico, ya que busca profundizar en la comprensión de los fenómenos que influyen en los esfuerzos mecánicos de los materiales. El objetivo es generar nuevos conocimientos sobre la mejora de las propiedades mecánicas de los aceros grado AISI mediante pruebas experimentales en el laboratorio, empleando una máquina universal para la evaluación de dichas propiedades.

3.2. Población y muestra

La unidad poblacional corresponde a cada ensayo de impacto Charpy realizado sobre los aceros delimitados para la investigación. La población está conformada por treinta y seis (36) ensayos a realizarse sobre tres tipos de acero (AISI 1045, AISI 1020 y AISI 4140). Esta distribución permite obtener resultados estadísticamente significativos para cada material y condición de tratamiento térmico.

3.2.2. Muestra

Se trabajará con el 100% de las unidades poblacionales, es decir, los 36 ensayos de laboratorio. Los ensayos de impacto se realizarán utilizando una máquina de ensayo Charpy, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM E23. La repetición de cuatro ensayos por cada condición experimental, como se plasma en tabla 1, garantiza la validez estadística de los resultados y permite evaluar la dispersión de los datos obtenidos.

Las probetas serán mecanizadas según las especificaciones dimensionales de la norma ASTM E23, con entalla en V, y los ensayos se realizarán a temperatura ambiente ($23 \pm 2^\circ\text{C}$).

Tabla 1

Diseño de experimentos.

Tratamiento térmico	AISI 1020	AISI 1045	AISI 4140
Estado de suministro	4	4	4
Temple	4	4	4
Revenido	4	4	4
Total	36		

Nota. Diseño de experimentos propuesto

3.3. Diseño de instrumentación de la información y técnicas de análisis de datos

Se aplicará una ficha técnica para la recopilación de información resultante de los diferentes ensayos de laboratorio, la cual contendrá las siguientes categorías de investigación: Dureza del acero, Resistencia al impacto y Microestructura.

3.4. Análisis de información

La información recopilada será procesada con el software Statgraphics, que permitirá generar histogramas de frecuencia y realizar una interpretación cualitativa detallada. Este análisis será complementado por la interpretación correlacional realizada por los autores, ofreciendo una comprensión más profunda de los datos obtenidos.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Identificar las propiedades físicas y mecánicas de los aceros grado AISI (1045, 1020 y 4140) utilizando diferentes bases de datos con la finalidad de establecer los parámetros de los tratamientos térmicos

4.1.1 Consultar información relacionada con el área de investigación utilizando las bases de datos Science direct, Scopus y Google académico.

Como punto de partida para el desarrollo experimental, se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica en bases de datos como ScienceDirect, Scopus y Google Académico, con el objetivo de identificar las propiedades mecánicas y térmicas más relevantes de los aceros AISI 1020, 1045 y 4140. Para ello, se diseñaron ecuaciones de búsqueda utilizando palabras clave tales como: tratamientos térmicos, acero AISI, temple, revenido, microestructura, dureza, impacto Charpy, incluyendo sus sinónimos y términos asociados (por ejemplo: entalladura, tenacidad, fractura dúctil/frágil).

La información obtenida fue sintetizada en una matriz de análisis documental (ver Tabla 2), la cual contiene los artículos más representativos en términos de cuartil, aplicabilidad y aporte técnico al tema de investigación. Esta matriz permitió extraer aspectos clave como: parámetros experimentales, comportamiento del material frente al impacto, modelos predictivos, relación entre dureza y tenacidad, entre otros.

Tabla 2*Matriz de análisis documental*

Autor(es)	Año	Revista	Obj. Principal	Hallazgos Clave	Conclusión
Hyung-Seop Shin, Brian J. Tuazon	2015	International Journal of Impact Engineering	Validar un nuevo aparato de prueba de impacto para aceros estructurales.	Curvas carga-desplazamiento más estables; parámetros de carga y energías de fractura identificados.	El aparato es efectivo para estudiar fractura por impacto en aceros. Q1.
S. de Luna et al.	2000	International Journal of Impact Engineering	Analizar fractura estática/dinámica en acero API X70.	Tenacidad a la fractura aumenta con tasa de deformación; embotamiento de grietas observado.	La tasa de deformación influye en la tenacidad. Q1.
Yuguang Cao et al.	2020	International Journal of Impact Engineering	Determinar parámetros de Johnson-Cook para acero X80.	Modelos de correlación entre pruebas SCVN/CVN y martillos de 2/8mm.	Parámetros útiles para simular fallas bajo carga estática/dinámica. Q1.
P.A. Ferreirós et al.	2017	Journal of Materials Science	Pruebas de impacto a alta temperatura en especímenes Charpy.	Energía de impacto aumenta con temperatura; método sensible a cambios térmicos.	Método válido para estudiar transición dúctil-frágil. Q1.
Enrico Lucon	2008	Pendulum impact machines	Efecto del radio del borde de impacto en pruebas Charpy.	Strikers de 2 mm y 8 mm dan resultados similares <200J; dispersión >200J.	Radio del borde impacta mediciones de energía. Q1.
Hyunmin Kim et al.	2015	Materials Science & Engineering A	Relacionar energía de impacto Charpy con microestructura en aceros martensíticos.	Mayor temperatura de templado = mayor energía absorbida.	Microestructura influye en energía de impacto. Q1.
Wei Wang et al.	2021	Advances in Materials Science and Engineering	Modelar energía de impacto Charpy independiente de geometría.	Modelo matemático ajusta bien datos experimentales ($R^2 \approx 1$).	"Tenacidad intrínseca" permite comparar materiales sin probetas estándar. Q2.

Nota. En la tabla 2 se sintetizan los hallazgos relevantes de los artículos leídos

Es de aclarar que gran parte de la investigación se encuentra plasmada en el marco referencial.

4.1.2 Clasificar la información consultada sobre las propiedades físicas y mecánicas de los aceros de grado AISI, tabulando los parámetros adecuados para cada tratamiento térmico.

A partir de la literatura técnica y de las fichas técnicas de fabricantes, se realizó una clasificación comparativa de las principales propiedades físicas y mecánicas de los aceros utilizados en esta investigación. Esta clasificación sirvió de base para comprender la influencia esperada de los tratamientos térmicos sobre la respuesta de los materiales al impacto. En la tabla 3, tabularemos las principales propiedades físicas de los materiales con los cuales desarrollaremos los ensayos de laboratorio.

Tabla 3

Propiedades físicas de los aceros 1020, 1045 y 4140

Acero	Densidad (kg*m⁻³)	Conductividad térmica (W*m⁻¹*K⁻¹)	Capacidad calorífica (kJ*kg*K⁻¹)	Expansión térmica (μm m⁻¹ K⁻¹)	Elementos de aleación clave
1020	7870	51	0.46	11.7	Mn 0.45%
1045	7870	49	0.49	12	Mn 0.60%
4140	7850	42	0.46	12.3	Cr 0.90% - Mo 0.20%

Nota. Valores tomados a 20 °C, valores tomados de (Callister Jr. & Rethwisch, 2020), (Totten, 2013), (Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett., 2016).

En la tabla 4, se mencionan otras propiedades físicas y mecánicas importantes para la investigación, entre ellas mencionaremos la estructura típica de los aceros, los tratamientos térmicos recomendados, así como el rango de temperatura para la austenización de estos.

Tabla 4

Propiedades físicas y mecánicas de los aceros 1020, 1045 y 4140

Acero	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tracción σ_{UTS} (MPa)	T_{ust} (°C)	Estructura típica*	Tratamiento térmico recomendado
1020	205	~350	890-910	Ferrita + perlita	Temple
1045	210	~655	840-860	Perlita + ferrita (templado: martensita)	Temple con revenido, recocido
4140	210	655-915	850-880	Martensita revenida o bainita fina	Temple, recocido, nitruración

Nota: valores tomados a 20 °C, valores tomados de (Callister Jr. & Rethwisch, 2020), (Totten, 2013), (Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett., 2016).

4.1.3 Establecer los tratamientos térmicos adecuados para mejorar la resistencia al impacto de los aceros de grado AISI, apoyándonos en la información consultada y las fichas técnicas de los fabricantes de los materiales.

Para establecer los tratamientos térmicos que mejorarían la resistencia al impacto de las probetas de los diferentes aceros se establecieron los siguientes criterios de selección:

- Compatibilidad con los equipos: todas las temperaturas se deben mantener por debajo de 900 °C para evitar sobre cargas térmicas del horno, minimizar la oxidación y prolonga la

vida útil de los elementos calefactores (Sentro tech, 2016)

- Medios de enfriamiento: el temple se realizará en agua (para AISI 1045 y 1020) y aceite (para AISI 4140), pero la velocidad de enfriamiento no es monitoreable con equipos de alta precisión. Esto podría generar gradientes de dureza o distorsiones. Se compensará con tiempos de revenido extendidos para homogenizar propiedades.

Los tratamientos térmicos que mejoran la resistencia al impacto Charpy incluyen el temple y revenido, que transforma la martensita frágil en una estructura más tenaz, equilibrando dureza y ductilidad (Askeland et al., 2011). El austempering, que genera bainita, ofrece una combinación superior de resistencia y tenacidad, evitando la formación de martensita frágil (Callister Jr. & Rethwisch, 2020). Por otro lado, el normalizado refina el tamaño de grano, mejorando la energía absorbida durante el impacto. Estos tratamientos son críticos en aplicaciones como componentes automotrices o estructuras expuestas a cargas dinámicas, donde la tenacidad es esencial.

Con estos criterios, la información recopilada en esta investigación y teniendo en cuenta las limitantes operativas de los laboratorios, se determinó que los tratamientos idóneos para mejorar la resistencia al impacto de los aceros AISI usados, serán el temple y el revenido.

4.1.4 Definir los parámetros de los tratamientos térmicos a realizar para los diferentes materiales.

Para garantizar que las diferencias observadas en dureza y tenacidad procedan exclusivamente de la composición química y no de variaciones de proceso, todos los ciclos de temple + revenido se ejecutarán bajo un marco de parámetros comunes. Las únicas variables que cambian son la temperatura de austenización y la temperatura de revenido, fijadas según las recomendaciones metalúrgicas de cada acero (sección 5.1.3). Las demás condiciones; calentamiento, tiempo de sostén, medio de enfriamiento, agitación y geometría de las probetas se mantienen idénticas para los tres materiales. Los parámetros para los tratamientos térmicos se sintetizarán la tabla 5.

Tabla 5

Parámetros para los tratamientos térmicos

Acero	Tratamiento térmico	Temp. de tratamiento (°C)	Tiempo sostenimiento (min)	Medio de enfriamiento
1020	Temple	850	120	Solución salina
	Revenido	450	36	Enfriamiento lento en horno
1045	Temple	850	120	Solución salina
	Revenido	450	36	Enfriamiento lento en horno
4140	Temple	850	120	Aceite
	Revenido	450	36	Enfriamiento lento en horno

Nota. Parámetros definidos para los tratamientos térmicos

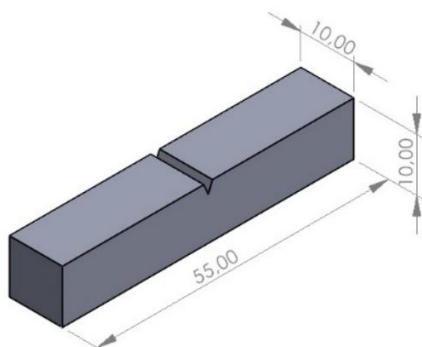
4.2 Determinar el efecto del tratamiento térmico de temple y revenido en la resistencia al impacto de los aceros grado AISI 1045, 1020 y 4140 mediante el ensayo de impacto Charpy, utilizando el software Statgraphics

4.2.1 Adquirir los aceros AISI 1045, AISI 1020 y AISI 4140 para el mecanizado de las probetas

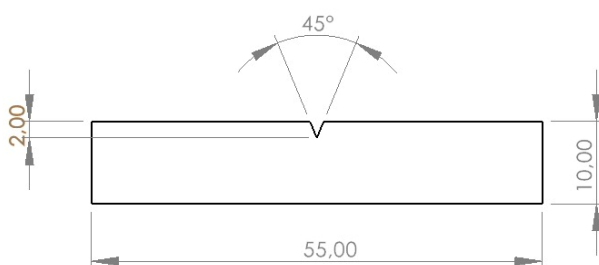
Los materiales utilizados en este estudio fueron adquiridos a la empresa Todo Bronces, importadora y distribuidora especializada en materiales industriales (ferrosos y no ferrosos), ubicada en Bucaramanga, Santander. Se procuraron barras de acero AISI 1020, 1045 y 4140, cada una con una longitud de 1 metro y aproximadamente 14.28 mm de diámetro.

4.2.2 Mecanizar las probetas a las dimensiones especificadas en la norma ASTM E23

Para el cumplimiento de esta actividad iniciamos modelando la probeta en el software solidworks, siguiendo estrictamente las medidas establecidas en la norma ASTM E23, la cual indica que las probetas para ensayos de impacto charpy deben tener las siguientes dimensiones: 55 mm x 10 mm x 10 mm, con entalladura en V con un ángulo de 45 °, a una profundidad de 2 mm. Para apreciar mejor la geometría de la probeta se ilustra en la figura 6, donde se puede observar el modelo en 3d.

Figura 6*Modelo 3D de la probeta**Nota. Vista isométrica de la probeta*

En la figura 7, se muestran las dimensiones de la entalladura, desde una vista lateral, para apreciar la profundidad de esta.

Figura 7*Vista lateral de la probeta**Nota. En la vista lateral se detalla la profundidad de la entalla*

El mecanizado de las probetas se efectuó en el centro de mecanizado CNC del laboratorio de máquinas y herramientas de la Universidad Francisco de Paula Santander – Ocaña. A partir de

trayectorias generadas en el software Mastercam, se codificaron los programas de maquinado (en código G – lenguaje de programación FANUC) necesarios para producir, con una tolerancia de $\pm 0,02$ mm, la geometría exigida por ASTM E23. El proceso se dividió en dos fases sucesivas:

- Desbaste de las barras laminadas hasta lograr las dimensiones finales de 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 55 mm mediante fresado periférico.
- Apertura de la entalla en “V” (2 mm de profundidad y 45° de ángulo) utilizando una fresa perfilada de radio 0.25 mm.

Como resultado de la primera fase de mecanizado obtuvimos un grupo de 36 probetas con las medidas que indica la norma ASTM E23 para ensayos de impacto charpy, en la figura 8 se muestran algunas de las probetas obtenidas.

Figura 8

Probetas mecanizadas



Nota. Probetas recién salidas del centro de mecanizado

4.2.3 Aplicar la muesca en V según la norma ASTM E23

La aplicación de la muesca o entalladura a las probetas comprende la fase dos del proceso de mecanizado, para ello se utilizó una fresa perfiladora o fresa grabadora de 45° con radio de 0.2 mm. Este proceso se llevó a cabo en mismo centro de mecanizado de la Universidad Francisco de Paula Santander – Ocaña.

Es correcto indicar que, para que este procedimiento sea exitoso, se deben emplear velocidades de corte moderadas a bajas (en el rango de 20 a 30 mm*min⁻¹). Esto permite que la herramienta evacúe eficazmente el calor generado, evitando superar la temperatura crítica del acero, minimizando el endurecimiento por deformación y garantizando la precisión dimensional de la probeta durante el mecanizado. Asimismo, esta baja velocidad contribuye a reducir el desgaste prematuro o fractura de la herramienta.

4.2.4 Realizar los tratamientos térmicos en un horno calibrado tipo mufla

En la sección 5.1.4, se fijaron los parámetros para realizar los tratamientos térmicos. Con ellos se procedió a programar dichos parámetros en el controlador del horno tipo mufla, en la figura 9, se muestra la programación usada para el primer tratamiento a realizar (temple). En este primer tratamiento se introdujeron 24 probetas; 8 acero AISI 1020, 8 acero AISI 1045, 8 AISI 4140, como se indicó en el capítulo 3, en la sección 3.2.2 (tabla 1).

Figura 9

Programación del horno para el temple



Nota. Configuración del controlador del horno tipo mufla para el temple

Una vez terminado el ciclo de calentamiento, procedió a realizar el templado de cada probeta, el cual consistió en enfriar rápidamente y mediante agitación manual las probetas en los diferentes fluidos (salmuera y aceite).

Para el segundo tratamiento (revenido), iniciamos programando las condiciones de temperatura en el módulo de control del horno tipo mufla, como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Programación del horno para el revenido



Nota. Configuración del controlador del horno tipo mufla para el revenido

Continuamos introduciendo las 12 probetas correspondientes en proporciones iguales para cada acero. Al finalizar el tiempo programado (36 minutos), se dejaron las probetas en el horno para un enfriamiento lento. En el apéndice a se muestra el registro fotográfico del cumplimiento de la actividad.

4.2.5 Realizar los ensayos de impacto Charpy V según la norma ASTM E23.

Para realizar los ensayos de impacto charpy se requirió de una máquina para ensayos de impacto, la cual fue prestada por el laboratorio de resistencia de materiales y sísmica de la Universidad Francisco de Paula Santander – Ocaña.

La máquina de ensayos de impacto del fabricante Tinius Olsen, referencia IT 406, cuyas especificaciones técnicas se muestran en la tabla 6, nos permitió registrar los valores experimentales de absorción de energía de los aceros AISI 1020, 1045 y 4140. En el apéndice b muestra el registro fotográfico de dicha actividad.

Tabla 6

Especificaciones técnicas de máquina de impacto IT 406

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Capacidad del péndulo</i>	406	<i>J</i>
	300	<i>ft·lb</i>
<i>Altura de caída</i>	1.5	<i>m</i>
	5	<i>ft</i>
<i>Masa del péndulo</i>	27	<i>kg</i>
	60	<i>lb</i>
<i>Velocidad de impacto</i>	5.5	<i>m/s</i>
	18	<i>ft/s</i>

Tabla 6*Especificaciones técnicas de máquina de impacto IT 406*

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad del péndulo	406	J
	300	ft·lb
Altura de caída	1.5	m
	5	ft
Masa del péndulo	27	kg
	60	lb
Velocidad de impacto	5.5	m/s
	18	ft/s
Dimensiones ($W \times D \times H$)	2108 × 508 × 1854	mm
	83 × 20 × 73	in
Masa (total)	736	kg
	1620	lb

*Nota. Datos tomados de (Tinius Olsen, 2024)***4.2.6 Registrar los valores de energía absorbida por la probeta para la rotura.**

En la tabla 7 se registran los valores de energía absorbida por las probetas en los ensayos de impacto realizados para cada uno de los materiales con su respectivo tratamiento térmico.

Tabla 7*Valores de energía absorbida en Julios*

1020			1045			4140		
Normal	Temple	Revenido	Normal	Temple	Revenido	Normal	Temple	Revenido
24	2	18	21	3	98	4	18	69
13	1	16	23	0	100	3	14	70
12	3	22	19	5	106	4	17	62
22	2.2	20	25	5	98	3	13	69

Nota. Resultados obtenidos en los ensayos de impacto

4.2.7 Utilizar el software Statgraphics para realizar un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores.

Con el fin de evaluar estadísticamente el efecto de los tratamientos térmicos aplicados sobre la resistencia al impacto de los aceros AISI 1020, 1045 y 4140, se realizó un análisis de varianza multifactorial (ANOVA de dos factores con interacción), empleando el software Statgraphics Centurion XVI.I. Este análisis consideró como variable dependiente la energía absorbida durante el ensayo Charpy (Energía_J) y como factores independientes: el tipo de acero (con tres niveles: 1020, 1045 y 4140) y el tratamiento térmico aplicado (tratamientos 1, 2 y 3).

El diseño experimental contempló un esquema balanceado con 36 observaciones totales, es decir, 4 réplicas por cada una de las 9 combinaciones posibles entre factores, como se observa en la tabla 8.

Tabla 8

Diseño experimental

Tipo de acero	Tratamiento	Energía (J)	Grupo
1045	1	21	1
1045	1	23	1
1045	1	19	1
1045	1	25	1
1045	2	3	1
1045	2	1	1
1045	2	5	1
1045	2	5	1
1045	3	98	1
1045	3	100	1
1045	3	106	1
1045	3	98	1

Tabla 8*Diseño experimental*

Tipo de acero	Tratamiento	Energía (J)	Grupo
4140	1	4	2
4140	1	3	2
4140	1	4	2
4140	1	3	2
4140	2	18	2
4140	2	14	2
4140	2	17	2
4140	2	13	2
4140	3	69	2
4140	3	70	2
4140	3	62	2
4140	3	69	2
1020	1	24	3
1020	1	13	3
1020	1	12	3
1020	1	23	3
1020	2	2	3
1020	2	1	3
1020	2	3	3
1020	2	2,5	3
1020	3	18	3
1020	3	16	3
1020	3	22	3
1020	3	20	3

Nota. Diseño de experimentos para el análisis multifactorial

Para efectos del análisis Anova multifactorial, se identificaron los tratamientos térmicos con números: 1 para los aceros sin tratamiento, 2 para el temple y 3 para el revenido. Además, se dividieron en tres grupos (columna 4 – tabla 8).

Una vez ejecutado el análisis, se pudo observar en la tabla principal del análisis (suma de cuadrados tipo III) que todos los factores evaluados fueron estadísticamente significativos, ya

que los valor-p fueron < 0.05 , como se observa en la tabla 9, lo que se traduce en que existe una influencia clara y diferenciada de cada factor sobre la variable dependiente.

Tabla 9

Análisis de varianza para energía - Suma de cuadrados tipo III.

	Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales	A: Tipo_acero	5045,29	2	2522,65	245,72	0,000
	B: Tratamiento	21328,1	2	10664,1	1038,75	0,000
Interacciones	AB	9865,58	4	2466,4	240,24	0,000
	RESIDUOS	277,188	27	10,2662	—	—
	TOTAL (CORREGIDO)	36516,2	35	—	—	—

Nota. Resultados de la ANOVA

El efecto del tratamiento térmico fue el que más contribuyó a la variación de la energía absorbida, seguido por la interacción entre factores y, finalmente, el tipo de acero. La magnitud de las razones F y los valores-p cercanos a cero indican una altísima confiabilidad estadística en los efectos detectados (nivel de confianza $\geq 99.9\%$).

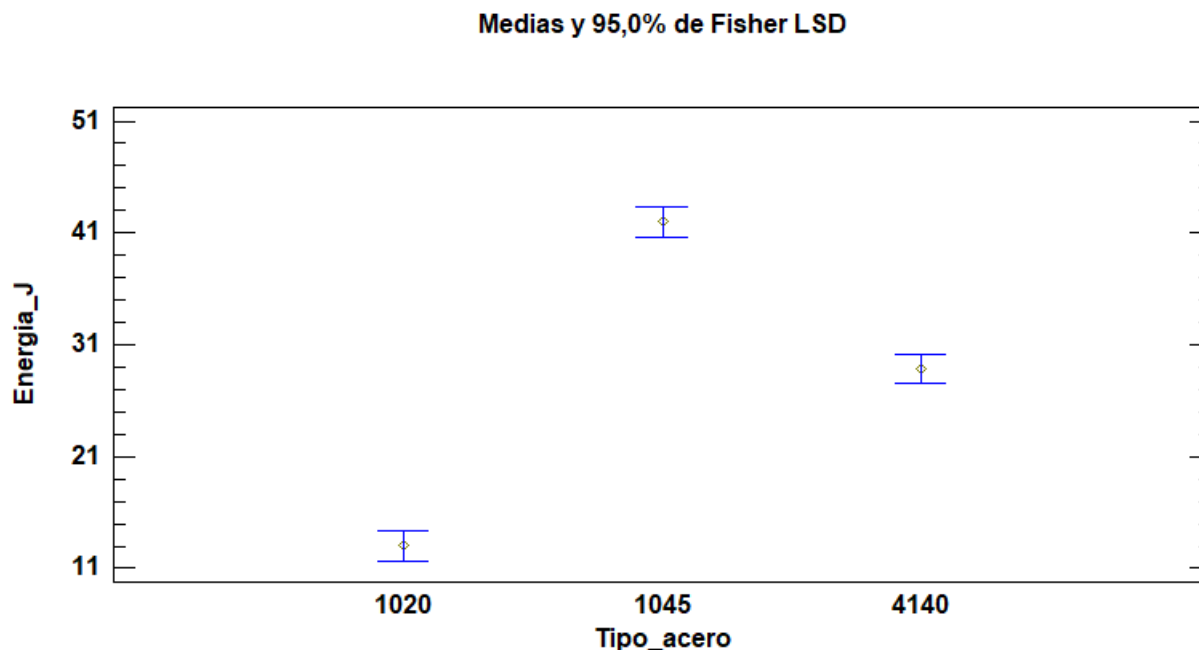
En la tabla de medias por mínimos cuadrados (tabla 10), muestran las medias ajustadas por grupo con sus respectivos intervalos de confianza del 95%, permitiendo comparar los efectos específicos de cada tratamiento y tipo de acero. El acero 1045 presentó la mayor resistencia promedio, siendo el más sensible al tratamiento. El tratamiento 3 (revenido), mostró una diferencia significativa respecto a los demás tratamientos, incrementando sustancialmente la resistencia al impacto.

Tabla 10*Medias por mínimos cuadrados*

	Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
	MEDIA GLOBAL	36	27,9583	-	-	-
Tipo_acero	1020	12	13,0417	0,9249	11,1438	14,9395
	1045	12	42,0000	0,9249	40,1022	43,8978
	4140	12	28,8333	0,9249	26,9355	30,7312
Tratamiento	1	12	9,2083	0,9249	7,3105	11,1062
	2	12	12,3333	0,9249	10,4355	14,2312
	3	12	62,3333	0,9249	60,4355	64,2312
Tipo_acero por Tratamiento	1020,1	4	2,125	1,6021	-1,1621	5,4121
	1020,2	4	18,0	1,6021	14,7129	21,2871
	1020,3	4	19,0	1,6021	15,7129	22,2871
	1045,1	4	22,0	1,6021	18,7129	25,2871
	1045,2	4	3,5	1,6021	0,2129	6,7871
	1045,3	4	100,5	1,6021	97,2129	103,7870
	4140,1	4	3,5	1,6021	0,2129	6,7871
	4140,2	4	15,5	1,6021	12,2129	18,7871
	4140,3	4	67,5	1,6021	64,2129	70,7871

Nota. Tabla de medias por mínimos cuadrados

El gráfico de medias y 95,0% de fisher LSD presenta las medias ajustadas de energía absorbida para cada tipo de acero con sus respectivos intervalos de confianza al 95 %. Este análisis visual permite identificar diferencias estadísticamente significativas entre grupos, en la figura 11, se evidencia como el acero AISI 1045 muestra la mayor energía absorbida, con una media aproximada de 42 J, claramente diferenciada de los otros dos aceros.

Figura 11*Gráfico de medias*

Como los intervalos de confianza no se superponen entre los tres aceros, se confirma que las diferencias entre medias son significativas, lo cual ya se había validado en la tabla ANOVA con un valor- $p < 0.0001$ para el factor tipo de acero.

4.2.8 Evaluar el efecto del tratamiento térmico (temple y revenido) y el tipo de acero (AISI 1045, AISI 1020 y AISI 4140) en la resistencia al impacto.

Con el fin de comprender integralmente el efecto de los tratamientos térmicos aplicados (temple y revenido) sobre las propiedades mecánicas de los aceros AISI 1020, 1045 y 4140, se realizó un análisis comparativo considerando tres variables fundamentales: energía absorbida en

el ensayo Charpy, dureza Brinell (HRB) y microestructura metalográfica a 600X. La correlación entre estos factores permite interpretar la respuesta de cada material en función de su composición química y de las transformaciones metalúrgicas inducidas térmicamente.

En la tabla 11, se sintetizan los valores de dureza obtenidos en los ensayos de dureza. Dichos valores fueron obtenidos experimentalmente mediante el uso de un durómetro de la marca Mitutoyo HR-300, el cual fue facilitado por el laboratorio de metales y aleaciones de la Universidad Francisco de Paula Santander – Ocaña.

Tabla 11

Dureza de las probetas

<i>AISI 1020</i>			<i>AISI 1045</i>			<i>AISI 4140</i>		
<i>Normal</i>	<i>Temple</i>	<i>Recocido</i>	<i>Normal</i>	<i>Temple</i>	<i>Recocido</i>	<i>Normal</i>	<i>Temple</i>	<i>Recocido</i>
97,6	112,8	108,4	98	110,7	104,7	97,7	112,3	100,4
98	117,7	107,6	101,8	112,4	104,9	99,8	116	109,4
99	118	106,2	98,5	114,7	105,8	100,8	116,2	107,7
96,6	117,8	107,7	96,5	114,9	105,1	100,6	116,3	111,8
100	118,5	106,1	100,7	111,2	106,3	101,3	117	108,9
98,24	116,96	107,2	99,1	112,78	105,36	100,04	115,56	107,64

Nota. Resultados de los ensayos de dureza

El acero 1020, con bajo contenido de carbono (0.20 % C), en condición inicial revela una microestructura típica de un acero hipo eutectoide, el cual presenta una microestructura

predominantemente ferrito-perlítica. La ferrita se aprecia en la fase blanca o gris claro de granos equiaxiales y contornos bien definidos, por su parte la perlita se evidencia en forma de colonias oscuras de laminillas, distribuidas de manera intergranular y en pequeñas proporciones, como se aprecia en la figura 12. En el ensayo Charpy, este acero manifestó un comportamiento estable frente a los tratamientos térmicos, con ligeras mejoras entre su condición inicial (2.13 J – 50 HRB) y final (19 J – 77 HRB).

Figura 12

Microestructura AISI 1020 sin tratamiento térmico



Nota. Imagen de tomada a 600x

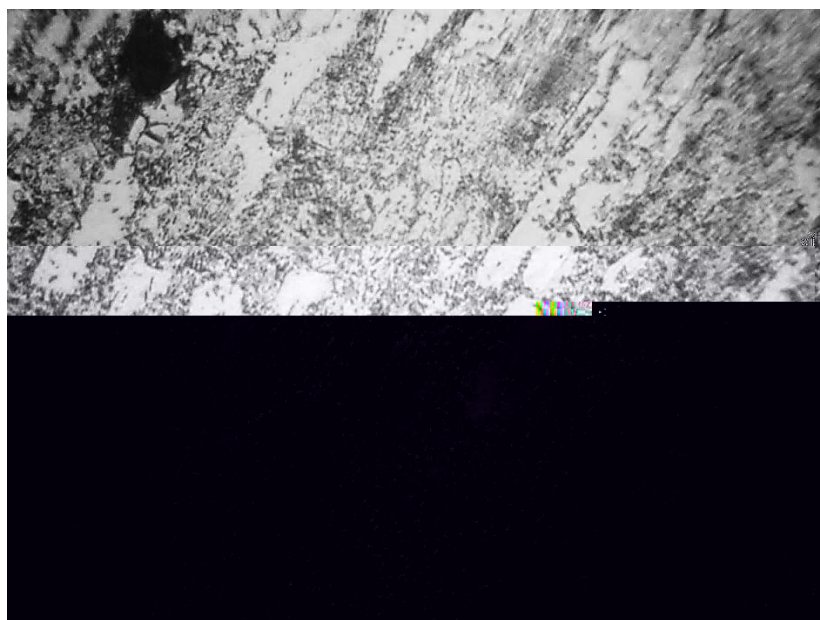
Según (Callister Jr. & Rethwisch, 2020), los aceros con menos de 0.25 % de carbono presentan microestructuras con ferrita dominante y pequeñas cantidades de perlita, lo cual se asocia con una alta maquinabilidad, buena soldabilidad, pero baja resistencia mecánica y

tenacidad. (Totten, 2013) también indica que el AISI 1020, cuando se enfría desde la fase austenítica sin tratamientos adicionales, desarrolla una estructura que no responde eficientemente al temple, y cuya resistencia se encuentra limitada por la fracción volumétrica de perlita, que en este caso es escasa.

En la micrografía del acero AISI 1020 templado, se observan transformaciones parciales derivadas del enfriamiento rápido desde la fase austenítica, pero con limitaciones típicas de un acero de bajo carbono. En la figura 13, podemos observar martensita dispersa, la cual corresponde a las áreas oscuras de aspecto acicular, es discontinua y no predomina. Además, seguimos teniendo presencia de ferrita residual en un gran porcentaje, distribuida en zonas claras y no transformadas.

Figura 13

Microestructura AISI 1020 con temple

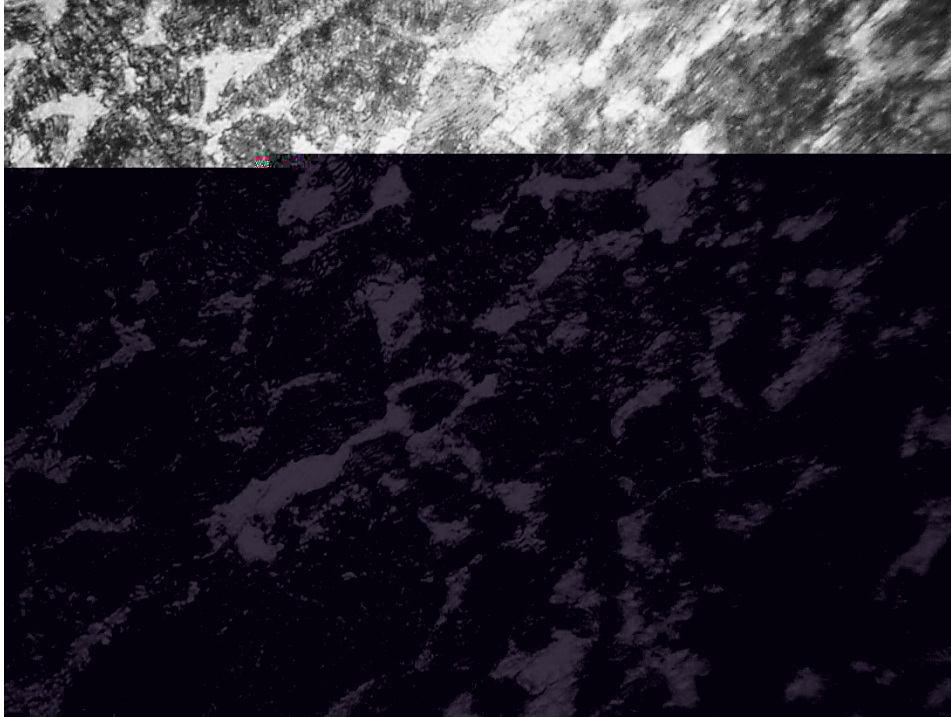


Nota. Perlita transformada parcialmente a martensita

El incremento en dureza con respecto al estado inicial fue de aproximadamente 19 %, esto refleja la formación parcial de martensita. Sin embargo, la disminución en la energía absorbida del 88% indica que, aunque la estructura obtenida es más dura, también es más frágil. Este comportamiento puede atribuirse a la generación de martensita de bajo contenido de carbono, la cual, según (Totten, 2013), aumenta la dureza sin aportar tenacidad significativa, especialmente cuando permanece una cantidad considerable de ferrita no transformada en la matriz.

(Ismail et al., 2016) explica que los aceros de bajo carbono, como el AISI 1020, tienen baja templabilidad, lo que implica que solo una fracción de la austenita logra transformarse en martensita durante el enfriamiento rápido. La ferrita residual impide alcanzar durezas elevadas, y la martensita que se forma es menos rígida debido al menor contenido de carbono disuelto.

Por su parte el acero 1045 el cual contiene un porcentaje de 0.45 % C, muestra una microestructura típica de un acero de medio carbono. En la figura 14, en la cual se puede observar perlita fina en una cantidad significativa, distribuida en forma de colonias oscuras de aspecto laminar, también vemos en menor proporción, ferrita intergranular, visible en las áreas más claras que rodean los granos perlíticos.

Figura 14*Microestructura AISI 1045*

Nota. Imagen tomada a 600x

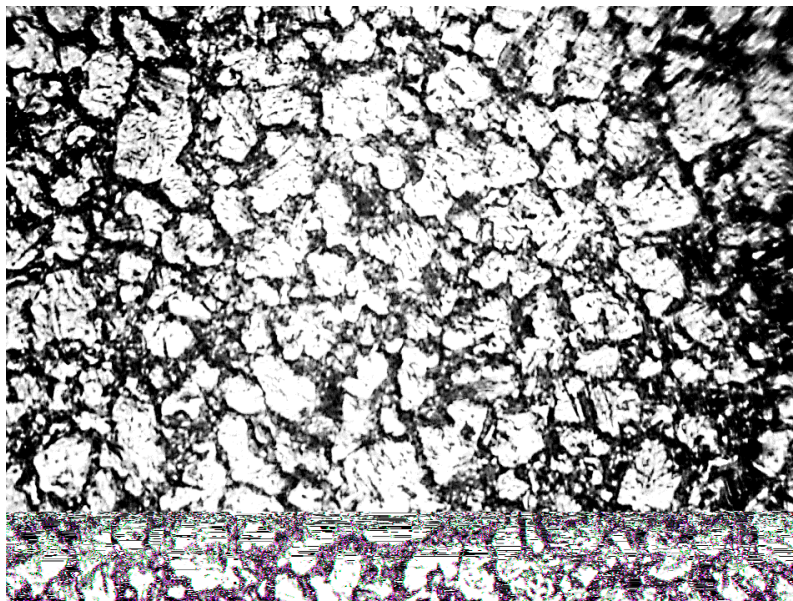
Autores como Callister Jr. & Rethwisch, 2020 señalan que los aceros con contenido medio de carbono (0.40–0.50 %) tienen suficiente carbono para generar una cantidad apreciable de perlita dura, pero no tanta como para generar martensita sin tratamiento térmico. En este estado, el AISI 1045 presenta una microestructura de ferrita + perlita ideal para procesos de mecanizado y formación en frío, además de ofrecer propiedades mecánicas superiores al AISI 1020.

El acero 1045 mostro una alta sensibilidad a los tratamientos térmicos, empezando por el temple, con el cual logramos un aumento significativo de la dureza (13%) y una disminución

drástica de la absorción de energía (76%). En la figura % se observa la microestructura completamente transformada, caracterizada por martensita acicular en aglomeraciones oscuras de orientación aleatoria con contornos entrecruzados, típico de martensita de alto contenido de carbono, este patrón microestructural corresponde a un estado frágil con baja absorción de energía y gran dureza. También notamos la ausencia de perlita o ferrita, lo cual indica una alta templabilidad y enfriamiento rápido efectivo.

Figura 15

Microestructura AISI 1045 con temple



Nota. Imagen tomada a 600x

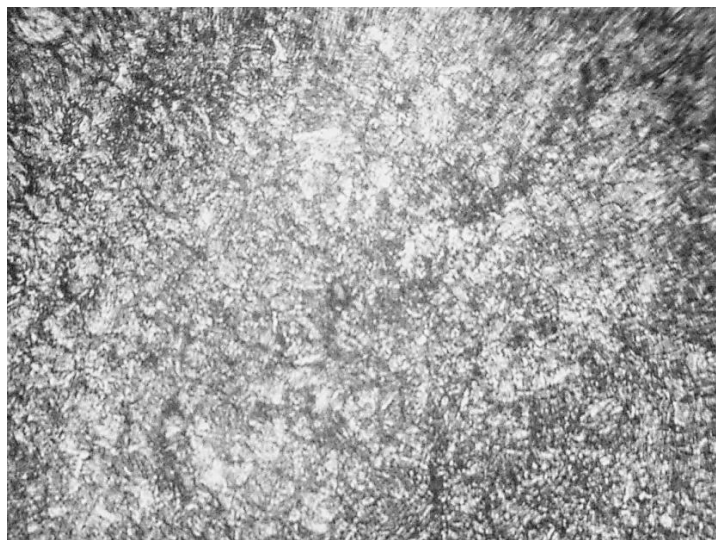
El autor (Totten, 2013) especifica que los aceros como el AISI 1045, al ser templados sin un revenido posterior, desarrollan una estructura rígida y quebradiza, susceptible a fractura frágil bajo cargas dinámicas. Según (Callister Jr. & Rethwisch, 2020) la martensita es una fase

metaestable que presenta alta dureza pero pobre resistencia al impacto. Este comportamiento se debe a su estructura tetragonal distorsionada y a la presencia de elevadas tensiones internas.

La microestructura del acero AISI 1045 revenido nos muestra una estructura transformada a partir de martensita templada, donde podemos identificar martensita revenida la cual se diferencia como una estructura acicular más suave y menos definida en relación con la martensita del temple, como se aprecia en la figura 16. Con esto se redujo la dureza respecto al temple, pasando de 96 a 89 HRB, en contraste la absorción de energía se incrementa, alcanzando el valor más alto del estudio experimental (100.5 J).

Figura 16

Microestructura AISI 1045 con revenido



Nota. Imagen tomada a 600x. Acero dúplex

Según (Totten, 2013), el revenido en aceros de medio carbono como el AISI 1045 permite un balance óptimo entre dureza y tenacidad, gracias a la descomposición parcial de la martensita

y la estabilización de la estructura interna. Este proceso mejora la resistencia al impacto al eliminar dislocaciones bloqueadas y reducir tensiones residuales.

(Callister Jr. & Rethwisch, 2020) afirman que los tratamientos térmicos combinados, temple + revenido, son especialmente eficaces en aceros de contenido intermedio de carbono, dado que la martensita resultante puede ajustarse según la temperatura y duración del revenido, obteniendo microestructuras como martensita revenida.

El acero AISI 4140 inicialmente muestra en su microestructura formaciones de ferrita y perlita fina distribuidas de forma homogénea, como se muestra en la figura 17, con granos de tamaño medio, en colonias bien definidas, características típicas del acero.

Figura 17

Microestructura AISI 4140



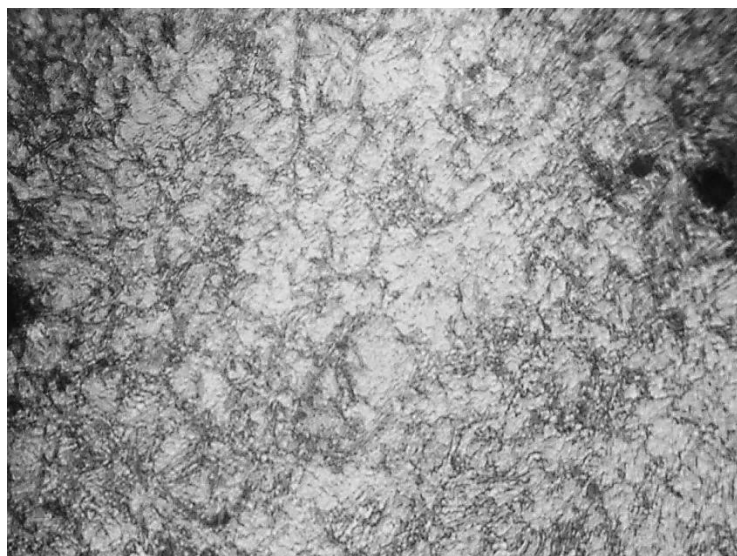
Nota. Imagen tomada a 600x

Estudios realizados por (Gurumurthy et al., 2016) en aceros AISI 4140 indican que el proceso de normalizado produce una microestructura ferrítica y perlítica uniforme y fina, lo cual aumenta la estabilidad pero reduce la resistencia al impacto, lo cual es congruente con los resultados obtenidos experimentalmente, donde se registraron valor de absorción de energía de 3.5 julios y dureza de 62 HRB. De igual forma, la teoría nos dice que los aceros de baja aleación presentan templabilidad mejorada, pero que solo se logra una mejoría en la resistencia al impacto luego de aplicar tratamientos como el revenido.

Luego del temple, el acero 4140 revela una transformación en su microestructura, la cual es dominada por martensita acicular perfectamente definida, se presenta con tono oscuro uniforme y está distribuida de forma densa en toda la estructura, con alineaciones anguladas características. En la figura 18, se observa la microestructura del acero 4140 luego del temple.

Figura 18

Microestructura AISI 4140 con temple



Nota. Imagen tomada a 600x

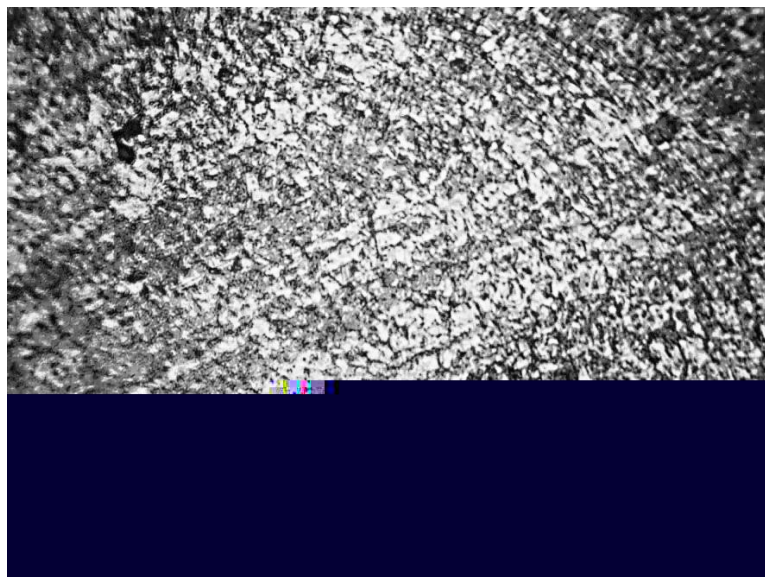
Con este tratamiento se logró incrementar la dureza del material en un 53 % que se atribuye a la transformación completa a martensita, también se incrementó notablemente la capacidad de absorción de energía, pasando de 3.5 a 15.5 julios, no obstante, este comportamiento es típico de aceros sin revenido, los cuales poseen alta dureza, pero son frágiles debido a la martensita.

El acero AISI 4140 presenta muy buena templabilidad debido a su contenido de Cr, Mn y Mo, lo que le permite formar martensita incluso en secciones medianas. Sin embargo, esta martensita no revenida posee baja tenacidad y alta fragilidad, lo que limita su uso en aplicaciones de impacto directo si no se complementa con revenido (ASM International., 2000).

Al aplicar el revenido al acero AISI 4140 se logró convertir la martensita fresca en una estructura más estable, con contornos martensíticos suavizados, en menor contraste que en el temple, lo cual es una señal de alivio de tensiones internas. En la figura 19, se observa una apariencia más uniforme con una textura menos fragmentada y más compacta, lo cual demuestra que el revenido fue efectivo.

Figura 19

Microestructura AISI 4140 revenido



Nota. Imagen tomada a 600x

Este tratamiento provoco una pequeña reducción en la dureza del material, pasando de 95 a 88 HRB, pero a su vez incremento sustancialmente la absorción de energía, pasando de 15.5 julios a 67.5, lo que representa un incremento del 335 % respecto al temple, recuperando así la tenacidad estructural del acero.

Según (Totten, 2013), el AISI 4140 es un acero de baja aleación cuya resistencia al impacto se maximiza tras el revenido, ya que este proceso permite que la martensita se relaje y precipite carburos finos, mejorando la ductilidad sin perder demasiada dureza. Por otra parte, el (ASM International., 2000) también establece que los aceros templados y posteriormente revenidos, como el 4140, son excelentes para piezas sujetas a cargas cíclicas o de impacto, gracias a su microestructura equilibrada entre resistencia y tenacidad.

4.2.9 Interpretar los resultados del ANOVA y realizar pruebas post hoc si es necesario.

Como se mencionó en la sección 5.2.7, los resultados evaluados resultaron estadísticamente significativos ya que el valor-p es muy inferior a 0.05, esto nos indica cada tipo de acero presenta un comportamiento distinto frente a los ensayos de impacto charpy, que los tratamientos térmicos afectan de forma distinta la absorción de energía y además la interacción significativa entre factores, es decir, el efecto de los tratamientos térmicos no es el mismo en todos los aceros.

Dado que los factores principales y su interacción fueron significativos, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples Tukey HSD (Honestly Significant Difference), que es más conservadora y adecuada cuando se desea controlar el error tipo I en múltiples comparaciones.

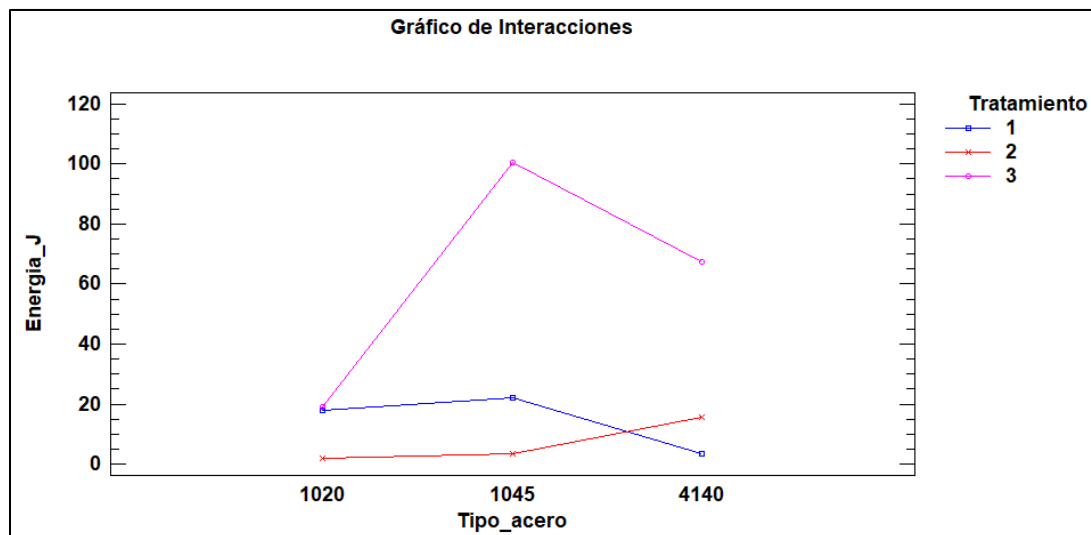
Los resultados obtenidos revelan que las medidas de energía absorbida para los tres tipos de acero son estadísticamente diferentes entre sí, según el análisis de grupos homogéneos de Tukey. Respecto a los tratamientos térmicos se detectaron diferencias significativas en los tres niveles; el revenido mostro un efecto sustancialmente superior sobre la tenacidad, mientas que el temple y la condición inicial se ubicaron en grupos distintos con menor desempeño.

En la figura 20, se visualiza la gráfica de interacciones entre tipo de acero y tratamiento térmico, en la cual se evidencian cruces entre líneas, lo que confirma la interacción estadística significativa detectada en el ANOVA. En específico, el acero 1045 muestra una gran variación

entre tratamientos, alcanzando el máximo valor de energía absorbida en el revenido. En cambio, el acero 1020 demuestra tener una menor sensibilidad a los tratamientos térmicos.

Figura 20

Gráfico de interacciones



Nota. En la gráfica, los tratamientos se identifican con 1, 2 y 3 (sin tratamiento, temple y revenido)

Como lo establece (MONTGOMERY, 2016) en presencia de interacción significativa, la comparación de medias debe realizarse considerando la combinación de factores, y no los factores de forma aislada. Esto respalda la metodología aplicada y fortalece la solidez estadística del estudio.

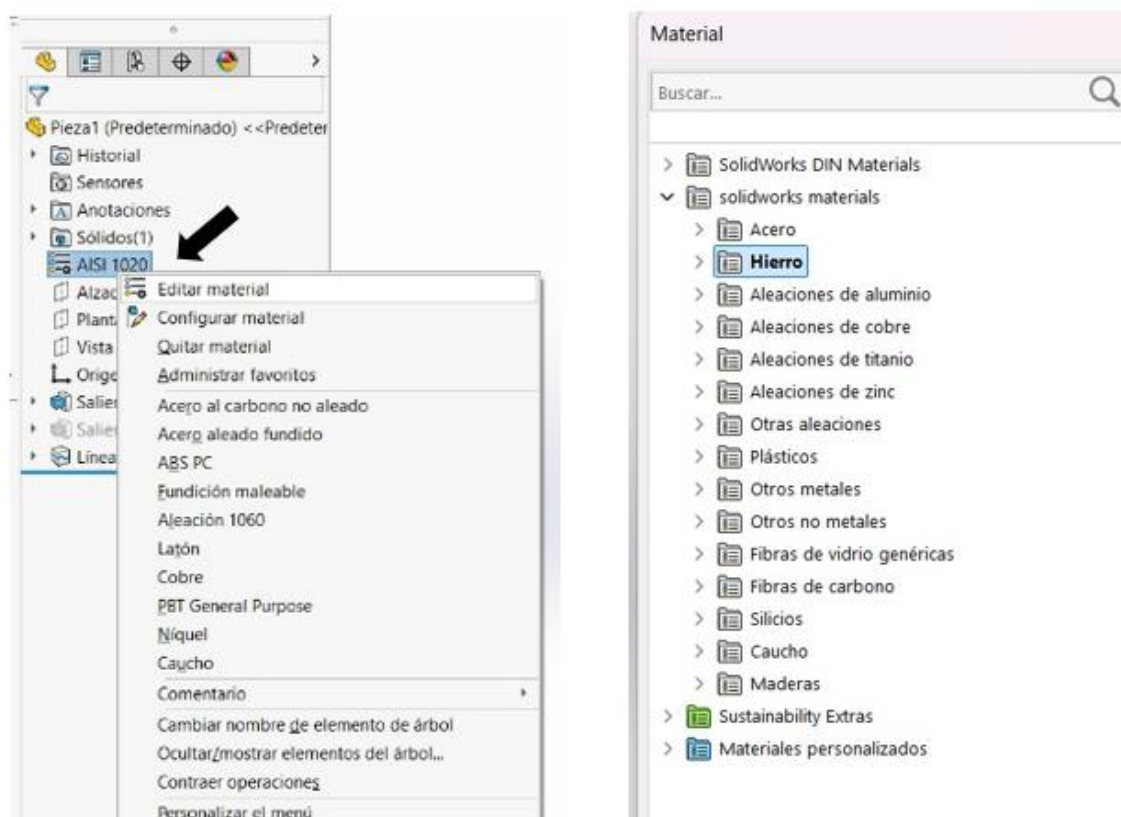
4.3 Analizar el estado de esfuerzos generados durante el ensayo de impacto para los aceros grado AISI mediante simulación numérica (FEA) utilizando el software Solidworks

4.3.1 Crear un modelo 3D de la probeta de acero AISI 1045, 1020 y 4140 con las dimensiones especificadas en la norma ASTM E23.

En esta actividad retomaremos el modelo creado para la realización de la actividad de la sección 5.2.2, ahora asignaremos un material de la biblioteca del software Solidworks. En la figura 21, se muestra cómo hacerlo. Este proceso se repetirá para los tres materiales.

Figura 21

Asignación de material desde la biblioteca de materiales



Nota. Property manager del software solidworks

4.3.2 Dividir el modelo 3D en elementos finitos utilizando el mallado de Solidworks.

Para iniciar el proceso de simulación en el software Solidworks, debemos activar el complemento de simulaciones en la pestaña de complementos, pasados unos segundos estará disponible el módulo. Una vez cargado el módulo, se selecciona el tipo de estudio y se procede a discretizar la geometría en elementos finitos (mallado), convirtiendo el continuo tridimensional en un conjunto algebraico de nodos y elementos que el solucionador puede resolver. Paso siguiente definiremos el tipo de análisis que usaremos, este módulo nos permite realizar cuatro tipos de simulaciones:

- Simulaciones generales: están diseñadas para resolver problemas estructurales básicos donde se asume comportamiento lineal, es decir, sin plasticidad, sin contacto severo y con pequeñas deformaciones. Estas simulaciones son útiles en etapas iniciales del diseño o para componentes que trabajan dentro del régimen elástico. Aquí encontraremos dos tipos de análisis; estático y de frecuencias.
- Percepción del diseño: este grupo de simulaciones está orientado a la exploración y optimización del diseño desde una perspectiva conceptual. Utiliza herramientas de sensibilidad y análisis paramétrico. Entre las opciones de análisis tenemos: estudios de topología y de diseño.
- Simulaciones avanzadas: las simulaciones avanzadas incorporan no linealidades físicas, geométricas y de contacto, permitiendo modelar con alta fidelidad situaciones complejas como colisiones, fracturas o cargas dependientes del tiempo. Entre los tipos de estudios encontramos; térmicos, de pandeo, fatiga, no lineal (lineal y dinámico) y dinámica

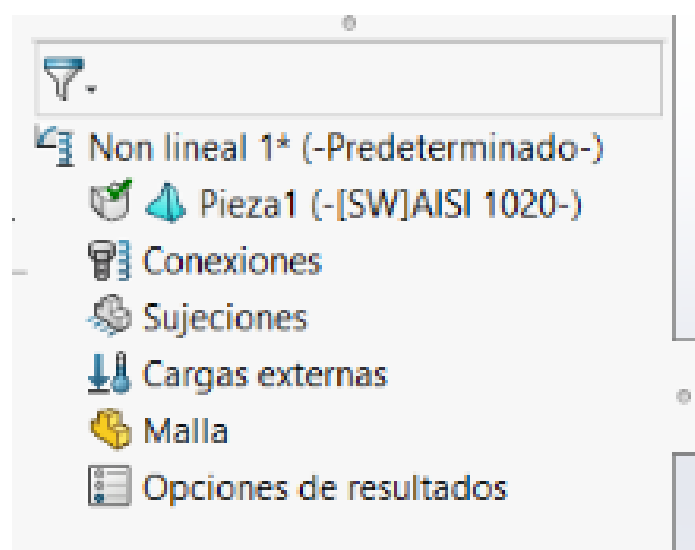
lineal.

- Simulaciones especializadas: Esta categoría agrupa estudios específicos diseñados para condiciones de análisis muy particulares o que requieren enfoques adicionales a los disponibles en los estudios estándar. A diferencia de las simulaciones generales o avanzadas, las simulaciones especializadas integran herramientas enfocadas en detalles o casos de uso industriales específicos.

Para analizar el estado de esfuerzos durante el impacto charpy, requerimos hacer una simulación no lineal, ya que esta permite analizar grandes desplazamientos, contacto con fricción y plasticidad dependiente de la tasa de deformación (Liu & Li, 2021). En base a lo anterior, el estudio a realizar será no lineal, del modulo de simulaciones avanzadas. El figura 22 se muestra la interfaz del modulo de simulacion.

Figura 22

Interfaz modulo de simulacion no lineal

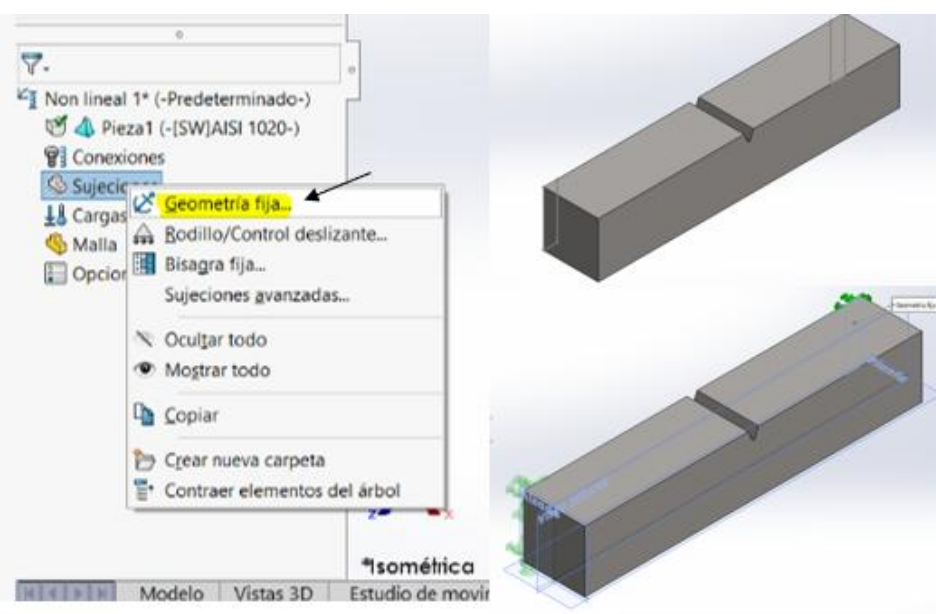


Nota. Property manager del modulo non lineal dinamya

Una vez dentro del modulo no lineal, empezaremos a configurar los parámetros requeridos para ejecutar el solucionador, empezando por las sujeciones, las cuales serán de geometría fija, como se muestra en la figura 23. Se ubicaron en la misma cara donde se dispone la entalladura, simulando las condiciones de los ensayos de laboratorio.

Figura 23

Sujeciones de la probeta



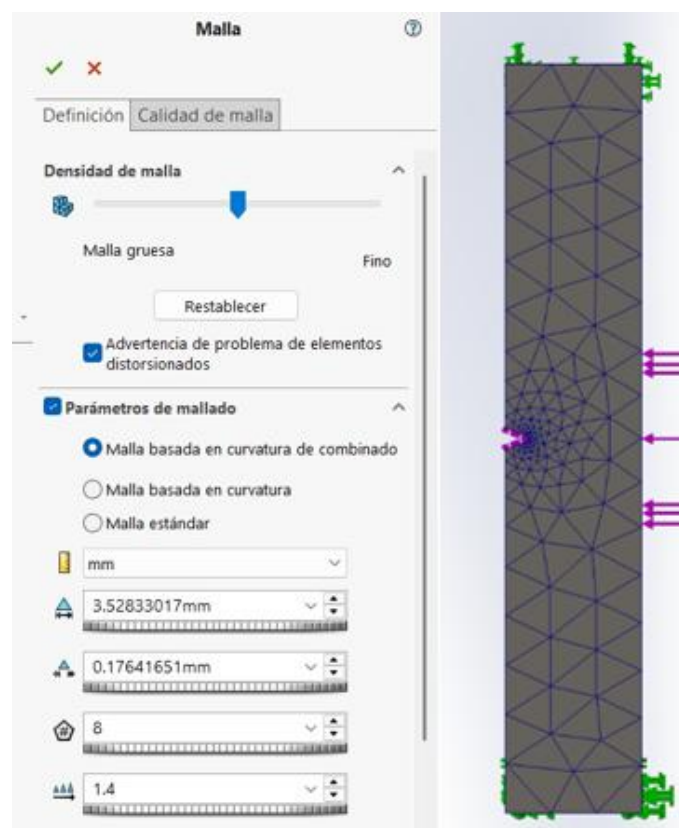
Nota. Configuración del tipo de sujeción

Con las sujeciones definidas, continuaremos configurando las cargas, donde definiremos una condición inicial de velocidad o una carga distribuida en la zona de impacto, estas basándonos en las especificaciones técnicas de la máquina de impacto utilizada en los ensayos de laboratorio, las cuales se mostraron en la figura 11, la cual indica que la máquina impacta las probetas con una velocidad de $5.5 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$ y hasta 406 julios de energía.

Una vez aplicadas las cargas, procedemos a generar la malla sobre la probeta, definiendo cuidadosamente su densidad para garantizar resultados precisos (Liu & Li, 2021). Como se muestra en la Figura 24, la malla debe ser más fina en zonas críticas como la entalla y el área de impacto, donde se concentran los esfuerzos, mientras que en otras áreas puede ser más gruesa para optimizar el tiempo de cálculo. Un mallado fino en estas regiones clave permite capturar con mayor exactitud los gradientes de tensión y la deformación localizada, aunque es importante equilibrar la precisión con la capacidad computacional, ya que no contamos con recursos computacionales avanzados.

Figura 24

Mallado y calidad del mallado



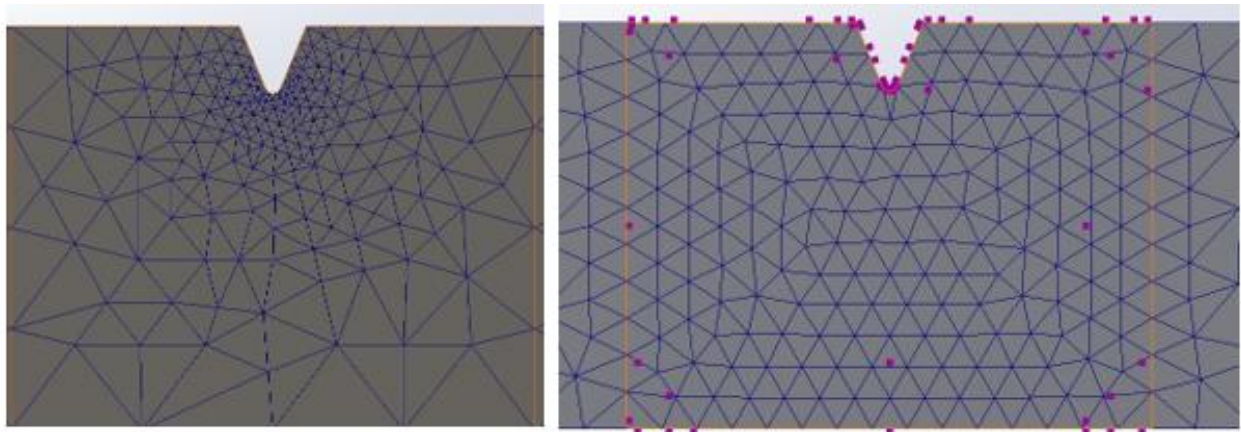
Nota. Configuración y control del mallado

4.3.3 Refinar el mallado en las zonas de interés, como la punta de la muesca en V.

Para refinar el mallado en las zonas de interés debemos aplicar un control de mallado, que nos permitirá modificar la densidad de la malla en cada zona crítica. Una vez aplicados los controles de malla, debemos regenerar la malla para que se apliquen las nuevas definiciones. En la figura 25, podemos visualizar un antes y después de aplicar el control de malla.

Figura 25

Antes y después control de malla



Nota. Vista lateral en detalle del mallado

4.3.4 Asignar las propiedades mecánicas de los aceros AISI 1045, AISI 1020 y AISI 4140 a los elementos finitos del modelo.

Una vez definido el mallado y el tipo de análisis no lineal dinámico, se procede a asignar los materiales a cada uno de los cuerpos que conforman el modelo 3D. En este caso, se seleccionaron los aceros AISI 1045, AISI 1020 y AISI 4140, disponibles en la biblioteca

predeterminada de materiales de SolidWorks Simulation, sin realizar modificaciones personalizadas a sus propiedades mecánicas.

Esta decisión se justifica en que el objetivo del estudio no es replicar con exactitud el comportamiento físico de cada tratamiento térmico, sino analizar la respuesta estructural relativa del sistema bajo las mismas condiciones de carga e impacto, y luego comparar los resultados simulados con los datos experimentales obtenidos en laboratorio, esencialmente la respuesta fractográfica.

Cabe resaltar que estos valores no reflejan directamente las variaciones inducidas por los tratamientos térmicos aplicados en el laboratorio (temple y revenido), los cuales afectan propiedades como la tenacidad y dureza. No obstante, al mantener constantes las condiciones de simulación entre los tres materiales, es posible comparar la distribución de esfuerzos, deformaciones y zonas críticas en las probetas bajo condiciones de carga idénticas.

Tal como recomiendan (Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett., 2008) esta aproximación es válida para simulaciones comparativas cuando el objetivo es estudiar la distribución relativa de variables mecánicas bajo condiciones controladas, sin necesidad de incorporar complejidad adicional en la definición del material.

4.3.5 Aplicar la carga de impacto en la parte posterior de la probeta y definir las condiciones de apoyo en los extremos de la probeta.

Una vez asignadas las propiedades mecánicas del material a los elementos finitos del modelo, se procede a configurar las condiciones de carga y apoyo, necesarias para replicar el ensayo de impacto Charpy mediante simulación numérica. Este paso es fundamental para garantizar que la transferencia de energía y la distribución de esfuerzos simuladas reflejen de forma razonable el fenómeno físico real observado en el laboratorio.

Para calcular la carga equivalente que ejerce el péndulo sobre la probeta durante el impacto, se parte de la ecuación de la energía cinética:

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

Donde:

E_c : energía cinética del péndulo al momento del impacto (J).

$m = 27$ kg: masa del péndulo (según ficha técnica de la máquina IT406).

$V = 5.5$ m/s: velocidad del péndulo justo antes del impacto.

$$E_c = \frac{1}{2} \times (27) \times (5.5)^2 = 409.88 \text{ J}$$

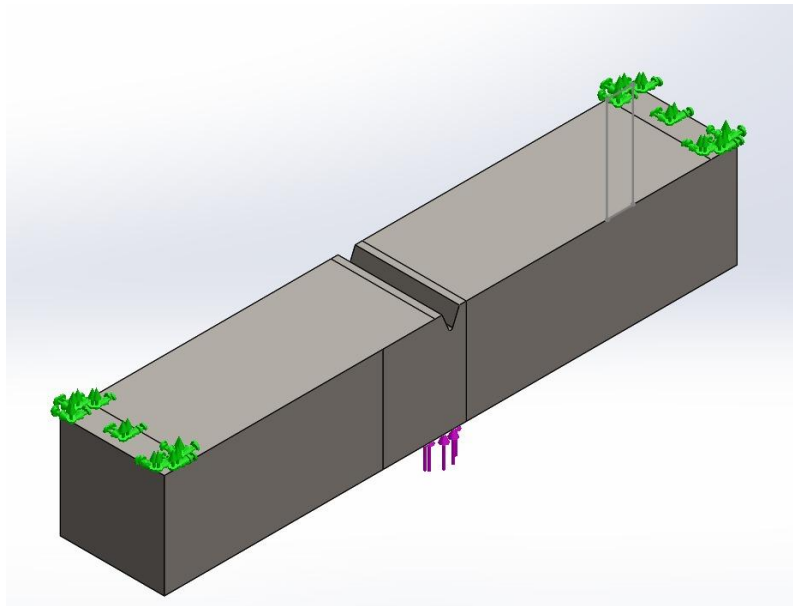
Este valor coincide con la energía nominal de impacto de la máquina IT 406. Para aplicar esta energía en forma de una carga equivalente se consideró una distancia de desaceleración durante el impacto de aproximadamente 1.5 mm, con lo cual podemos relacionar en la ecuación del trabajo la energía y la distancia de desaceleración.

$$F = \frac{E}{d} = \frac{409.88 J}{0.0015 m} = 273.253,33 N$$

Una vez calcula la fuerza, definiremos las restricciones en los extremos de la probeta, usaremos restricciones de geometría fija, como se muestra en la figura 26, representadas con flechas verdes, están limitaran los grados de libertad de la probeta.

Figura 26

Restricciones de geometría fija



Nota. Visualización de las sujeciones mediante símbolos (flechas)

Este esquema de carga y apoyo permite reproducir de forma simplificada pero funcional el comportamiento dinámico del impacto Charpy, tal como se ha utilizado en estudios similares de simulación FEA (Madhusudhan et al., 2018). El uso de la fuerza equivalente basada en energía cinética, aplicada en un intervalo de tiempo breve, permite analizar el estado de

esfuerzos, deformaciones y concentraciones en la zona de la entalla, que es el foco de interés del análisis.

4.3.6 Utilizar el solucionador de SolidWorks para resolver el problema de análisis de elementos finitos (FEA).

Con todos los parámetros configurados se procede a ejecutar la simulación haciendo uso del solucionador FFEPlus, que es un solucionador iterativo basado en métodos de descomposición del sistema de rigidez y técnicas de relajación conjugada, que lo hacen altamente eficiente en modelos con muchos grados de libertad. Además, permite realizar la integración temporal mediante formulaciones implícitas, adecuadas para analizar la evolución de esfuerzos y desplazamientos en intervalos breves de tiempo con alta estabilidad numérica (Syst, 2022).

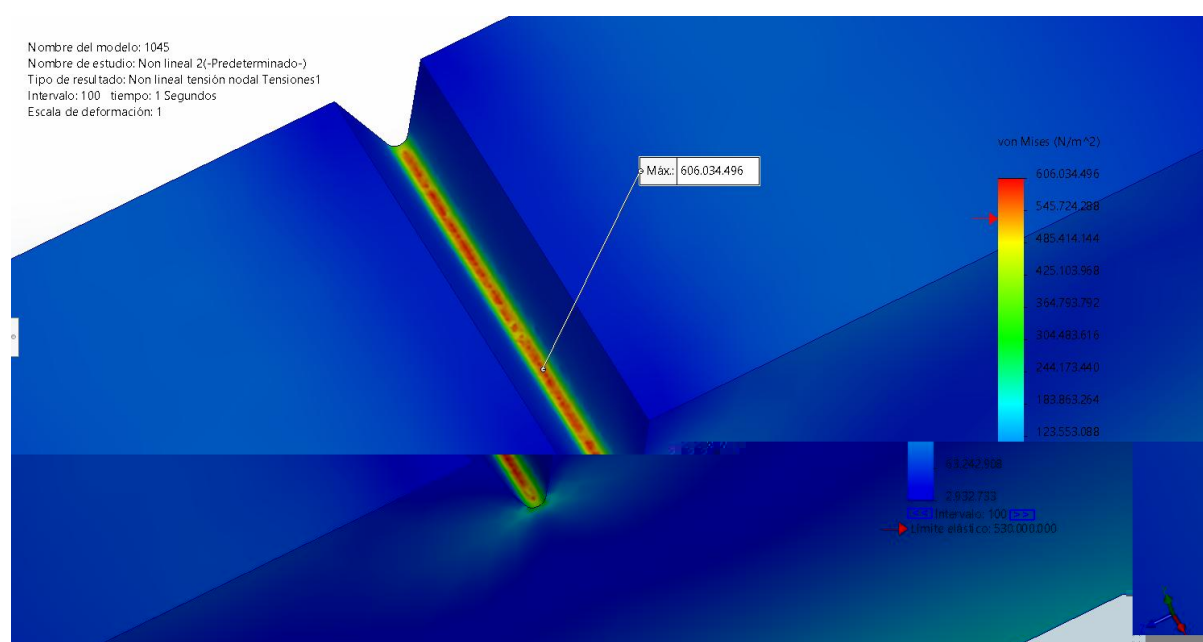
4.3.7 Comparar los resultados de la simulación numérica con los datos experimentales del ensayo de impacto Charpy V.

La simulación del impacto en el acero 1045 muestra una concentración intensa de tensiones de VonMises en la base de la entalla tipo V, donde se esperaría naturalmente la iniciación de la fractura. El patrón de distribución es simétrico, con una zona plástica localizada que sugiere un comportamiento frágil-transicional, coherente con la microestructura martensítica observada en el estado templado.

El valor máximo estimado de tensiones se localiza en el borde inferior de la entalla (figura 27), lo cual coincide con la zona crítica reportada en la mayoría de los estudios Charpy (Totten, 2006). Este resultado es consistente con la baja energía absorbida (3,5 J) registrada experimentalmente tras el temple, reflejando una respuesta frágil ante cargas de impacto.

Figura 27

Tensiones de vonMises



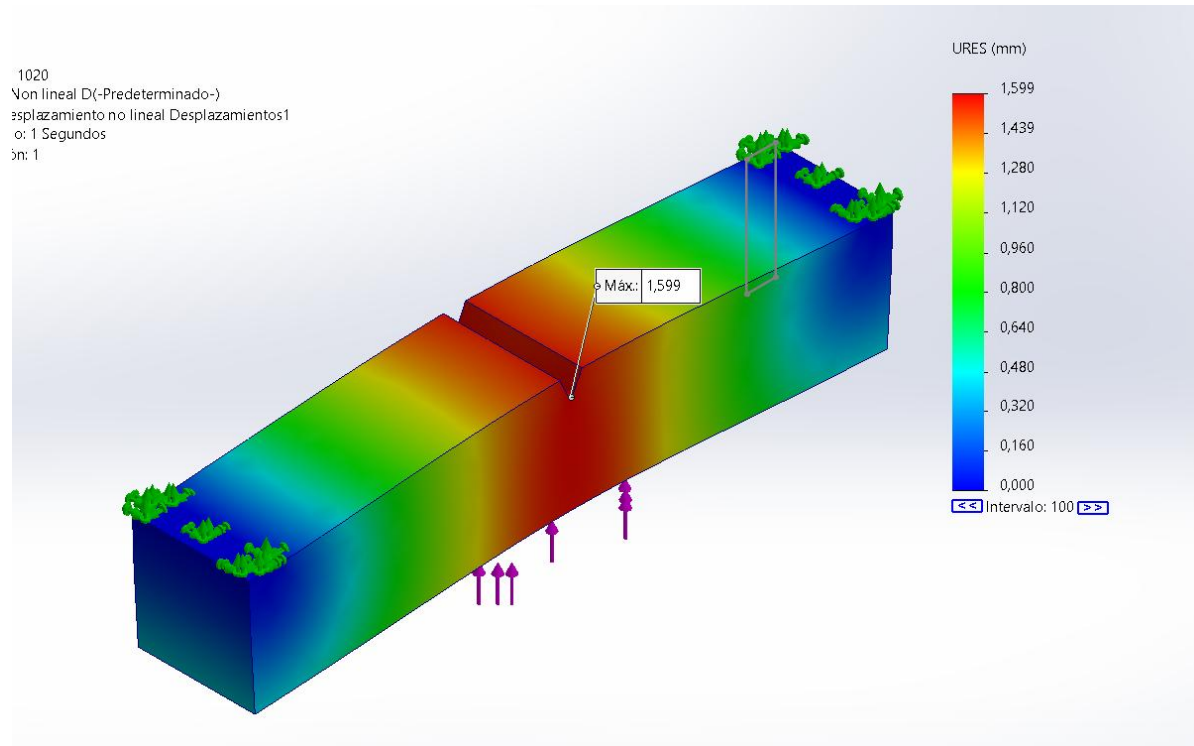
Nota. Detalle de los resultados de las tensiones de vonMises

Para el acero 1020, la simulación muestra una distribución más difusa de tensiones equivalentes, con menores valores máximos en comparación con el 1045 y el 4140. La región plástica abarca una zona más extensa, indicando un comportamiento más dúctil, lo cual es característico de su microestructura ferrito-perlítica y su bajo contenido de carbono, esto se

aprecia en la figura 28, donde se muestra el trazado de desplazamientos, en cual obtuvimos valores de 0.04721 mm en el 1045 frente a 1.59 mm para el 1020.

Figura 28

Trazado de desplazamiento – acero 1020



Nota. Trazado de desplazamientos URES (mm), escala de colores

A pesar de que la tenacidad medida experimentalmente fue baja (2,13 J en estado templado), los resultados simulados muestran menor rigidez estructural, lo cual se alinea con el menor módulo de elasticidad y límite elástico del AISI 1020, asignados desde la base de datos de materiales de SolidWorks.

El trazado de tensiones para el acero 4140 revela una distribución más localizada, pero con mayores magnitudes absolutas de esfuerzo, concentradas en la zona de la entalla. Este comportamiento corresponde a una estructura martensítica más resistente pero también más rígida, capaz de soportar mayores niveles de carga antes de iniciar el flujo plástico.

La simulación también evidencia una zona crítica más angosta, lo cual es indicativo de fragilidad relativa con alta rigidez, en coherencia con su dureza elevada (95 HRB) y tenacidad intermedia (15,5 J) en el estado templado. Este resultado valida el uso del 4140 para aplicaciones de alta resistencia, siempre que se considere su propensión a fractura súbita sin revenido.

5. Conclusiones

El tratamiento térmico de temple seguido por revenido fue el más efectivo para mejorar la resistencia al impacto en los aceros AISI evaluados, especialmente en el AISI 1045, donde se obtuvo el mayor valor de energía absorbida (100,5 J). Esta mejora significativa se relaciona con la transformación de la martensita fresca en una martensita revenida más estable, que conserva dureza sin comprometer la tenacidad.

El análisis de varianza (ANOVA) y las pruebas post hoc de Tukey HSD confirmaron que tanto el tipo de acero como el tratamiento térmico, así como su interacción, tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la tenacidad, lo que valida el enfoque experimental y respalda el uso de herramientas estadísticas como soporte en estudios metalúrgicos.

La simulación numérica mediante elementos finitos en el módulo Nonlinear Dynamic de SolidWorks permitió visualizar las zonas críticas de esfuerzo y corroborar los mecanismos de falla observados en el ensayo Charpy, evidenciando concentraciones de tensión en la base de la entalla. Aunque se emplearon propiedades por defecto de los materiales, los resultados fueron consistentes con el comportamiento mecánico registrado experimentalmente.

6. Recomendaciones

Extender el análisis computacional a estudios de propagación de grietas o simulación explícita de fractura, empleando software más especializado (como ANSYS Explicit o ABAQUS) en caso de buscar validar modelos de fractura en diferentes tratamientos térmicos o microestructuras específicas.

Incluir en futuros estudios el modelado personalizado de propiedades mecánicas postratamiento (como módulo de elasticidad, límite elástico o curva tensión-deformación real), a partir de ensayos de tracción y caracterización metalográfica más avanzada. Esto permitiría aumentar la precisión del modelo FEA y su correlación con los resultados físicos.

Referencias

- Anderson, T. L. (2017). *Fracture mechanics: Fundamentals and applications*. (C. Press. (ed.); 4^a edición).
- Angarita A., H. A., & Castilla P., A. C. (2023). Evaluación del comportamiento mecánico y microestructural de aceros grado AISI (304 y 1045) sometidos a endurecimiento por deformación plástica, aplicando tratamientos térmicos de temple y recocido para aplicaciones industriales. In *Universidad Francisco de Paula Santander - Ocaña* (Vol. 1). Universidad Francisco de Paula Santander - Ocaña.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. (2011). Ciencia de los materiales. In *Zeitschrift für Naturforschung - Section B Journal of Chemical Sciences* (6th ed., Vol. 6, Issue 9). <https://doi.org/10.1515/znb-1963-0911>
- ASM, I. (2002). *Fractography: Principles and practice*. (ASM International. (ed.)).
- ASM International. (2000). *ASM Handbook Volume 4: Heat Treating*.
- ASM International. (2013). *Heat treating of steels* (ASM International (ed.)).
- ASTM International. (2017). *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials (ASTM E23-17a)*. (ASTM International (ed.)).
- Bohórquez, C. A. (2012). Influencia del tratamiento térmico desde temperaturas intercríticas en las propiedades mecánicas del acero SAE 1045. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional, XXXI*, 3577–3587.
- Borchers, F., Clausen, B., Eckert, S., Ehle, L., Epp, J., Harst, S., Hettig, M., Klink, A., Kohls, E., Meyer, H., Schneider, S., & Strunk, R. (2020). Comparison of different manufacturing

processes of aisi 4140 steel with regard to surface modification and its influencing depth.

Metals, 10(7), 1–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/met10070895>

Bouchard, P., Jouguet, R., Morestin, F., & Chabanet, O. (2022). Advanced Finite Element Simulations of Material Impact Resistance: Applications in Industrial Manufacturing. *Journal of Material Processing Technology*.

Bouchard, P. O., Jouguet, R., Morestin, F., & Chabanet, O. (2022). Advanced Finite Element Simulations of Material Impact Resistance: Applications in Industrial Manufacturing. *Journal of Material Processing Technology*.

Box, G. E. P., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. (2005). *Statistics for Experimenters* (John Wiley & Sons (ed.); 2.^a ed).

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. (McGraw-Hill. (ed.); 9^a edición).

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction*. (Wiley. (ed.); 10^a ed.).

Callister Jr., W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Eng. In Wiley (Ed.), *Materials Science and Engineering: A* (10th ed., Vol. 42, Issue 1).

Cumbajin A., A. P., & Andrago A., J. C. (2022). Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. *Tesis*, 01, 1–100. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>

Davis, J. R. (1993). ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials. In *ASM International*.

Davis, J. R. (2004). *Tensile testing*. (ASM International. (ed.)).

Dieter, G. E. (2012). *Mechanical metallurgy*. (McGraw-Hill. (ed.); 3^a edición).

- Elmer, J. W., Palmer, T. A., & Babu, S. S. (2004). Direct observations of austenite, bainite and martensite formation during arc welding of 1045 steel using time-resolved X-ray diffraction. *Welding Journal*.
- García-León, R. A., Angarita-Álvarez, H., Castilla-Pérez, A., Flórez-Solano, E., Martínez-Trinidad, J., Moreno-Pacheco, L., & Gonzalez-Valle, G. (2024). Effect of Heat Treatments on the Strain Hardening Behavior of AISI 1045 and 304 Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1–16. <https://doi.org/JMEP-24-03-36184.R1>
- García-Rodríguez, A., Martínez-López, E., & Sánchez-Gómez, R. (2023). Avances en el mejoramiento de propiedades mecánicas de aleaciones de alta resistencia. *Revista Internacional de Ingeniería de Materiales*, 45 (3), 287–301.
- Grupo.us.es. (2024). *Tratamientos térmicos básicos – Prácticas Metalográficas*. <https://grupo.us.es/derematerialia/practicas-metalograficas/tratamientos-termicos-basicos/>
- Gurumurthy, B. M., Sharma, S. S., Shankar, M. C. G., Walia, R., & Agarwal, T. (2016). Study on dual-phase structure of AISI4140 steel. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(33), 1–6. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i33/93526>
- Hernández, C., & González, J. (2018). Optimización de tratamientos térmicos en aceros AISI 1020. *Revista Colombiana de Materiales*, 15(2), 45–60.
- Herrera, J. M. F., Salazar, . J. I. López, Alzate, . N. A. Navarrete, & Rivera, M. H. (2021). Tratamiento Térmico De Aceros 15B24Mod Y 4140 Para Obtener Resistencias Comparables a Las De Aceros Avanzados De Aplicacion Automotriz. 2021, June, 11.
- Ingeniosos. (2024). *Diagrama hierro-carbono*. <https://lawebdeingeniosos.com/diagrama-hierro->

carbono/

Ismail, N. M., Khatif, N. A. A., Kecik, M. A. K. A., & Shaharudin, M. A. H. (2016). The effect of heat treatment on the hardness and impact properties of medium carbon steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114(1).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012108>

Jackson, W. J. (2009). *FRACTURE TOUGHNESS IN RELATION TO STEEL CASTINGS DESIGN AND APPLICATION by ABSTRACT INTRODUCTION FACTORS OF SAFETY AND BRITTLE FRACTURE Calculation of Critical Flaw Size Subcritical Flaw Growth by Fatigue and Stress Corrosion APPLICATION OF FRACTURE MECHA* (p. 46).

Johnson, K. L., & Lee, S. H. (2021). Técnicas avanzadas de caracterización microestructural en materiales compuestos. *Journal of Materials Science*, 56(8), 4721–4735.

Krause, D., Schwarzer, S., & Heinrich, M. (2017). *Material testing machines: Principles and applications* (Springer. (ed.)).

Liu, Y. P., & Li, T. J. (2021). Application of the virtual crack closure technique (VCCT) using tetrahedral finite elements to calculate the stress intensity factor. *Engineering Fracture Mechanics*, 253(October 2020), 107853.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107853>

Macías-Delgado. (2019a). Evaluación de tratamientos térmicos en aceros de alto rendimiento. *Revista de Metalurgia*, 159, 55.

Macías-Delgado, J. (2019b). *Microestructura y propiedades mecánicas de aceros de activación reducida endurecidos mediante dispersión de óxidos*. 1–186.

<http://5C%5Chdl.handle.net/10016/29747>

Madhusudhan, D., Chand, S., Ganesh, S., & Saibhargavi, U. (2018). Modeling and simulation of Charpy impact test of maraging steel 300 using Abaqus. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 330(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012013>

Martínez, A., Pérez, M., & Torres, D. (2024). Influencia de la atmósfera de tratamiento en la formación de capas de óxido durante el recocido de aceros AISI 304. *Journal of Metallurgical Engineering*, 46(2), 112–124.

ASTM E23-18, 18 (2018).

Mejía, F., & Rodríguez, L. (2017). Tratamientos térmicos no convencionales en aceros inoxidables para la industria petroquímica. *Ingeniería y Ciencia*, 13(1), 77–89.

Mejías M., Arruti R., Cepeda I., S. P. (2010). Influencia del tratamiento térmico de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas y la microestructura de un acero inoxidable dúplex 2507 Influence of the heat treatment of aging on the mechanical properties and microstructure a stainless steel. *Revista Ingeniería UC*, Vol. 17, No. 3, Diciembre 2010 28 - 39, 17, 13. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70721962004>

Mejías M., Arruti R., & C. I. (2010). Influence of Aging Heat Treatments on the Mechanical Properties of Duplex Stainless Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(7), 1125-1134.

MONTGOMERY, D. C. (2016). Design and analysis of experiments. In I. John Wiley & Sons (Ed.), *Handbook of Reading Research* (Eighth Edi).

<https://www.researchgate.net/profile/Farshad-Fattahi/post/Need-the-procedure-for-critical->

limit-

fixation/attachment/59d6459179197b80779a0aa7/AS%3A453901993418752%401485230076186/download/Douglas-C.-Montgomery-Design-and-Analysis-of-Experiments-Wiley-2012.

Nakamura, T., Yamamoto, Y., & Tanaka, K. (2023). Relación entre microestructura y endurecimiento por deformación en aleaciones de titanio de última generación. *Acta Materialia*, 213.

Proaño Sánchez, J. E. (2018). *Análisis Forense de un Cigüeñal Mediante Técnica de Fractografía y Simulación Mediante Elementos Finitos (MEF)*. 110.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19523>

Procter, F. A., Piazzolo, S., John, E. H., Walshaw, R., Pearson, P. N., Lear, C. H., & Aze, T. (2024). *Electron backscatter diffraction analysis unveils foraminiferal calcite microstructure and processes of diagenetic alteration*. 1213–1233.

Ramírez, J., & Gómez, L. (2023). Efecto de diferentes medios de temple en aceros AISI 1020 producidos en la región andina. *Revista Colombiana de Materiales*, 12(1), 25–37.

Randle, V. (2009). Tutorial review Electron backscatter diffraction : Strategies for reliable data acquisition and processing. *Materials Characterization*, 60(9), 913–922.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.05.011>

Rethwisch, D. G., & Callister, W. D. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th Editi). Wiley.

Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley

Contenido. McGRAW-HILL, Novena edi(1), 1068.

Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. (2016). DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA DE SHIGLEY. In Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett (Ed.), *Jurnal Penelitian Pendidikan Guru Sekolah Dasar* (Décima edi, Vol. 6, Issue August). McGraw-Hill Education Holdings LLL.

Santos, J. A. F., & Vilca, M. X. S. (2020). FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA 01 Facultad de Ingeniería y Arquitectura. *Universidad Andina Del Cusco*, 1–118.
http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sato, T., & Kokubo, Y. (2016). Enhancement of corrosion resistance in stainless steels through heat treatment. *Journal of Corrosion Science*, 103, 95–105.

Sentro tech. (2016). *1200°C (2190°F) Muffle Box Lab Furnace*.

Shackelford, J. F. (2015). *Introduction to materials science for engineers (8ª ed.)* (Pearson. (ed.); 8ª edición).

Sharma, A., Gupta, R., & Patel, S. (2021). Influencia de los parámetros de temple en aceros AISI 4140. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(8), 3280–3291.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11665-021-05857-3>

Smith, J. R., Brown, A. D., & Davis, C. M. (2022). Comprehensive analysis of mechanical properties in advanced aerospace materials. . . *Materials Science and Engineering, A*, 832.

Smith, W. F. (2011). *Foundations of materials science and engineering (5ª ed.)*. (McGraw-Hill.

(ed.); 5ª edición).

Solis Romero, J., Valdés Ramírez, J., Gómez Vargas, O. A., Rodríguez Molina, A., & Jacinto

García, E. (2024). Propiedades mecánicas del acero AISI 4140 tratado térmicamente y nitrurado por plasma. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de La Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 11(22), 80–85. <https://doi.org/10.29057/escs.v11i22.12236>

Syst, D. (2022). *Dynamic Analysis*.

https://help.solidworks.com/2022/english/SolidWorks/cosmosxpresshelp/c_Dynamic_Analysis.htm

Tanaka, K., Saito, Y., & Nakamura, T. (2022). Innovación en el control microestructural durante el recocido de aceros inoxidables: Mejoras en la ductilidad y resistencia. *Journal of Materials Science and Engineering*, 58(3), 412–423.

Thompson, R. E. (2022). *Innovaciones en materiales: De la investigación a la aplicación industrial* (3ª ed.) (E. A. Springer (ed.)).

Tinius Olsen. (2024). *IT 406 model of Pendulum Impact Testing Machine From Tinius Olsen*. <https://www.tiniusolsen.com/product/model-it406/>

Totten, G. E. (2013). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies* (2nd ed.). CRC Press. (2nd ed.).

Totten, G. E. (2018). *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*. (CRC Press. (ed.)).

Varela-Castro, G., Cabrera, J.-M., & Prado, J.-M. (2020). Critical strain for dynamic recrystallisation: The particular case of steels. *Metals*.

Wallin, K. (2021). Critical assessment of the Rolfe–Novak CVN-K_{IC} upper-shelf correlation.

Engineering Fracture Mechanics.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107137>

Weber, H., & Schmidt, F. (2023). Tratamientos térmicos intercríticos en aceros inoxidables:

Aumento de la tenacidad en AISI 304. *Materials Science and Technology Journal*, 39(2), 245–258.

Zhang, L., & Patel, N. (2024). Simulación multiescala del comportamiento de materiales bajo condiciones extremas. *Computational Materials Science*, 218, 94–101.

Apéndice A. Registro fotográfico – tratamientos térmicos



Apéndice b. Registro fotográfico – ensayos de impacto

