

[201002] Protocolo para la valoración del comportamiento del acero 304 y el aluminio 1060 tras simulación del proceso de deformación en frío

Valentina Guerra Payares ^{1 a,c}, Zayda Jisell Sandoval Díaz ^{2 a,c}, Andrea Catalina
Zarta Guativa ^{3 a,c},

Martha Ruth Manrique Torres ^{b,c}, Yenny Alexandra Paredes Astudillo ^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen

En este estudio se sometieron a esfuerzos de tensión y compresión probetas de acero 304 y aluminio 1060, aplicando fuerzas teóricas de las operaciones de laminado, extrusión y embutido. A partir de un análisis de elementos finitos del software SolidWorks® se determinó el comportamiento de los materiales y se estableció un rango de validez entre la deformación plástica y el límite de ruptura, esto fue la base para establecer el protocolo y construir la herramienta que muestra la fuerza necesaria para realizar la deformación volumétrica deseada de las operaciones de laminado, extrusión y embutido. Los resultados muestran, que al comparar ejercicios tradicionales con los resultados de la herramienta se obtuvo una precisión del 89% para el laminado, 99% para la extrusión y 99% para el embutido utilizando un rango de deformación plástica para el acero 304 y el aluminio 1060 de [356 MPa – 1476 MPa] y [45 MPa – 211 MPa] respectivamente.

Palabras clave: Simulación, Método de elementos finitos, límite elástico, límite de tracción, deformación en frío, endurecimiento por deformación.

Assessment protocol to understand the behavior of steel 304 and aluminum 1060 after simulating a cold strain process.

Abstract: In this research, graduated cylinders containing steel 304 and aluminum 1060 were subjected to compression and tensile strengths, through the implementation of the theoretical forces of the rolling, extrusion and deep drawing processes. Through the finite element analysis of the software SolidWorks® it was possible to determine the material's behavior and establish a validity range between plasticity and the ultimate tensile strength, which served as base to establish the protocols to make the tool necessary to show the required force to conduct the desired volumetric strain of the rolling, extrusion and deep drawing processes. The study shows that, by comparing traditional exercises to the tool results, the precisions were: 89% for rolling, 99% for extrusion and, 99% for deep drawing. These results were obtained by using plasticity ranges of [356 MPa – 1476 MPa] for steel 304, and [45 MPa – 211 MPa] for aluminum 1060.

Keywords: Simulation, Finite element analysis, elastic limit, maximum tractive effort, cold strain, work hardening.

1. Justificación y planteamiento del problema

Los metales hacen parte de los materiales más utilizados en la industria por sus propiedades y métodos de procesamiento. Al momento de procesar un metal es importante conocer cómo este proceso afecta sus propiedades, dado que se pueden generar cambios en su estructura física y en consecuencia en sus propiedades mecánicas. De esta manera, la relación entre la estructura, propiedades y el procesamiento del metal van de la mano al momento de aplicar procesos en la industria. [1]

Al considerar las propiedades de estos materiales, se debe tener en cuenta su ordenamiento atómico y la estructura cristalina, estudiando su microestructura y la relación entre las propiedades químicas y mecánicas. Esto es clave en sus aplicaciones, ya que son materiales que deben ser sometidos a varios métodos de producción con el fin de obtener distintas formas. Además, para el procesamiento del metal es necesario un estudio del tamaño de grano, espesor y acabado superficial, por medio de una comparación de las especificaciones requeridas para cada uso. Entre los procesos industriales que afectan el estado inicial de estos, se destacan procesos de manufactura como, la fundición, la laminación, la extrusión, el trefilado, el embutido, entre otros.

Asimismo, se debe tener en cuenta que al conocer el rango de deformación del metal se pueden evitar fracturas y, por consiguiente, mejorar la calidad, el ciclo de vida y las posibles pérdidas del material en el proceso. De acuerdo con investigaciones, altos niveles de deformación en frío generan fracturas en el producto final y, por lo tanto, realizar un debido análisis de los factores en este tipo de deformación determina el ciclo de vida en su aplicación. Por esta razón, se busca determinar los niveles requeridos de las variables que afectan el proceso de deformación volumétrica.

En la industria, el acero, el aluminio y el latón se caracterizan por estar presentes en diferentes sectores de manufactura como el sector automotriz, químico, alimentario, entre otros. El uso del acero ha aumentado en la industria automotriz para la fabricación de piezas como tornillos, pernos y tuercas debido a su alta maquinabilidad [2]. De igual forma, el acero inoxidable posee una buena resistencia a la corrosión atmosférica y se emplea representativamente en la industria química, alimentaria y médica [3]. Asimismo, el aluminio es el elemento metálico más abundante de la corteza terrestre, su mineral principal es la bauxita (óxido de aluminio hidratado) y comercialmente se utiliza para recipientes, conductores eléctricos, componentes aeroespaciales y automotrices [4]. También, una de las aleaciones más relevantes del mercado es el latón, compuesto de cobre y zinc, dada su elevada resistencia a la corrosión, ductilidad y resistencia mecánica. Sus principales aplicaciones son la elaboración de la bisutería, elementos de decoración, llaves, entre otros [5].

De acuerdo con la Asociación Colombiana de Industriales (ANDI), el 51% de la demanda de aluminio se consumió en los sectores de transporte y construcción, y el 49% se dividió en distintos usos finales, entre los que destacan el sector eléctrico y de maquinarias en 2017 [6]. Además, la industria nacional sigue cubriendo casi el 90% de sus necesidades de aceros inoxidables con apenas dos o tres tipos de estas aleaciones (aceros y latones), siendo el AISI 304 el más representativo de este grupo de aleaciones [3]. Así mismo, en la última Encuesta Anual de Manufactura (EAM) registrada por el DANE en el 2018 se encontró que el acero inoxidable 304 y 12L-14 tuvieron una producción bruta de aproximadamente 30 mil millones de gramos, el aluminio de 9 mil millones y el latón de 4 mil millones (*Ver Anexo 1*). Dada la representación en el mercado, la producción y el bajo costo, el acero inoxidable 304 y el aluminio 1060 serán utilizados en este estudio [7].

Los materiales como el acero inoxidable 304 y el aluminio 1060 se deben someter a deformaciones volumétricas con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas y dar un buen acabado superficial. En el área de manufactura es importante conocer los valores que deben tomar las variables que afectan el proceso de endurecimiento en frío, como la cantidad de deformación previa, el tiempo y las propiedades mecánicas con el fin de evitar posibles fracturas.

Las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados, acero inoxidable 304 y aluminio 1060, se presentan en la tabla 1 respectivamente. Estas propiedades están vinculadas con las fuerzas exteriores que se ejercen sobre ellos. Las propiedades que se deben tener en cuenta son: resistencia a la tracción, que hace referencia al valor máximo de tensión en el diagrama tensión-deformación convencional; el esfuerzo de fluencia, que es el esfuerzo

que puede causar la fractura en una prueba de fluencia (esfuerzo de ruptura) en un tiempo dado, en un ambiente específico y a una temperatura determinada; la dureza, es la medida de la resistencia de un material a la deformación permanente; y la elongación, es el porcentaje de alargamiento que una probeta a tracción soporta durante el ensayo [8].

Tabla 1. Propiedades mecánicas acero inoxidable 304 y aluminio 1060. Fuente: AISI [9], ASTM [10].

Propiedades mecánicas				
Material	Resistencia a la tracción (MPa) \geq	Esfuerzo de fluencia (MPa) \geq	Elongación (%)	Condiciones
Acero 304	860	655	25	Estirado en frío de
Aluminio 1060 H12	124	97	4	Trabajo en frío

El uso del método de elemento finito (FEM) contribuye a la indagación de procesos de conformado de metales, permitiendo un análisis detallado del material, respaldando un diseño óptimo por medio de la simulación. Algunos de los procesos llevados a cabo son: análisis de tensiones e influencia de los parámetros en la operación. Estas simulaciones contribuyen a la reducción de costos y tiempos, lo que permite diseñar, modificar y cambiar la forma en las geometrías fácilmente [7].

Para la aplicación de FEM se utilizan programas como SolidWorks®, que facilita realizar estudios estáticos para calcular desplazamientos, fuerzas de reacción, deformaciones unitarias, tensiones y distribución del factor de seguridad. Se encuentra en SolidWorks® una herramienta de simulación y análisis que permite la construcción del modelo, ejecutar diferentes pruebas sobre el prototipo y evaluación de los resultados [11] [12].

La industria metalmeccánica colombiana ha aumentado su consumo en los últimos 4 años hasta un 49% y se espera que continúe en aumento al establecer nuevos acuerdos comerciales [13]. Este incremento ha ocasionado que las empresas se enfrenten a brechas tecnológicas en automatización industrial, impuestos y dificultad para acceder a fuentes de apalancamiento financiero, lo que ha impedido que aumenten su competitividad elaborando productos en poco tiempo, de calidad y con bajos costos. De igual manera, requiere trabajar en producción y productividad en un 44%, competitividad en un 8%, tecnología en un 12%, oportunidades en el sector 26% y talento humano en un 10%. Esto nos indica que una empresa debe hacer uso de la tecnología y contar con el mejor talento humano para enfrentarse a países desarrollados como Corea y China, donde se ofrecen productos baratos a partir de una mano de obra más económica [14].

Teniendo en cuenta las propiedades de los materiales explicadas anteriormente, en este estudio se aplicará un modelo basado en el Método de Elementos Finitos que permita probar el efecto de la deformación en frío sobre las propiedades mecánicas del acero 304 y el aluminio 1060, mediante el cual se considera la tensión, la compresión y el límite de ruptura. Finalmente, se generará un protocolo que se espera sirva de herramienta de apoyo en el sector industrial y permita tener una referencia para la toma de decisiones frente a la fuerza requerida para operaciones de deformación volumétrica, de esta forma pretende evitar pérdidas en el tiempo de producción, pérdidas económicas por ruptura del material y una reducción en el ciclo de vida del producto final.

2. Antecedentes

La deformación volumétrica en metales, es un proceso físico mediante el cual se modifican las propiedades físicas y mecánicas de un material, al fabricar elementos según la necesidad; algunos de estos procesos son forja, laminado, extrusión, fundición, trefilado, embutición, doblado, entre otros. Desde la revisión en la literatura, se encontró que la aplicación de la deformación en caliente se realiza con el objetivo de determinar la resistencia a la deformación plástica y fracturas en metales. Mientras que la deformación en frío es realizada para determinar la resistencia a la ductilidad en deformaciones por debajo de la temperatura de fusión [15].

Según Smith, la deformación en frío permite crear nuevas dislocaciones que interactúan con las dislocaciones iniciales de los metales y, como consecuencia, la densidad aumenta generando endurecimiento del material.

Este proceso, además afecta otras propiedades como la ductilidad, la resistencia a la tracción, la dureza y el tamaño de grano [8]. El tamaño del grano se ve afectado dado que al finalizar este proceso se encuentran en un estado distorsionado. Adicionalmente, se relaciona la acritud, la cual es una propiedad intrínseca de los metales que por efecto de la deformación en frío presenta mayor dureza a menor espesor [16].

Un enfoque de interés es el endurecimiento de los metales bajo las condiciones de deformación con una temperatura menor a la de recristalización. Algunos autores buscan establecer cómo varían los métodos de endurecimiento de acuerdo a la composición del material y el envejecimiento [17]; esto se realiza por dislocación, por precipitación, endurecimiento de grano, entre otros. De igual manera permite identificar que existe una influencia del tiempo de envejecimiento expuesto en el método utilizado, es decir, cuando se expone una aleación al calor, luego se somete a un proceso de templado y posteriormente se envejece para formar un precipitado finamente disperso. El tiempo en el que se deja el material luego de templarlo logra mejorar las condiciones iniciales de endurecimiento, por lo que es mejor que los otros métodos evaluados.

Asimismo, la dureza es una propiedad de interés dado que cuando se somete un metal a deformación en frío el material genera mayor resistencia a la deformación permanente, de tal manera que se evalúan métodos para mejorar la dureza incrementando a una tasa determinada, la presión y el diámetro de la probeta hasta obtener una reducción del material de un porcentaje específico [18]. [De acuerdo con la revista de tecnología de procesamiento de materiales, se determinó que las probetas de acero AISI 304L laminadas en frío a un 90% de deformación, incrementaron su dureza hasta 600 Vickers y la resistencia mecánica del material de 300 a 1825 MPa \[3\] \[19\].](#) También, se realizan ensayos de deformación para comparar las condiciones iniciales de dureza de un metal con las condiciones luego de pasar por el proceso de deformación, y se logra determinar que dependiendo del tamaño de grano y los mecanismos de endurecimiento por dislocación, existe un incremento de dureza luego de someterse a estos procesos [20]. Por otra parte, en estos ensayos también se identifica como variable externa la fuerza de fricción de la máquina utilizada, puesto que al ser reducidas permite alcanzar el reblandecimiento del material [21].

Conviene señalar que el objetivo de las investigaciones previamente mencionadas radica en analizar el impacto de uno o más factores sobre una variable de interés, para lo cual es conveniente implementar el Método de Elementos Finitos (FEM) para así determinar el comportamiento mecánico de los materiales. Esta es una técnica numérica basada en ecuaciones diferenciales para analizar diseños de ingeniería y está aceptado como el método de análisis estándar, el cual divide el modelo en numerosas piezas pequeñas de formas simples llamadas "elementos", que a su vez comparten puntos comunes denominados "nodos". El proceso de división del modelo en pequeñas piezas se denomina mallado. Cada nodo está descrito en detalle por un cierto número de parámetros, según el tipo de análisis o del elemento utilizado [1] [12].

De acuerdo con la literatura se ha evidenciado que utilizar FEM para analizar el comportamiento de aluminios tiene un alto grado de validez con respecto a pruebas experimentales. Se puede evidenciar en el análisis del comportamiento del aluminio 1080, en donde se concluye que se puede utilizar este método satisfactoriamente para investigar la distribución efectiva de esfuerzo mediante varios procesos de deformación [22]. Además, se encontró el análisis de una falla en una tuerca de latón (Cu-Zn), utilizando elementos finitos que estableció un esfuerzo máximo en la región de ruptura y se pudo determinar que este tipo de fractura fue inducida mediante la descincificación de la zona de ruptura final, que es bien conocida en aleaciones de este tipo [23] [24].

En un estudio se llevó a cabo varias pruebas de deformación gradual utilizando FEM, con el fin de elaborar las curvas de esfuerzo real vs. deformación real de dos tipos de láminas de acero en tres direcciones de rolado y sus propiedades mecánicas. Se desarrollaron las curvas de la variación módulo de Young vs. deformación verdadera, y muestran una reducción del 16% en el módulo de elasticidad con los incrementos de deformación. El resultado de este estudio evidencia que la variación del módulo de elasticidad puede incrementar la precisión en la predicción de variables de interés, como el springback [25].

En síntesis, con el fin de abordar los aspectos mencionados, se busca desarrollar pruebas de deformación gradualmente a metales hasta antes del punto de fractura. Con los resultados obtenidos, se analizará la fuerza requerida para la deformación del material teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas, como módulo elástico, límite de tracción, límite elástico, entre otros, para encontrar las relaciones entre las variables que inciden en el proceso de deformación. Por esta razón, se propone diseñar un protocolo que permita al usuario

tener un elemento de criterio para seleccionar los parámetros de deformación volumétrica, que relacione el porcentaje de reducción en el proceso de conformado en frío con el comportamiento mecánico del material.

3. Objetivos

Objetivo general:

Elaborar un protocolo para el comportamiento mecánico del acero 304 y el aluminio 1060, a partir de su porcentaje de deformación en frío, basado en simulaciones por elementos finitos.

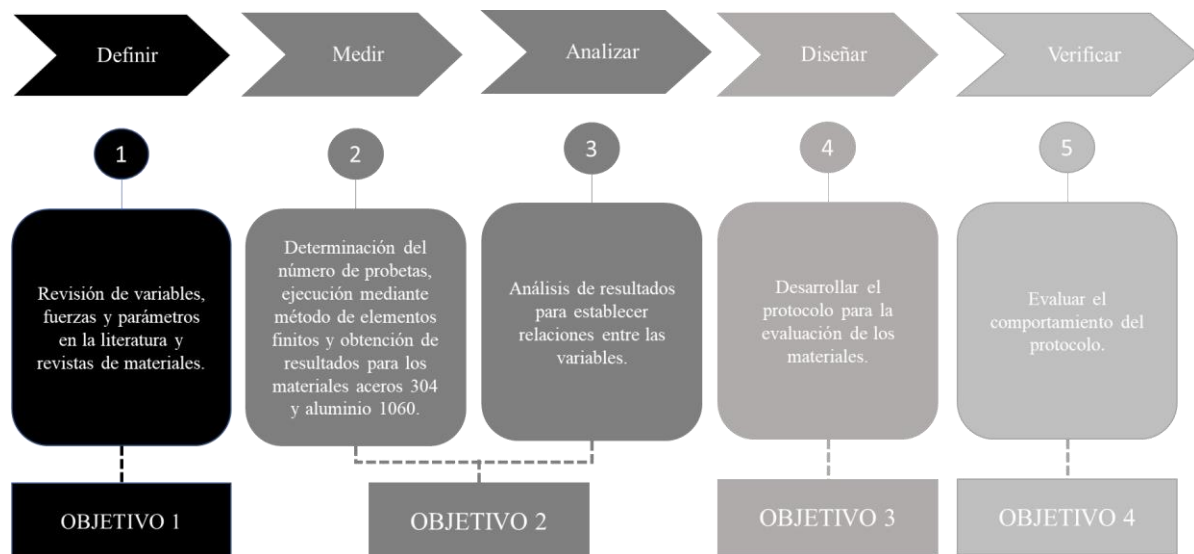
Objetivos específicos:

1. Identificar las variables que intervienen en los procesos de deformación en frío para los materiales seleccionados.
2. Establecer un procedimiento que relacione las variables que intervienen en el proceso de deformación en frío, identificadas en las simulaciones por elementos finitos y la literatura encontrada, del acero 304 y el aluminio 1060.
3. Realizar un protocolo de manera detallada para el proceso de deformación en frío del acero 304 y el aluminio 1060.
4. Evaluar el impacto del uso del protocolo para una operación específica.

4. Metodología

La ilustración 1 representa las fases de la metodología establecidas para la elaboración del protocolo, y así cumplir con los objetivos específicos determinados.

Ilustración 1. Metodología para el cumplimiento de los objetivos. Fuente propia.



Etapa 1. Definir

La primera fase de esta metodología está enfocada en el cumplimiento del primer objetivo específico y el resultado asociado a este será establecer las operaciones más utilizadas en la manufactura, las fuerzas correspondientes a estas operaciones y los parámetros de cada material para el proceso de deformación en frío.

En el proceso de deformación en frío, se tienen en cuenta los ensayos de tensión y compresión. Según Groover, el esfuerzo de tensión es el procedimiento más utilizado para analizar la relación entre las fuerzas y la deformación para los metales. Este ensayo consiste en aplicar una fuerza determinada para estirar el material, reduciendo su diámetro y aumentando su longitud. Mientras que el esfuerzo de compresión consiste en aplicar una fuerza determinada para comprimir el material, aumentando el diámetro conforme se ejerce esta fuerza.

A partir de estos esfuerzos y de la información en la literatura, se seleccionan las operaciones de deformación en frío más utilizadas en la industria: extrusión, laminado y embutido. El proceso de extrusión consiste en ejercer una compresión con un pistón sobre un lingote en bruto y forzarlo a fluir por un lado adoptando la forma del mismo; el proceso de laminado en frío ejerce una carga de compresión al material, por medio de dos rodillos que giran apretando la pieza y buscan reducir el espesor de la misma; y el proceso de embutido realiza una deformación volumétrica de compresión de un punzón que tiene la forma deseada sobre el material. De acuerdo con la operación utilizada en estos materiales, se pueden obtener productos como muebles, tubos de escape, electrodomésticos, tapas, latas, ollas, marcos para puertas, entre otros [26].

Las propiedades mecánicas determinan el comportamiento de los materiales luego de estar sometidos a procesos de deformación en frío, por lo que son utilizadas como datos de procesamiento para el desarrollo del protocolo. Para el proceso de conformado en frío se consideran las propiedades de módulo elástico, límite elástico y límite de tracción, de acuerdo con las variables de entrada permitidas por el software de FEM, SolidWorks® (Ver tabla 4).

Etapas 2 y 3: Medir y Analizar

Las etapas 2 y 3 se enfocan en el cumplimiento del segundo objetivo específico y el resultado asociado a estas será establecer toda la base experimental mediante la cual se establece la interacción de los parámetros y variables identificados en la fase previa.

La etapa 2 se centra en la ejecución de las simulaciones en SolidWorks® para cada material teniendo en cuenta los rangos de fuerzas obtenidas en la literatura para cada una de las operaciones seleccionadas, al igual que los rangos en los cuales varían las propiedades seleccionadas del material; es así como se tiene en cuenta el valor máximo, mínimo y promedio para el módulo elástico, el límite elástico y el límite de tracción (Ver tabla 2 y 3).

Tabla 2. Tabla de fuerzas para las operaciones de extrusión, laminado y embutido.

Referencia		Operaciones	Unidades	Materiales					
Acero 304	Aluminio 1060			Fuerza Acero 304			Fuerza Aluminio 1060		
				Máximo (1)	Intermedio (2)	Mínimo (3)	Máximo (1)	Intermedio (2)	Mínimo (3)
[27]	[28]	Extrusión (1)	N	250000	150000	50000	715147	656691	598236
[29]	[27]	Laminado (2)	N	297000	152500	8000	10748	7735	4723
[30], [31]	[32]	Embutido (3)	N	194946	111964	28981	66378	40235	14091

Tabla 3. Propiedades mecánicas del acero 304 y el aluminio 1060.

Referencia		Propiedades mecánicas	Definición	Unidades	Materiales	
Acero 304	Aluminio 1060				Acero 304	Aluminio 1060
[33]	[34]	Módulo elástico	Permite identificar el campo elástico, en el cual existe una correlación lineal entre las tensiones y deformaciones.	N/mm^2	[190000-210000]	[67665 - 71000]
[35]	[36]	Límite de tracción	Es determinado por la carga máxima que puede soportar el material antes de romperse.	N/mm^2	[520-750]	[67-130]
[35]	[37]	Límite elástico	El punto máximo de esfuerzo que soporta el material antes de sufrir deformación permanente.	N/mm^2	[195-230]	[13 - 35]

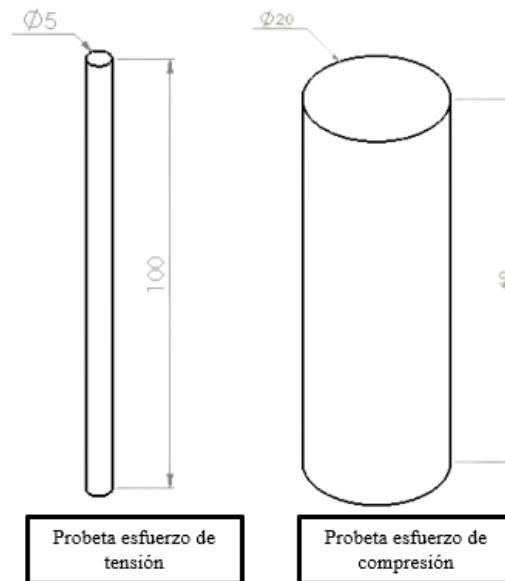
Posteriormente, se establecieron combinaciones entre los valores de las propiedades mecánicas de los materiales con el fin de establecer las probetas a las cuales se les aplica FEM, y sobre las cuales interactúan las fuerzas. Se determinaron 27 probetas para cada material (Ver anexo 2), y por cada probeta se realizaron 18 simulaciones combinando las fuerzas (máxima, promedio, mínima), las operaciones (extrusión, laminado, embutido) y los esfuerzos (tensión, compresión), obteniendo como resultado un total de 972 pruebas (Ver tabla 4).

Tabla 4. Simulaciones realizadas para una probeta de acero 304. Fuente: Propia.

Acero 304	Probeta 1	Tensión	Extrusión	F1: 250000 N
				F2: 150000 N
				F3: 50000 N
			Laminado	F1: 297000 N
				F2: 152500 N
				F3: 8000 N
	Embutido	F1: 194946 N		
		F2: 111963 N		
		F3: 28981 N		
	Probeta 2	Compresión	Extrusión	F1: 250000 N
				F2: 150000 N
				F3: 50000 N
Laminado			F1: 297000 N	
			F2: 152500 N	
			F3: 8000 N	
Embutido	F1: 194946 N			
	F2: 111963 N			
	F3: 28981 N			

Una vez establecido el número de pruebas, se procede a crear en el programa SolidWorks®, las probetas con las variaciones de las propiedades, y de esta manera, ejecutar las fuerzas de las operaciones. Posteriormente, se construyeron las piezas para cada uno de los esfuerzos. Para el esfuerzo de tensión se utilizan piezas de 5 mm de diámetro y 100 mm de largo; para compresión se utilizan piezas de 20 mm de diámetro y 60 mm de largo de acuerdo con la norma ASTM E8 para tensión y ASTM E9 para compresión. (Ver ilustración 2).

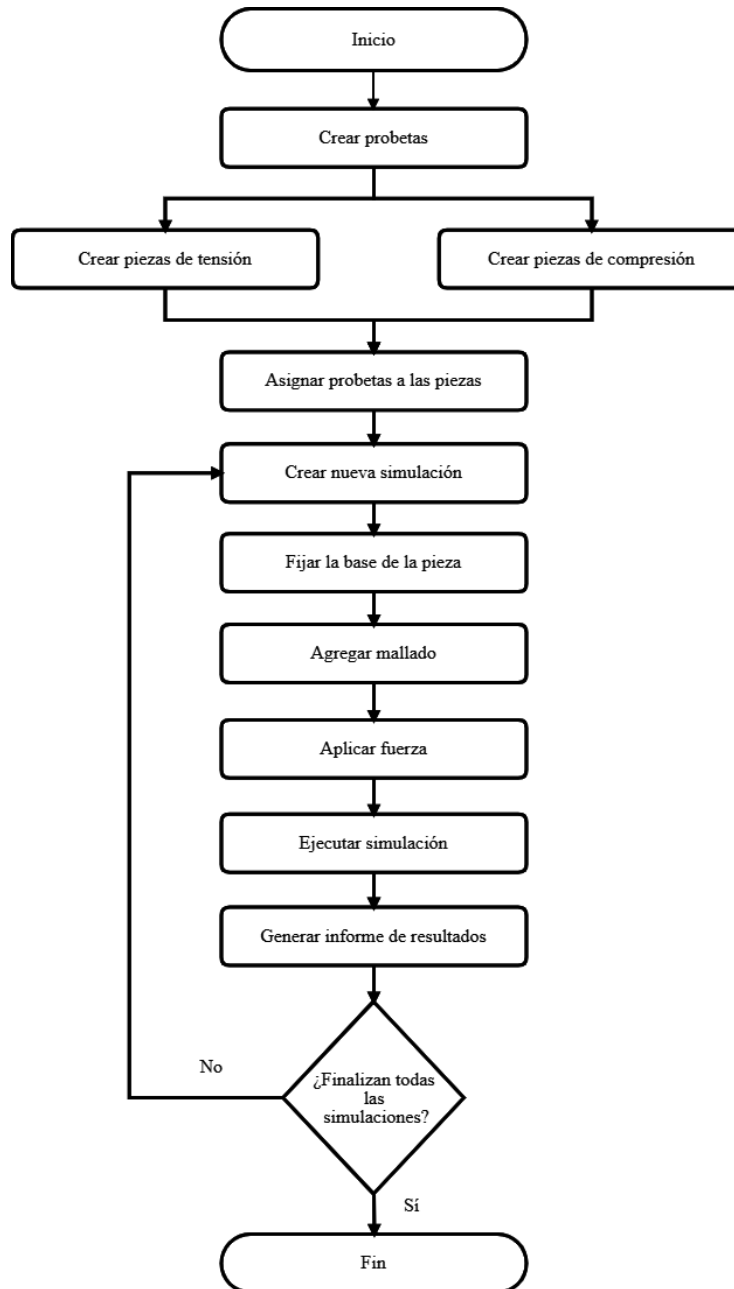
Ilustración 2. Dimensiones de las probetas de tensión y compresión. Fuente: Propia.



En la ilustración 3, se explican los pasos para ejecutar el proceso de simulación para las probetas, abarcando desde la creación del material en SolidWorks® hasta el informe final, resultado de la simulación. Una vez generadas las simulaciones para las probetas en todos los escenarios, se consolidan los resultados en función del tipo de material y del tipo de ensayo (Ver anexo 3 y 4).

En el programa SolidWorks® primero se crearon las piezas teniendo en cuenta las dimensiones para cada tipo de esfuerzo (tensión y compresión). Luego, a cada probeta se le asignaron las propiedades mecánicas, determinadas a partir de la combinación de módulo de elástico, límite de tracción y límite elástico. Posteriormente, para crear la simulación, la cara inferior de la probeta se configuró como geometría fija, generando un soporte para la pieza. El siguiente paso fue agregar la malla, que comprende segmentar la pieza en pequeñas partes, permitiendo un análisis detallado. Después, se aplica la fuerza dependiendo de cada operación (extrusión, laminado y embutido), donde se empleó una carga positiva para el esfuerzo de tensión y negativa para la compresión. Finalmente, se corre la simulación, seleccionando “ejecutar análisis”, lo cual generó tres resultados: tensiones, desplazamientos y deformaciones unitarias. Para el análisis se utilizaron los resultados de tensión. Al finalizar las simulaciones se descarga el informe seleccionando “Informe” y “Publicar”.

Ilustración 3. Pasos de simulación en SolidWorks® para las probetas de tensión y compresión.



La etapa 3 se centra en consolidar y procesar los datos para establecer la relación de esfuerzo y deformación para los materiales. La consolidación consta de tabular los resultados de las pruebas por cada material y por cada ensayo; y el procesamiento de datos consta de categorizar la información de acuerdo con su comportamiento y validez para finalmente determinar los rangos de operación, de acuerdo con el límite elástico y el límite de ruptura.

Inicialmente se tiene en cuenta el informe generado por el programa de simulación para el análisis de la información, el cual evalúa la deformación con el criterio de Von Mises. Este está basado en la teoría de energía de la distorsión máxima, la cual establece que un material dúctil comienza a ceder cuando la tensión de Von Mises es igual al límite elástico. Seguidamente, se categoriza cada fuerza de las operaciones de deformación,

de acuerdo con los ensayos de tensión y compresión para cada material. Luego, se agrupa por cada operación y fuerza para determinar la escala de Von Mises correspondiente, y se identifica que la escala se repite en función de la fuerza aplicada, es decir, no se ve afectada por las variaciones de las propiedades de las probetas. Finalmente, se calcula la fuerza ejercida sobre el área de la pieza para identificar el esfuerzo de cada ensayo y se descartan aquellos valores en los cuales no se genera deformación permanente (Ver tabla 5). **Es importante resaltar, que los resultados obtenidos por las simulaciones FEM arrojan resultados únicos para las condiciones específicas de cada probeta.**

Tabla 5. Consolidación de datos.

Material	Tensión	Extrusión	Mínima	Validación de deformación de acuerdo a la escala de Von Mises
			Promedio	
			Máxima	
		Laminado	Mínima	
			Promedio	
			Máxima	
	Compresión	Embutido	Mínima	
			Promedio	
			Máxima	
		Extrusión	Mínima	
			Promedio	
			Máxima	
Laminado	Mínima			
	Promedio			
	Máxima			
Embutido	Mínima			
	Promedio			
	Máxima			

Etapa 4: Diseñar

La etapa 4 se enfoca en el cumplimiento del tercer objetivo específico y el resultado asociado a esta es una herramienta en la cual se evidencia el desarrollo del protocolo para el proceso de deformación en frío. Se espera que la elaboración de la herramienta sirva para establecer el comportamiento del acero 304 y el aluminio 1060 para los procesos de extrusión, embutido y laminado, indicando al usuario la fuerza para lograr el porcentaje de deformación deseado. Para la elaboración de la herramienta, se considera la relación de esfuerzo y deformación resultante de la etapa 3, y los parámetros de entrada que corresponden a las condiciones de deformación volumétrica de cada operación.

Para las operaciones de extrusión y laminado se utilizan las constantes K y n , la cuales son inherentes al material. K es el esfuerzo mínimo requerido para que el material alcance deformación permanente, en el caso de este estudio se determina a partir de la experimentación y los resultados de la fase anterior. Por otra parte, n es el exponente de endurecimiento por deformación, en el caso de este estudio se toma como un valor teórico. En la operación de laminado, tiene gran influencia el coeficiente de rozamiento μ debido que a partir de este se determina la máxima reducción posible en una pasada, en el caso de este estudio se toma como referencia un valor teórico para cada material, asumiendo que el rodillo de laminado es de acero.

Para la operación de embutido, se utiliza la constante TS la cual es la resistencia a la tracción, que en el caso de este estudio se determina a partir de la experimentación y los resultados de la fase anterior. Una vez definidas las constantes para cada operación se identifican las relaciones para soportar la herramienta (Ver tabla 6 y 7).

Tabla 6. Ecuaciones de las operaciones de extrusión, laminado y embutido.

Extrusión		
Relación de extrusión (r)	$r = \frac{A_0}{A_f}$	Ecuación 1
Deformación real (e)	$\epsilon = Ln(r)$	Ecuación 2
Esfuerzo de fluencia promedio (Y)	$\bar{Y} = \frac{K * \epsilon^n}{1 + n}$	Ecuación 3
Presión por extrusión indirecta (pi)	$P_i = \bar{Y} * \epsilon$	Ecuación 4
Fuerza del pistón (F)	$F = P_i * A_0$	Ecuación 5
Esfuerzo (σ)	$\sigma = \frac{F}{A_f}$	Ecuación 6
Laminado		
Draft (D)	$D = T_0 - T_f$	Ecuación 7
Reducción (r)	$r = \frac{D}{T_0}$	Ecuación 8
Draft máximo (Dmax)	$D_{max} = \mu^2 * Radio$	Ecuación 9
Número de pasadas	$\# Pasadas = \frac{D}{D_{max}}$	Ecuación 10
Deformación real (e)	$\epsilon = Ln\left(\frac{T_0}{T_f}\right)$	Ecuación 11
Longitud de contacto (L)	$L = \sqrt{Radio * (T_0 - T_f)}$	Ecuación 12
Fuerza necesaria (F)	$F = P * w * L$	Ecuación 13
Embutido		
Relación de embutido (DR)	$D_r = \frac{D_b}{D_p}$	Ecuación 14
Reducción (r)	$r = \frac{(D_b - D_p)}{D_b}$	Ecuación 15
Fuerza de embutido (F)	$F = \pi * D_p * t * TS * \left(\frac{D_b}{D_p}\right) - 0,7$	Ecuación 16

Tabla 7. Parámetros de las operaciones de extrusión, laminado y embutido.

Operación	Entrada	Símbolo
Laminado	Espesor inicial	T_0
	Espesor final	T_f
	Ancho de la lámina	W
	Radio del rodillo	R
Embutido	Diámetro de la forma inicial	D_b
	Diámetro del punzón	D_p
	Espesor original de la forma	t
Extrusión	Lado del tocho	L
	Espesor del dado	w
	Lado exterior Perfil U y L	a
	Base perfil U y L	b
	Lado interior del perfil U	c

La herramienta se elaboró con programación *Visual Basic* de Excel ® siguiendo el diagrama de flujo de la ilustración 4. Al usuario le permite escoger entre los materiales de este estudio y las operaciones de deformación mencionadas. Posteriormente, en función de la operación se le solicitan los parámetros de entrada y finalmente, da como resultado la fuerza necesaria para lograr la deformación requerida. Para la operación de laminado, da como resultado la fuerza necesaria para cada una de las pasadas en caso de ser necesario.

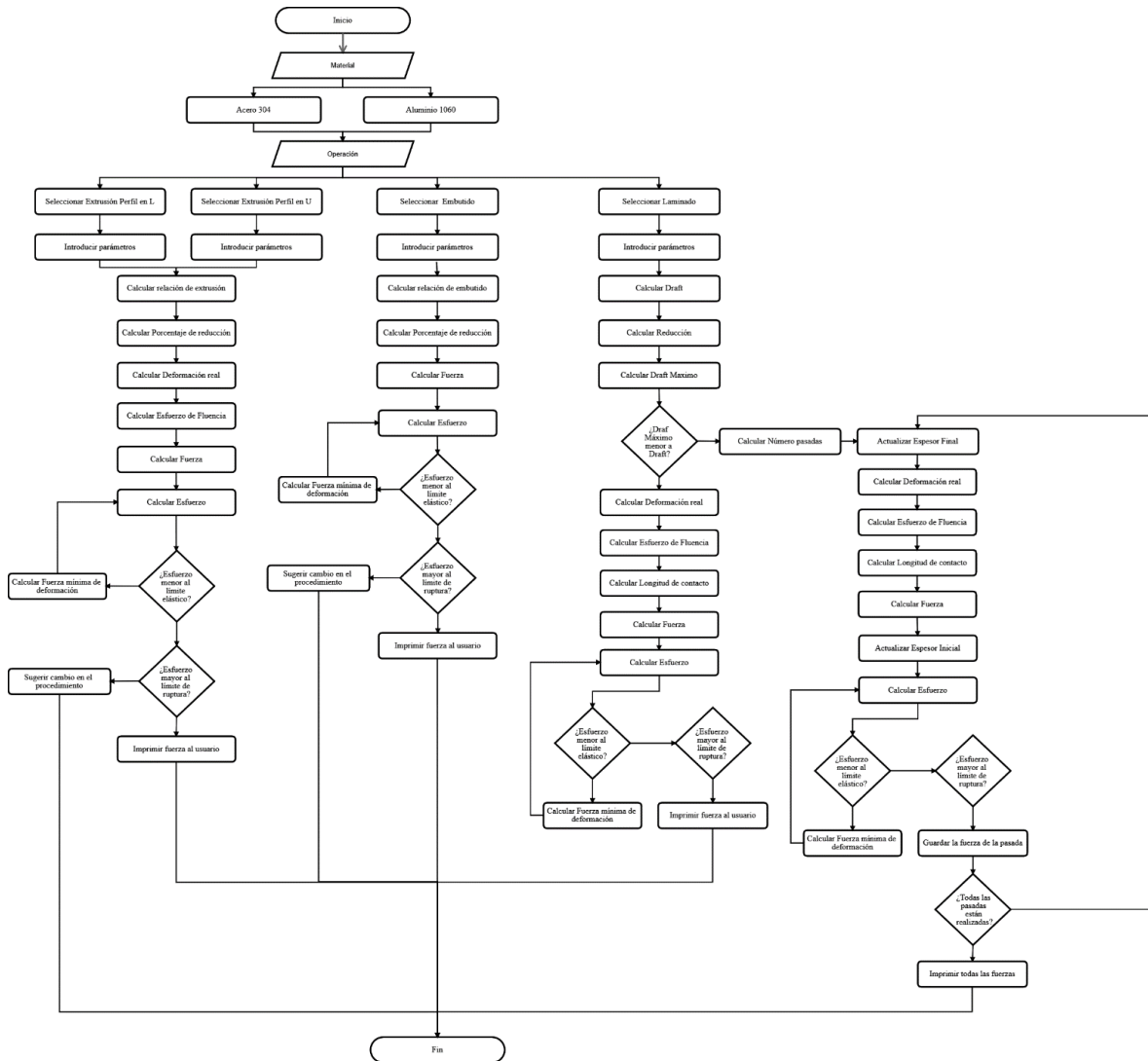
Requerimiento de desempeño:

- Interfaz amigable con el usuario.
- Establece las relaciones entre los parámetros de entrada y el porcentaje de deformación en frío para cada material.
- Establece el rango de deformación permanente del material.

Restricciones de la herramienta:

- Funciona en escenarios de deformación en frío.
- Únicamente aplicable para los materiales acero 304 y aluminio 1060.
- Está enfocado principalmente en la industria metalmecánica.
- La herramienta permite la operación de extrusión únicamente en perfiles U y L. Adicionalmente, está limitada a que el tocho está dado por un área cuadrada.
- Funciona únicamente para extrusión indirecta.
- La operación de embutido se limita a una forma y un punzón circular.

Ilustración 4. Diagrama de flujo del funcionamiento de la herramienta.
 Nota: Para una mejor visualización (Ver anexo 7)



Etapa 5: Verificar

La etapa 5 se enfoca en el cumplimiento del cuarto objetivo, y el resultado asociado a esta es la validación e impacto del comportamiento de la herramienta con respecto a las operaciones de extrusión de perfiles en L y U, de laminado y embutido para el acero 304 y el aluminio 1060. La validación se realiza mediante la comparación del resultado de la herramienta en escenarios planteados en el ámbito académico, verificando la precisión y la coherencia dimensional. Adicionalmente, se utiliza el método AHP que permite realizar comparaciones entre los pares de elementos, que en este caso son cálculos con la herramienta y cálculos manuales, a partir de esto se construyen matrices para establecer el peso entre los criterios seleccionados (tiempo y precisión). El peso de cada alternativa respecto a cada uno de los criterios representa el resultado de la priorización de las alternativas [38].

5. Resultados

Identificación de las variables del proceso de deformación en frío

Como resultado de las etapas 1, 2 y 3 del apartado de metodología se establece el rango de comportamiento del material en términos del límite elástico, el coeficiente de resistencia y la resistencia a la tracción. De esta manera, el esfuerzo aplicado a los materiales está restringido al rango de comportamiento en el que se deforme de manera permanente. (Ver anexo 5 y 6).

Relación de las variables que intervienen en el proceso de deformación en frío

El rango de comportamiento para cada material se determina a partir de los valores obtenidos en la simulación. Se realiza un análisis que incluye los esfuerzos por cada ensayo y el criterio de Von Mises para cada una de las operaciones. En primera instancia, se establece un rango sin criterio y a partir de este se realiza una primera comparación entre el valor mínimo y el límite elástico del material, lo cual permite discriminar los primeros valores garantizando que se produce deformación plástica. Entendiendo el coeficiente de resistencia K como el valor de esfuerzo mínimo que se le puede aplicar a un material para que tenga deformación permanente, se escoge el mínimo valor de los primeros datos discriminados.

Por último, se realiza una verificación de los máximos valores en función de la resistencia a la tracción del material. Se evidencia que muchos valores de esfuerzo se encuentran significativamente por encima del valor de resistencia a la tracción teórico por lo que esos valores se descartan para el desarrollo de la herramienta. Se escoge el valor más cercano a la deformación plástica previo a la ruptura.

Protocolo proceso de deformación en frío

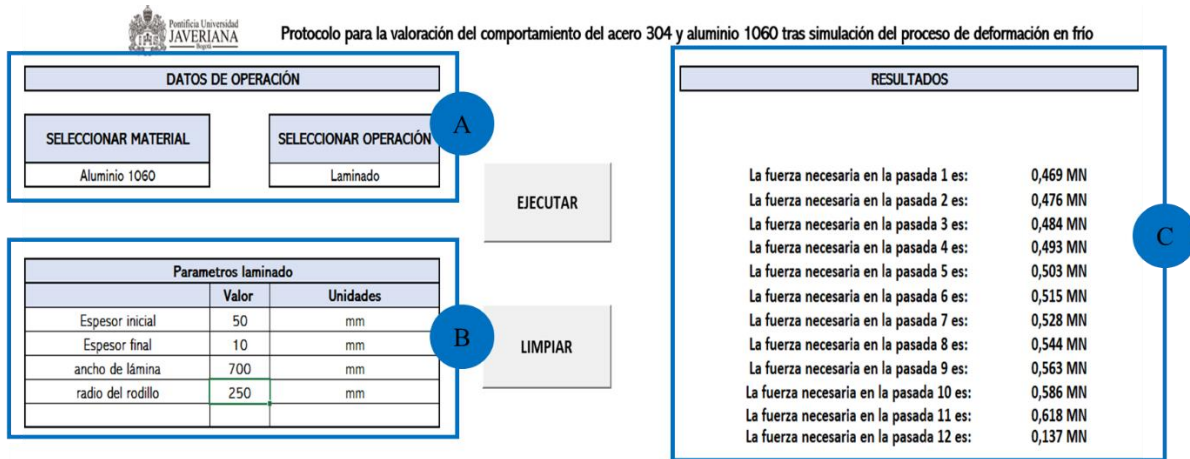
Una vez obtenido los rangos de comportamiento mecánico del material, se procede a desarrollar la herramienta en VBA considerando las relaciones de deformación en frío para cada operación, las condiciones intrínsecas del material y los parámetros de entrada del usuario. En cuanto a las condiciones intrínsecas del material se encuentran K , n y μ ; K se determina experimentalmente mientras que los valores de n y μ se definen a partir de la literatura. El valor de μ se define como el coeficiente de fricción en un proceso de laminación lubricada de metales [39]. Así mismo, el valor n se identifica como el exponente de endurecimiento por deformación necesario para determinar el esfuerzo de fluencia promedio [40]. (Ver tabla 8).

Tabla 8. Parámetros para el acero 304 y aluminio 1060 obtenidos de las simulaciones en SolidWorks®.

Material	Coefficiente de resistencia K (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Exponente de endurecimiento n	Coefficiente de fricción μ
Acero 304	356	1476	0,45	0,12
Aluminio 1060	45	211	0,2	0,12

Como resultados de las etapas 4 y 5, se obtiene la herramienta cuya base está desarrollada con la información de las etapas 1, 2 y 3, además de la validación de los resultados de la herramienta y el impacto que se espera genere en la industria. En la ilustración 4, se evidencia la interfaz del usuario de la herramienta elaborada. En la herramienta se incluye el paso a paso para la ejecución de la misma.

Ilustración 5. Interfaz de usuario de la herramienta. Fuente propia.



- A: El usuario selecciona el material (acero 304, aluminio 1060) y el tipo de operación (extrusión, laminado, embutido).
 B: El usuario ingresa los parámetros de la operación seleccionada y ejecuta la macro.
 C: El usuario puede observar los resultados de la fuerza requerida.

Evaluación del uso del protocolo para una operación específica

Por otra parte, se realiza un proceso de validación el cual consta de contrastar los resultados de las fuerzas obtenidas mediante un ejercicio general para las operaciones de interés. En primera instancia, se compara un ejercicio tradicional de laminado en frío utilizando los parámetros y constantes originales con el objetivo de medir la precisión en el cálculo de la herramienta. En segunda instancia, se utilizan los mismos parámetros, pero con las constantes establecidas para el material con el objetivo de verificar que las dimensiones obtenidas son coherentes. En la tabla 9, se evidencia el resultado de la primera instancia, en donde el resultado calculado por la herramienta tiene una precisión del 99,88%. En la tabla 10, se evidencia el resultado de la segunda instancia en donde la herramienta maneja dimensiones coherentes de fuerza con respecto al ejercicio, se obtiene fuerza en *MN* con una cercanía del 89,11%.

Tabla 9. Ejercicio de laminado en frío con parámetros y constantes originales. Fuente: [41]

Parámetros de entrada	Valor	Unidades
Espesor inicial	25	mm
Espesor final	22	mm
Ancho de la lámina	300	mm
Radio del rodillo	250	mm
<i>K</i>	275	MPa
<i>n</i>	0,15	Adimensional
μ	0,12	Adimensional
Fuerza del ejercicio	1,444786	MN
Fuerza de la herramienta	1,443057	MN
Porcentaje de precisión	99,88%	
Porcentaje de error	0,12%	

Tabla 10. Ejercicio de laminado en frío con mismos parámetros y constantes de la herramienta.

Parámetros de entrada	Valor	Unidades
Espesor inicial	25	mm
Espesor final	22	mm
Ancho de la lámina	300	mm
Radio del rodillo	250	mm
K	356	MPa
n	0,45	Adimensional
μ	0,12	Adimensional
Fuerza del ejercicio	1,444786	MN
Fuerza de la herramienta	1,602089	MN
Porcentaje de precisión	89,11%	
Porcentaje de error	10,89%	

De igual manera, en la tabla 11 se evidencia la validación para los procesos de extrusión en L y embutido.

Tabla 11. Ejercicio de embutido y extrusión en L. Fuente: [42],[43]

Embutido		
Parámetros de entrada	Valor	Unidades
Diámetro de la forma inicial	140	mm
Diámetro del punzón	75	mm
Espesor original de la forma	3	mm
K	356	MPa
n	0,45	Adimensional
Fuerza del ejercicio	1,21811	MN
Fuerza de la herramienta	1,21721	MN
Porcentaje de precisión	99,93%	
Porcentaje de error	0,07%	

Extrusión de Perfil en L		
Parámetros de entrada	Valor	Unidades
Lado del tocho	254	mm
Espesor del dado	88,9	mm
a	63,5	mm
b	50,8	mm
K	45	MPa
n	0,2	Adimensional
Fuerza del ejercicio	2,8716	MN
Fuerza de la herramienta	2,8766	MN
Porcentaje de precisión	99,83%	
Porcentaje de error	0,17%	

Para realizar la validación se utilizó el método AHP con la opinión de un experto, el cual es una herramienta cuantitativa diseñada para la elección de alternativas con múltiples criterios de selección [38]. Se determinó que la alternativa 1 fue la mejor solución debido a que obtuvo mayor ponderación con respecto al primer criterio el cual tiene mayor relevancia, permitiendo una mayor producción y así mismo obtener una mayor cantidad de productos para la venta (Ver anexo 8 y 9).

Tabla 12. Resultados método AHP.

Priorización	
Alt 1: Herramienta	0,67
Alt 2: Cálculo manual	0,33
Resultado	0,67

Medición de impacto

Actualmente en Colombia existen alrededor de 680 empresas pertenecientes a la industria metalmeccánica [44]. 42 Las variables de producción bruta de esta industria tuvieron un aumento del 3,3% en 2019 comparado con 2018 [45]. Esto permite que los empresarios colombianos busquen ser más eficientes en su producción para poder competir en este mercado.

La herramienta desarrollada en este trabajo busca impactar en la operación y en las finanzas de las empresas de metalmeccánica de Colombia, ya que contribuye a disminuir tiempo para el desarrollo de los procesos de extrusión, laminado y embutido. Adicional, evitar que los materiales se fracturen y se tengan que incurrir en costos adicionales de mano de obra y material.

De acuerdo con Juan Manuel Lesmes, Director Ejecutivo Cámara Fedemetal de la Andi, se producen aproximadamente 600 toneladas al mes de aluminio en Colombia. El precio por tonelada, a noviembre de 2020, es aproximadamente de 7 millones COP [46]. A partir de esta información, se plantea un esquema que analice la posible reducción de tiempo de procesamiento de láminas de aluminio, entre el 0.5% y el 3%, con el objetivo de identificar el posible impacto económico y de producción de la herramienta (Ver tabla 13).

Tabla 13. Impacto económico de la herramienta.

Porcentaje de reducción	Tiempo de producción por lámina (min/ton)	Láminas por minuto (ton/min)	Láminas por mes (ton/min)	Precio por tonelada (\$/ton)	Ingreso mensual (\$)	Diferencia (\$)
Actual	20,87	0,048	600	\$ 7.146.088	\$ 4.287.652.800	
0,50%	20,77	0,048	601	\$ 7.146.088	\$ 4.294.834.798	\$ 7.181.998
1,00%	20,66	0,048	604	\$ 7.146.088	\$ 4.316.525.883	\$ 28.873.083
1,50%	20,56	0,049	607	\$ 7.146.088	\$ 4.338.437.182	\$ 50.784.382
2,00%	20,45	0,049	610	\$ 7.146.088	\$ 4.360.572.065	\$ 72.919.265
2,50%	20,35	0,049	613	\$ 7.146.088	\$ 4.382.933.973	\$ 95.281.173
3,00%	20,24	0,049	616	\$ 7.146.088	\$ 4.405.526.416	\$ 117.873.616

Se puede evidenciar que ante una reducción del 0.5% en el tiempo se logra un ingreso mensual de 7 millones COP más, lo que representa una tonelada más de láminas de aluminio, que en la situación actual. De igual forma para el mejor escenario, del 3%, se logra un ingreso mensual de 117 millones COP más, que representa 16 toneladas más de láminas de aluminio.

Simular los procesos en metales permite identificar los factores, variables y condiciones que influyen en el resultado deseado del proceso o producto. Las simulaciones se han convertido en una herramienta para la investigación y desarrollo de proyectos porque permite probar la factibilidad técnica y económica, estimar condiciones de operación, disminuir los costos asociados a la experimentación real y los errores en el sistema para la toma de decisiones. Además, la simulación posibilita disminuir el tiempo, ya que se puede ejecutar más rápido de lo que se realizaría en tiempo real, ayudando a entender el proceso a gran velocidad. A partir de la verificación, se recomienda el uso de la herramienta para disminuir efectos negativos de las operaciones mecánicas extrusión, laminado y embutido.

Tabla 14. Problemas comunes de las operaciones mecánicas de extrusión, laminado y embutido.

Problemas comunes en las operaciones mecánicas: extrusión, laminado y embutido.	
Causa	Efecto
<ul style="list-style-type: none"> ● No conocer el número de pasadas necesarias para laminar el material. ● No conocer las propiedades del material. ● No tener una máquina adecuada para realizar la operación. 	Fractura en el material
<ul style="list-style-type: none"> ● Fractura del material, lo cual implica comprar más material. ● Costo de mano de obra. 	Aumento de costos
<ul style="list-style-type: none"> ● Reproceso de las operaciones. ● Cálculos exhaustivos para los parámetros de entrada de la máquina. ● Capacitación de los operarios. 	Aumento de tiempo

Simular el proceso de fabricación para cualquier material agrega una gran visión y valor para la producción, sin embargo, para los procesos en metales, esto es más importante debido a los costos de los materiales, los costos de la máquina y el tiempo necesario para construir piezas. Además de eso, los fallos importantes en la producción pueden incluso causar daños en la misma máquina. Por lo que la simulación puede ayudar a prevenir tales fallos, además de ser una cuestión de ahorro de costos y alto éxito de producción en tales casos.

En la industria metalmeccánica, las empresas han visto la necesidad de incrementar la eficiencia en la operación, reduciendo tiempos de ciclos, fracturas de los materiales y reprocesos, con el objetivo de ser competitivos nacional e internacionalmente. En el mercado se encuentran tecnologías como la CAD/CAM que permite diseñar y fabricar prototipos, productos acabados y procesos de producción con resultados rápidos y eficientes. [47]. Sin embargo, este tipo de maquinaria y software son costosos y de difícil acceso para pequeños y medianos empresarios, al igual, que los sistemas de gestión que utilizan las grandes industrias para analizar y mejorar continuamente la eficiencia de las operaciones, realizando control de activos, calibración, controles de auditoría, riesgos, incidentes, registros y mucho más [48]. La herramienta desarrollada en este proyecto es gratuita y de fácil acceso para aquellos empresarios colombianos que requieren hacer uso de la tecnología para mejorar sus procesos y crecer en el mercado.

6. Conclusiones

En primera instancia, se concluye que las propiedades mecánicas que tienen incidencia en el proceso de deformación en frío son la resistencia a la tracción, el límite elástico y el porcentaje de deformación. El límite elástico del material permite determinar a partir de qué valor de esfuerzo ejercido es posible generar una deformación permanente, por lo tanto, establecer un porcentaje de deformación deseado. De igual manera, la resistencia a la tracción permite determinar cuál es el esfuerzo límite al cual se puede someter el material, por lo cual es esencial, bien sea conocerlo o determinarlo, para evitar daños en la estructura interna del material.

En segunda instancia, mediante la teoría de Von Mises, la simulación por FEM de SolidWorks® permite tener un indicador de buen diseño para materiales dúctiles, para determinar si el material sufre fractura al ser sometido a un esfuerzo de tensión o compresión. El rango de deformación permanente se determina comparando el límite elástico con el valor mínimo de la escala de Von Mises, y el valor máximo de esta escala con el límite de ruptura. A partir de realizar una validación de los resultados experimentales contrastados con los valores teóricos de comportamiento del material, se puede determinar cuál es el rango en el que se puede generar una deformación permanente en el material y generar la ruptura. Como consecuencia, encontrar el valor de K establece el mínimo valor en el que experimentalmente se garantiza la deformación plástica del material, obteniendo así para el acero 304 y el aluminio 1060, los valores de 356 MPa y 45 MPa respectivamente.

Finalmente, se establece que el rango de deformación plástica, determinado a partir de las simulaciones, para el acero 304 y el aluminio 1060 es [356 MPa – 1476 MPa] y [45 MPa – 211 MPa] respectivamente.

En tercera instancia, la herramienta que sustenta el protocolo presenta al usuario una interfaz donde puede ingresar los parámetros de las operaciones y le muestra la fuerza requerida para efectuar la deformación del material. El desarrollo del protocolo permite al operario de la industria metalmeccánica, encargado de la operatividad de los procesos mencionados, tener una herramienta de criterio para facilitar la toma de decisiones en el momento de aplicar un esfuerzo determinado al material para deformarlo plásticamente.

Como cuarta, y última instancia, la herramienta permite determinar la fuerza necesaria para realizar los procesos de extrusión, laminación y embutido. El uso potencial de la herramienta conlleva a reducir tiempo en determinar las fuerzas de las operaciones, disminuir los costos asociados a la experimentación real, evitar fracturas en el material y reprocesos.

Recomendaciones:

Dadas las condiciones sanitarias actuales, como consecuencia del COVID-19, la delimitación y el alcance del proyecto se vieron afectadas, en cuanto a que se pretendía en principio realizar pruebas físicas de laboratorio, al igual que realizar las correspondientes validaciones en el campo industrial para empresas y usuarios de interés. Por lo tanto, se recomienda:

- Realizar las pruebas de laboratorio para validar los resultados de los datos obtenidos por la simulación dado que el alcance del proyecto no las pudo cubrir debido a la coyuntura actual. Se requiere desarrollar en el laboratorio las pruebas que se hicieron en el programa SolidWorks® bajo las mismas condiciones para comparar los dos escenarios.
- Ampliar el alcance del modelo con otros metales u otros tipos de material, se sugiere realizar el análisis del modelo en el latón pues es un material con alta utilización en la industria.
- Realizar la operación de extrusión para otros perfiles además de los perfiles en U y en L, tales como perfil I y T. Además, realizar la operación de embutido para piezas cuadradas o rectangulares que no fueron cubiertas en el alcance del trabajo de grado.
- Validar por empresas del sector industrial, que trabajen con acero inoxidable 304 y aluminio 1060, la empleabilidad de la herramienta en el ambiente de trabajo.

Glosario

Acritud: proceso de endurecimiento por propiedad mecánica consecutiva por la deformación en frío.

Deformación en frío: cuando el material presenta sus granos distorsionados después de la deformación plástica.

Doblado: deformación de una lámina con base en un ángulo determinado sin provocar cambios en el espesor de la lámina.

Embutición: se realiza una deformación volumétrica de compresión de un punzón que tiene la forma deseada sobre el material.

Endurecimiento por deformación: dureza del material generada por la deformación plástica incrementando la densidad de dislocación del metal.

Extrusión: ejercer una compresión con un pistón sobre un lingote en bruto y forzarlo a fluir por un lado adoptando la forma del mismo.

Forja: por medio de la deformación plástica generada por impacto en el metal, mejora las propiedades mecánicas del mismo.

Fundición: con el fin de dar una forma determinada al metal se derrite agregándolo en el molde con la forma requerida.

Laminado: con el fin de conformar el material reduciendo el espesor, se introduce el material entre rodillos logrando una mejor uniformidad.

Límite elástico: es determinado por la tensión permitida por el material sin generar una deformación permanente.

Límite de tracción: es determinado por la carga máxima que puede soportar el material antes de romperse.

Método de elementos finitos (FEM): técnica numérica basada en ecuaciones diferenciales para analizar diseños de ingeniería, el cual divide el modelo en numerosas piezas pequeñas de formas simples llamadas "elementos", que a su vez comparten puntos comunes denominados "nodos" y permite un análisis detallado del comportamiento de la pieza.

Simulación: pretende imitar un proceso o producto, determinando los posibles resultados evitando gastos innecesarios en retrabajos o pérdidas de material.

SolidWorks®: software que permite crear y simular modelos en 3D. Además, mediante su simulación se logra realizar pruebas de un producto en circunstancias reales.

Trefilado: consiste en disminuir la sección transversal un alambre haciéndolo pasar por un orificio cónico.

Referencias

- [1] Importancia.org, “Metales,” 2013. [Online]. Available: <https://www.importancia.org/metales.php>.
- [2] W. Arenas and O. Martínez, “Optimización de la rugosidad y la dureza del acero 121-14 empleando la metodología de superficie de respuesta,” *Ing. Ind.*, no. 037, pp. 125–151, 2019, doi: 10.26439/ing.ind2019.n037.4546.
- [3] E. D. Padilla, “Aplicaciones De Los Aceros Inoxidables,” *Rev. del Inst. Investig. la Fac. Ing. Geológica, Minera, Metal. y Geográfica*, vol. 2, no. 3, pp. 11–22, 1999.
- [4] CRU International Limited, “Aluminio caracterización y análisis de mercado Internacional en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia al año 2035,” pp. 1–54, 2018.
- [5] E. Mora Ponciano, “Caracterización del Latón Brass characterization,” *Rev. Met. N°*, vol. 30, pp. 57–64, 2011.
- [6] ANDI, “Informe del sector siderúrgico Comité colombiano de productores de acero,” p. 300, 2018.
- [7] DANE, “Boletín Técnico, Encuesta anual manufacturera (EAM),” *DANE*, pp. 1–30, 2019.
- [8] W. F. Smith, J. Hashemi, G. Nagore Cázares, R. Esquivel González, and A. Barba Pingarrón, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales / William Fortune Smith y Javad Hashemi ; traducción Gabriel Nagore Cázares ; revisión técnica Ramón Esquivel González y Arturo Barba Pingarrón*. 2014.
- [9] M. Mundial, “Grados Material Mundial.” [Online]. Available: <https://www.materialmundial.com/acero-inoxidable-ss-astm-sae-aisi-304-ficha-tecnica/>.
- [10] UPV, “Aleaciones para ingeniería.” [Online]. Available: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_4.html.
- [11] W. D. Callister, *Fundamentals of materials science and engineering*. .
- [12] Solidworks, “Basic Concepts of Analysis.” [Online]. Available: http://help.solidworks.com/2016/spanish/solidworks/cworks/c_Basic_Concepts_of_Analysis.htm.
- [13] G&J, “INDUSTRIA METALMECÁNICA EN COLOMBIA” [Online]. Available: <https://gyj.com.co/blog/post/un-futuro-solido/>
- [14] Ingenierías USBMed, “Revisión documental de factores de producción analizados en investigaciones del sector metalmeccánico en Colombia durante 2015–2019” [Online]. Available: <https://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/4249/3733>.
- [15] Proyectos, “Efecto de la deformación en frío sobre la microestructura y propiedades de un Acero” [Online]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90845/fichero/TRABAJO+DE+FIN+DE+GRADO+--+JOSÉ+MANUEL+JIMÉNEZ+ARENAS.pdf>
- [16] A. F. ZÚÑIGA HOLGUÍN, C. A. MESA MONTOYA, and L. C. FLÓREZ GARCÍA, “Estudio de la extrusión indirecta con punzón de sección transversal cuadrada del aluminio 6061 usando el método de elementos finitos,” *Rev. EIA*, vol. 16, no. 32, pp. 219–228, 2019.
- [17] Q. Dai, Y. Deng, H. Jiang, J. Tang, and J. Chen, “Hot tensile deformation behaviors and a phenomenological AA5083 aluminum alloy fracture damage model,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 766, no. August, p. 138325, 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.138325.
- [18] I. Zuiko and R. Kaibyshev, “Deformation structures and strengthening mechanisms in an Al-Cu alloy subjected to extensive cold rolling,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 702, no. June, pp. 53–64, 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.07.001.
- [19] A. Hedayati, A. Najafizadeh, A. Kermanpur, and F. Forouzan, “The effect of cold rolling regime on microstructure and mechanical properties of AISI 304L stainless steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 8, pp. 1017–1022, 2010, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.010.
- [20] F. Khodabakhshi, M. Haghshenas, H. Eskandari, and B. Koohbor, “Hardness-strength relationships in fine and ultra-fine grained metals processed through groove pressing,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 636, pp. 331–339, 2015, doi: 10.1016/j.msea.2015.03.122.
- [21] A. S. O. Al-Khuzai, A. V. Vydrin, and V. V. Shirokov, “Study of the resistance of metal to plastic deformation of steel pipe in a wide range of temperature variation,” *Mater. Today Proc.*, vol. 20, no.

- xxxx, pp. 617–620, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.199.
- [22] M. I. Abd EL AAL, “3D FEM simulations and experimental validation of plastic deformation of pure aluminum deformed by ECAP and combination of ECAP and direct extrusion,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.*, vol. 27, no. 6, pp. 1338–1352, 2017, doi: 10.1016/S1003-6326(17)60155-9.
- [23] M. Blog, “¿Qué es y para qué sirve el análisis metalográfico?” 2019. [Online]. Available: <https://www.blog.metalinspec.com.mx/post/que-es-para-que-sirve-el-analisis-metalografico%0A>.
- [24] J. D. Castro Castro and E. D. Cendales Ladino, “Casos aplicados del análisis de causa raíz: revisión,” *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 29, no. 1, pp. 95–134, 2019, doi: 10.18359/rcin.3197.
- [25] Avi, A., Antonio, T., Gonz, C., Salamanca, C. I., & Irapuato-salamanca, C. (n.d.). Desarrollo de pruebas experimentales para determinar la variación del módulo de young en láminas metálicas. 1. 6(2019), 1–7.
- [26] F. Planes, “Laminado en frío y en caliente.” [Online]. Available: <https://ferrosplanes.com/laminado-en-frío-en-caliente-ventajas/>.
- [27] G. Pacheco Rufián, “Diseño y construcción de una extrusora lateral y obtención de fuerzas,” p. 109, 2017.
- [28] A. Rosa, C. Candela, F. Javier, and D. Charneco, “Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica Cálculo del factor de forma en extrusión mediante elementos finitos,” 2018.
- [29] INGETEAM, “Laminación en Frío.” [Online]. Available: https://www.ingeteam.com/es-es/sistemas-industriales/siderurgia/pc38_59_500/laminacion-en-frío.aspx.
- [30] S. Manuel and A. Silva, “El conformado en frío por embutición en la industria conservera,” 2014.
- [31] A. E. B. Q. J. S. D. CONTRERAS, “DISEÑO DE UNA PRENSA PARA OBTENCIÓN DE CÁMARAS DE VACÍO POR EMBUTIDO,” no. August, pp. 1–111, 2016.
- [32] N. Cataño, “Repositorio.” [Online]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22898/u279397.pdf?sequence=1>.
- [33] “Good Flow.” [Online]. Available: <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>.
- [34] Madecentro, “Ficha técnica Aluminio,” 2018.
- [35] Carbone Stainless Steel, “Ficha Técnica del Acero Inoxidable,” no. X, 2016.
- [36] “Material properties.”
- [37] “Good Flow.” [Online]. Available: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/1060-A199.6-A91060-Aluminum>.
- [38] J. Osorio Gómez and J. Orejuela Cabrera, “El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación.,” *Sci. Tech.*, vol. XIV, no. 39, pp. 247–252, 2008, doi: 10.22517/23447214.3217.
- [39] Domínguez Gámez, E. (2003). Obtención del coeficiente de fricción mediante pruebas mecánicas (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- [40] Matusevich, A., Mancini, R., & Massa, J. (2013). Determinación del exponente “n” de endurecimiento por deformación mediante un algoritmo de mínimos cuadrados ponderados. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 17, 171-182.
- [41] J. A. Anzoátegui and P. Nfl, “Ejercicio Laminado,” pp. 1–3
- [42] “Ejercicio embutido,” pp. 218–226
- [43] R. C. E. Guy, *Pet Foods*, vol. 3–4. Elsevier Inc., 2015.
- [44] “Procolombia.” [Online]. Available: <https://procolombia.co>.
- [45] E. Anual and M. Eam, “Boletín Técnico Boletín Técnico,” pp. 1–34, 2020.
- [46] Indexmundi, “Indexmundi” 2019. [Online]. Available: <https://www.indexmundi.com/es/precios-mercado/?mercancia=aluminio&meses=12&moneda=cop>.
- [47] Mecasinc, “CAD/CAM Diseño y fabricación de productos a través de software” 2019. [Online]. Available: <https://www.mecanizadossinc.com/cad-cam-mecanizado/>
- [48] Soft Expert, “Minería y metales”. [Online]. Available: <https://www.softexpert.com/es/solucao/mineria-y-metales/>.