



República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad. Metalurgia- Electromecánica
Departamento. Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

*Tema: Empleo del MEF para determinar las tensiones del
acero AISI 1045 endurecido superficialmente*

Autor: Neuris Torres Leyva

*Tutor(es): Ing. Dayanis Alcántara Borges
MSc. Tomás Fernández Columbié
MSc. Isnel Rodríguez González*

*Moa – 2010
“Año 52 de la Revolución”*



Declaración de Autoridad:

Yo: Neuris Torres Leyva

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Ing. Dayanis Alcántara Borges. _____

MSc. Tomás Fernández Columbié. _____

MSc. Isnel Rodríguez González. _____

Neuris Torres Leyva. _____



Pensamiento:

El porvenir del país está ligado directamente al desarrollo de la ciencia y la técnica. Nunca podemos caminar con nuestros propios pies, mientras no tengamos una tecnología avanzada, basada en una técnica propia, en una ciencia propia. Por ello, la tarea de crear ingenieros es importante...

Ernesto Che Guevara



Dedicatoria:

Cuando se culmina una meta deseada y se desea imponer momento de alegría, solo se debe tener presente a aquellas personas que con su dedicación y amor contribuyeron a la realización de esta.

En forma de agradecimiento y virtud del bello esfuerzo que esas personas realizaron en aras de mi bienestar, dedico este sueño:

A Irma Leyva Matos (mi madre), por el amor que le tengo y por su incansable lucha ante las dificultades que la vida nos guarda, a ella que le debo todo lo que soy mientras viva.

A Nelson Torres Telles (mi padre), por toda la confianza que ha depositado en mí y porque me ha servido de ejemplo en la vida.

A mis familiares, amigos, compañeros de aula, profesores y aquellas personas que me han ayudado a culminar mis estudios, para poder convertirme en un profesional. Y en exclusivo, a mi querida y amada Yaima Marlenis Pérez Sarmiento ha depositado toda su confianza amor y cariño en mí.



Agradecimientos:

Agradecer a mi madre por la educación que he recibido de ella con mucha ternura y dedicación, la única persona que ha compartido conmigo mis felicidades y angustias, que desearía siempre estuviera a mi lado.

Esta es sólo una meta de las que debo vencer y cuando se llega hasta aquí se debe reconocer a todos aquellos que me brindaron su mano amiga en confianza, experiencias, conocimientos, ayuda incondicional, apoyo y afecto.

A mis tutores, Ing. Dayanis Alcántaras Borges, MsC. Tomás Fernández Columbié, MsC. Isnel Rodríguez González que han depositado confianza en mí para la realización de este trabajo y lo personal a Tomasito por tener tanta paciencia conmigo.

A todos Muchas gracias.

INTRODUCCIÓN

La expresión analítica de la ley de endurecimiento por deformación de un metal o aleación metálica incluye parámetros cuyos valores han de ser determinados para cada material. Estos parámetros se obtienen, generalmente, mediante ajuste a la gráfica tensión - deformación discreta obtenida en ensayos de compresión y tracción uniaxial o torsión. En los ensayos dinámicos, debido a la elevada velocidad de deformación que se alcanza, el proceso de deformación del material pueda considerarse adiabático. El incremento de temperatura en el material puede entonces calcularse a partir del trabajo plástico, resultando una expresión que incluye como variables los parámetros de la ley de endurecimiento. Por otro lado, el calor generado en la probeta durante el ensayo puede también estimarse midiendo en la superficie de ésta el incremento de temperatura mediante la técnica de termografía infrarroja. Se ha establecido una metodología de ensayos de compresión estática y dinámica de materiales metálicos, con medición simultánea del incremento térmico asociado a la deformación plástica.

La mecánica de los sólidos deformables estudia el comportamiento de los cuerpos sólidos deformables ante diferentes tipos de situaciones como la aplicación de cargas o efectos térmicos. La aplicabilidad y utilidad de un acero estarán determinadas en muchos casos por su resistencia y tenacidad. La resistencia (ligada a su comportamiento plástico, definido por límite elástico y la capacidad de deformarse plásticamente) y la tenacidad que presenta un acero (dada por la capacidad de relajar tensiones, deformándose plásticamente antes de la fractura), no son variables independientes. Estas propiedades quedan caracterizadas por una serie de variables macroscópicas que se pueden medir de forma reproducible siguiendo las normas creadas para los ensayos de los que se obtienen.

La **Situación Problemática** de la investigación la constituye: El análisis numérico de sólidos no lineales sometidos a grandes deformaciones, requiere para su validez que el modelo constitutivo tensión-deformación sea fiable. Un procedimiento relativamente sencillo y económico para caracterizar estas leyes en metales dúctiles es el ensayo de tracción simple. Para caracterizar el comportamiento elástico del material, los procedimientos de ensayo están

normalizados: ASTM E 8 - 82 (Methods of tension testing of metallic materials), UNE 7474 - 1 (Materiales Metálicos. Ensayo de Tracción. Parte 1: Método de Ensayo). No obstante, estos ensayos no proporcionan información sobre la ley constitutiva para grandes deformaciones elastoplásticas. La motivación de este estudio es el amplio uso del método de tracción y la necesidad de optimizar este proceso. Consecuentemente, la posibilidad de obtener un modelo de elementos finitos con resultados fiables para la predicción de diferentes procesos es fundamental para la mejora de la etapa de experimentación, que consume tiempo y costes. Poder conocer datos sobre tensiones y deformaciones antes de realizar el proceso real, resultará muy útil para predecir el comportamiento de los materiales.

El **Problema** a investigar lo constituye: No existencia de un modelo por el MEF del ensayo de tracción en probetas de acero AISI 1045 después de ser sometidas al proceso de deformación plástica superficial por rodillo.

Como **Objeto de la investigación** se establece: MEF para probetas traccionadas después de ser endurecidas por rodillo.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**: Realizando la simulación por el MEF de la curva σ - ϵ a probetas de acero AISI 1045 sometidas a proceso de deformación por rodillo bajo diferentes condiciones (S, n, P), se podrá determinar el comportamiento de las tensiones y las deformaciones de las mismas.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **Objetivo del trabajo**: Realizar la simulación por el MEF de la curva σ - ϵ a probetas de acero AISI 1045 sometidas a proceso de deformación por rodillo.

Y se definen los siguientes **Objetivos Específicos**:

1. Caracterizar los elementos que componen el procesamiento de los MEF.
2. Establecer los diferentes parámetros de las probetas, así como la caracterización del software para la realización de la simulación.
3. Establecer la metodología propuesta y validación de los resultados obtenidos durante el proceso de simulación por el MEF.



Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo:**

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Caracterización de los diferentes parámetros de las probetas, así como del software a emplear en la simulación.
3. Observación de la ejecución experimental para validar los tiempos calculados en el proceso de simulación por el MEF.
4. Análisis de los resultados y fundamentación de la simulación por el MEF.



Resumen

El trabajo muestra una investigación relacionada con la simulación por el método de elementos finitos de 9 probetas endurecida mediante la deformación plástica superficial utilizando un rodillo como elemento deformante, se emplean variables como fuerza de 500, 1500 y 2 500 N, avance de 0,075, 0,125 y 0,25 mm/rev y número de revolución de 27, 54 y 110 rev/min. Los valores obtenidos en la máquina de ensayo se simulan empleando el software COSMOS DESING. Las probetas fueron enmalladas verificando la estricción en el cuello de las mismas. Los esfuerzos y deformaciones que se obtienen de la simulación tienen correspondencia con los realizados por el MEF. Se analiza la incidencia del proceso en el medio ambiente, así como la valoración económica.



Abstract

The work shows an investigation related with the simulation for the method of finite elements of nine test tubes hardened by means of the superficial plastic deformation using a roller like element department, variables are used as force of 500, 1500 and 2 500 N, advance of 0,075, 0,125 and 0, 25 mm/rev and number of revolution of 27, 54 and 110 rev/min. The securities obtained in the rehearsal machine are simulated using the software COSMOS DESING. The test tubes were been caught in the meshes of a net verifying the estriction in the neck of the same ones. The efforts and deformations that are obtained of the simulation have correspondence with the realized ones for the MEF. The incidence of the process is analyzed in the environment, as well as the economic valuation.

**ÍNDICE**

Contenido	pág
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1 MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	4
1.1 Introducción	4
1.2 Ensayos destructivos para evaluar propiedades mecánicas	4
1.3 Gráfico tenso - deformacional de un acero común	4
1.4 Sistemas de visión por computador	5
1.5 Representación de imágenes digitales	5
1.6 Principios generales del método Elementos Finitos	6
1.6.1 Etapas del MEF	8
1.6.2 Selección del software	9
1.6.3 Técnicas de integración para la solución de problemas	11
1.6.4 Métodos de análisis	12
1.6.5 Modelos de deformación de material	12
1.6.6 Adaptación del mallado (remallado) y regeneración	13
1.6.7 Modelación de la curva Tensión – deformación	14
1.7 Análisis de sensibilidad global	16
1.7.1 Modelos constitutivos para materiales	16
1.7.2 Interpretación analítica	17
1.8 Ensayos experimentales y numéricos con probetas de acero	18
1.9 Comportamiento de los materiales	20
1.10 Conclusiones del capítulo I	22
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1 INTRODUCCIÓN	23
2.2 Selección del material a someter al proceso de endurecimiento y tracción	23
2.3 Normalización de las probetas para el ensayo de tracción	24
2.4 Características de la máquina herramienta para la fabricación de las probetas	26
2.5 Elaboración mecánica de las probetas para el endurecimiento por deformación plástica superficial con rodillo	27
2.5.1 Velocidad de corte de las probetas	27
2.5.2 Profundidad de corte de las probetas	28
2.5.3 Tiempo de maquinado de las probeta	28
2.5.4 Endurecimiento por Deformación Plástica Superficial con rodillo	



de las probetas	28
2.6 Metodología y equipos empleados en la experimentación	29
2.6.1 Máquina para ensayos de tracción	29
2.6.2 Datos técnicos de la máquina de ensayos de tracción – compresión	30
2.6.3 Técnicas operatorias para el ensayo de tracción	30
2.6.4 Procedimiento para el ensayo de tracción	31
2.7 Procedimiento para la modelación por Método de Elementos Finitos	33
2.7.1 Mallado del modelo	34
2.7.2 Los elementos en el mallado	34
2.8 Conclusiones del capítulo	34
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	36
3.1 INTRODUCCIÓN	36
3.2 Establecimiento del modelo	37
3.2.1 Características mecánicas del acero AISI 1045	36
3.3 Determinación de los regímenes de corte para la elaboración de las probetas	37
3.3.1 Cálculo de de la velocidad de corte	37
3.3.2 Obtención de la profundidad de corte	37
3.3.3 Determinación del tiempo de maquinado	37
3.3.4 Análisis de la velocidad de deformación	38
3.3.5 Análisis del cálculo del tiempo de deformación	48
3.4 Determinación de las áreas iniciales y finales de las probetas	49
3.5 Determinación de las tensiones en las probetas ensayadas	40
3.5.1 Análisis de las tensiones de resistencia a la tracción del acero AISI 1045	40
3.5.2 Determinación de la tensión de rotura en las probetas endurecidas	41
3.5.3 Análisis de las tensiones de rotura de las probetas	41
3.6 Simulación por el Método de Elementos finitos	41
3.6.1 Análisis de la simulación de la probeta 2	43
3.6.2 Análisis de la simulación de la probeta 3	45
3.6.3 Análisis de la simulación de la probeta 4	46
3.6.4 Análisis de la simulación de la probeta 5	47
3.6.5 Análisis de la simulación de la probeta 6	49
3.6.6 Análisis de la simulación de la probeta 7	50
3.6.7 Análisis de la simulación de la probeta 8	51



3.6.8	Análisis de la simulación de la probeta 9	53
3.7	Análisis del comportamiento de las probetas ensayadas por el método de elemento finito	54
3.7.1	Análisis de los esfuerzos que surgen en el cuello de las probetas por la modelación del MEF del acero AISI 1045	55
3.8	Análisis de los resultados obtenidos por los métodos utilizados	56
3.9	Valoración económica	56
3.10	Impacto medio ambiental	57
3.11	Conclusiones del capítulo III	58
	CONCLUSIONES GENERALES	59
	RECOMENDACIONES	60
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	Anexo	65



CAPITULO 1 MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1 Introducción

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada realizada con dicho material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión suelen ser muy pequeñas. En el ensayo se mide la deformación (alargamiento) de la probeta entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función de la tensión (carga aplicada dividida por la sección de la probeta).

Objetivo del capítulo

- Realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

1.2 Ensayos destructivos para evaluar propiedades mecánicas

Dentro del grupo de los ensayos destructivos más conocidos se encuentran el ensayo de fatiga ya sea de amplitud constante o variada. Uno evalúa el comportamiento a la fatiga mediante ciclos predeterminados de carga o deformación, generalmente senoidales o triangulares, de amplitud y frecuencia constantes. Mientras que el otro evalúa el efecto del daño acumulado debido a la variación de la amplitud del esfuerzo en el tiempo. En este grupo también se incluyen los ensayos de impacto, flexión y tracción para comprobar los materiales que van a estar sometidos a impacto durante su funcionamiento, los materiales sometidos a la carga de la viga simple y el de tracción que tiene por objetivo definir la resistencia elástica, resistencia última y plasticidad del material cuando se le somete a fuerzas uniaxiales.

1.3 Gráfico tenso - deformacional de un acero común

Los diagramas esfuerzo - deformación de diversos materiales varían ampliamente y diferentes ensayos de tensión con el mismo material pueden producir resultados diferentes de acuerdo con la temperatura de la probeta y la velocidad de carga. Sin embargo, es posible distinguir algunas características

comunes en los diagramas de varios grupos de materiales y dividirlos en dos amplias categorías: materiales dúctiles y materiales frágiles. (Piñeiro, 2009)

1.4 Sistemas de visión por computador

Desde un punto de vista técnico, un sistema de visión por computador es un sistema autónomo que realiza alguna de las tareas que el sistema de visión humano es capaz de realizar (Nevatia, 1982). Este sistema es capaz de extraer o deducir la estructura y las propiedades del mundo tridimensional a partir de una o más imágenes.

Proporcionar a un computador la capacidad de emular el efecto de la visión humana a través de un sistema de percepción electrónico no es una tarea sencilla. El principal obstáculo se encuentra en que el ojo humano percibe la luz reflejada por los objetos en un espacio de tres dimensiones (3D), mientras que los computadores tratan de analizar estos objetos a partir de proyecciones en imágenes de dos dimensiones (2D). La reducción de una dimensión produce la pérdida de gran cantidad de información, lo que eleva notablemente la dificultad del proceso de visión (Sonka et al., 1993). Las imágenes manejadas por el computador son bidimensionales debido a que el proceso de muestreo de la escena del mundo real se realiza, normalmente, a través de una rejilla rectangular, donde cada uno de sus elementos se conoce como píxel (picture element).

Cada píxel puede almacenar valores de un tipo concreto, dependiendo del formato de representación de la imagen. La obtención de la imagen en un determinado instante de tiempo conlleva dos pasos. En primer lugar, el muestreo de la escena, definida de forma continua, obteniendo un conjunto discreto de puntos. En segundo lugar, la cuantización de la muestra, es decir, asignar a cada punto un valor discreto representativo del rango en el que varía la muestra.

1.5 Representación de imágenes digitales

La representación de la información de una imagen se puede realizar de varias formas: a través de imágenes de intensidad, de imágenes térmicas o de imágenes de rango.

Las imágenes de intensidad parten del concepto de luminosidad. En estas imágenes cada píxel representa el brillo o intensidad lumínica que ha detectado cada elemento fotosensible del sensor durante el período de exposición. Las imágenes térmicas, generadas por sensores infrarrojos, indican la temperatura que emite cada cuerpo de la escena. En este caso, cada píxel de la imagen representa el valor de temperatura concreto que tiene un punto de la escena. Las imágenes de rango, también denominadas imágenes de alcance, imágenes de profundidad mapas de profundidad, mapas XYZ o perfiles de superficie, son la forma más común de representar las coordenadas tridimensionales de los objetos de una escena.

1.6 Principios generales del método Elementos Finitos

El principio del Método de Elementos Finitos se remonta a los años 50, aunque no fue hasta la década de los 70 cuando las teorías basadas en MEF empezaron a ser usadas para simulaciones (Ästrom, 2004).

La historia de la tecnología basada en elementos finitos se puede dividir en cuatro fases (Rowan, 1990). En el primer periodo, este método fue aplicado fundamentalmente en problemas mecánicos estructurales. Ya a finales de los 70, en una segunda fase del desarrollo del MEF, métodos numéricos empezaron a usarse para simulaciones de corte (Usui et al., 1978). En un tercer período los investigadores se centraron en crear nuevos métodos para solucionar problemas de mayor dificultad, como cálculo de flujos. El cuarto período, desarrollado actualmente, trata de optimizar los algoritmos creados y su comercialización.

Desde el punto de vista industrial los propósitos a la hora de usar el MEF son los siguientes (Ästrom, 2004).

- Para analizar el impacto durante el uso. Los productos industrializados sufren de diversos daños debidos al uso operacional. El propósito del MEF es el del predecir ese desgaste y así mejorar el diseño del producto final.
- Para analizar el impacto de las operaciones de manufactura sobre el material estudiado. A la hora de elegir material, se debe tener en cuenta las

operaciones que se van a realizar sobre la estructura original, como puede ser mecanizado, tratamientos superficiales, soldaduras.

- Para optimizar las operaciones de manufactura. Así mismo, gracias a las herramientas MEF se puede predecir el efecto de dichas operaciones sobre la materia prima, pudiendo así optimizar el proceso aún antes de que se halla comenzado.

El uso del análisis por el Método de Elementos Finitos ha ido aumentando de manera asombrosa en los últimos años. Esto se debe a que es una herramienta esencial para realizar los análisis y simulaciones dentro de la Fabricación Virtual.

Hasta los años 80, la especialización de departamentos y su consiguiente aislamiento del resto de la empresa era lo que primaba en la industria de todo el mundo. No fue hasta 1990 cuando se empezó a usar el concepto de "reingeniería", donde se encuentra integrada la Fabricación Virtual. Esta técnica apoya los movimientos interdepartamentales a la hora del diseño de un producto, de manera que diseño, producción y comercio aporten algo a ese diseño.

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un método de cálculo numérico basado en ecuaciones diferenciales para resolver problemas relacionados con la ingeniería. Para dar solución a un problema de ingeniería basándose en el Método de Elementos Finitos, se deben tener en cuenta los siguientes elementos:

1. Una función continua se aproxima a una serie de funciones finitas y mediante ese número finito de funciones se puede llegar a una solución equivalente de la función continua.
2. El objeto a estudiar estará dividido en subdominios a los que se denomina "elementos"
3. Estos elementos estarán definidos mediante puntos y conexiones llamados "nodos"
4. La unión en una pieza de todos sus nodos y elementos es a lo que se denomina "mallado", por lo tanto "mallar" una pieza significa crear los subdominios que van a definir a la misma.

5. Las funciones continuas definidas son resueltas en cada nodo, asumiendo que cualquier punto interno al elemento puede calcularse como variables nodales del elemento.
6. Como variables nodales entendemos los grados de libertad de los nodos: tres grados de desplazamiento y tres grados de rotación.
7. La suma de todos los elementos representa el objeto de estudio, al que se llama cuerpo mallado, consiguiendo una gran aproximación con la realidad a la hora de realizar el estudio de los elementos finitos.

En un análisis estructural, el Método de Elementos Finitos ensambla una serie de elementos entre sí conectándolos a través de nodos hasta representar la geometría a estudiar. Cada elemento contiene las propiedades del material, de manera que se supone un comportamiento simplificado dentro de los mismos.

Cada elemento interacciona con sus elementos vecinos mediante una serie de ecuaciones que llevan como variables las incógnitas del problema a estudiar. Estas ecuaciones serán lineales o no dependiendo de las propiedades definidas del material y las condiciones de contorno del problema. Resolviendo cada una de las ecuaciones dentro de los elementos, se obtiene la solución global del problema.

Adams (1999) brinda además una importancia al MEF en el área del ciclo de desarrollo del producto. Al realizar simulaciones antes de proceder a la fabricación real del producto, se aporta un conocimiento de la respuesta del material y del producto que de otro modo no tendríamos. Esta reducción del espacio de desconocimiento se convierte en un potencial para ahorrar tiempo y costes en etapas posteriores del producto.

1.6.1 Etapas del MEF

El ciclo del análisis por elementos finitos incluye cinco etapas diferenciadas, tal y como se puede observar en la figura 1.

- **Concepto:** en esta etapa se debe tener en cuenta los requisitos del problema a analizar. Hay que definir el modelo e incluir para el correcto análisis.

- **Modelización:** esta etapa es también llamada pre - procesamiento. En este punto se diseña el objeto a analizar así como las condiciones de contorno.
- **Análisis:** en este punto es en que se hace el verdadero cálculo numérico del modelo de elementos finitos.
- **Interpretación:** aunque todos los demás puntos son los que hacen posible el análisis, esta es en realidad la etapa más importante. Aquí es donde se da forma a los datos obtenidos, se interpreta su significado y se decide si el análisis es admisible o si por el contrario se debe proceder a realizar algún cambio. Desde esta etapa se puede volver atrás hasta el concepto, la modelización o incluso hasta una nueva interpretación de los mismos datos.
- **Aceptación:** es el momento de realizar las conclusiones finales sacadas del análisis e interpretación de los datos obtenidos.

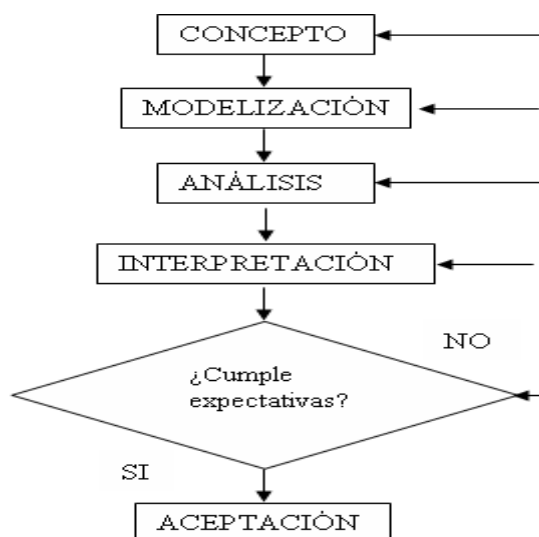


Figura 1. Etapas del MEF (MSC, 2005)

El MEF se implementa a través de software informático que minimiza los tiempos dedicados a iteración. En este caso los programas informáticos usados para estos análisis incluyen tres pasos o módulos principales, el pre - procesado, el análisis y el post-procesado.

1.6.2 Selección del software

La elección de un software adecuado es muy importante para que el análisis realizado sea correcto y para que los resultados obtenidos sean válidos. No todos los programas existentes en el mercado ofrecen lo mismo y por lo tanto cada caso deberá ser tratado con un software apropiado en función de las

características del mismo. Por este motivo el primer paso para decidir el programa a utilizar para la simulación es examinar y clasificar el modelo a estudiar, para saber las especificaciones que el software elegido debe poseer para tener éxito en la simulación.

Los problemas resueltos mediante el Método de Elementos Finitos se pueden clasificar en dos tipos, problemas lineales y problemas no lineales. Inicialmente este método se aplicó a problemas sencillos y lineales. Sin embargo, la industria nuclear y la aeronáutica impulsaron su uso hacia problemas en los que las no linealidades se debían a los comportamientos de los materiales a altas temperaturas.

El análisis lineal es aquel análisis tensional que ocurre en estructuras elásticas lineales, es decir, el comportamiento de los materiales no varía respecto de otras variables. Este análisis es muy empleado debido a su simplicidad y a que ofrece resultados muy fiables. Sin embargo este tipo de análisis no tiene en cuenta no linealidades debidas al material, a la geometría o a las condiciones de contorno. El principio de superposición es aplicado bajo estas condiciones, de manera que el resultado final puede ser obtenido al sumar las soluciones individuales. Por otro lado, el análisis no lineal se da cuando la relación fuerza desplazamiento depende del estado en curso.

Existen tres fuentes de no linealidad, que son el material, la geometría y las condiciones de contorno no lineales.

Una relación no lineal entre tensión y deformación es el resultado de la no linealidad del material. A pesar de la dificultad en la obtención de resultados experimentales, se han conseguido desarrollar un gran número de modelos matemáticos del comportamiento del material. Algunos ejemplos son los modelos elastómeros, visco plástico o el más conocido elasto-plástico. La no linealidad geométrica aparece cuando la relación entre deformación y desplazamiento o la relación tensión-fuerza son no lineales.

Un tercer tipo de no linealidad puede venir dado por las condiciones de contorno, ya que los problemas de contacto y fricción conllevan condiciones de contorno no lineales. Además las cargas también pueden resultar causa de no

linealidad si estas varían con los desplazamientos de la estructura, como es el ejemplo de la fuerza centrífuga. Estos tipos de no linealidad se ven sobre todo en casos reales, donde las fuerzas de contacto están muy presentes en todos los procesos.

Por otra parte, los lenguajes de programación resultan una herramienta de apoyo para los elementos finitos. Aunque muchos de los programas incluyen módulos automáticos para proceder al mallado, la mayoría también incluye la posibilidad de crear un mallado específico y propio a través de un lenguaje de programación. A pesar de los elementos mencionados, no se puede afirmar que la elección del programa sea la óptima, ya que como se ha comentado anteriormente el uso de códigos de elementos finitos está muy extendido.

1.6.3 Técnicas de integración para la solución de problemas

Para resolver un problema mediante elementos finitos, se utilizan principalmente dos métodos de cálculo distintos para obtener las soluciones a las ecuaciones, explícito e implícito (Camacho, 2005).

Mediante el método implícito se trata de resolver sistemas de ecuaciones de manera iterativa, de manera que la convergencia en el paso anterior es necesaria para la continuidad de la resolución. El método explícito, sin embargo, no necesita de esa convergencia al no usar iteraciones.

Una desventaja del método explícito es que el tiempo de paso es restringido. Por este motivo, cuando se tiene un proceso sencillo con fácil convergencia es preferible utilizar el método explícito, sin embargo es preferible el método implícito para sistemas complejos con numerosas condiciones de contacto (Astrom, 2004).

Muchos han sido los autores que han discutido sobre las preferencias sobre un método u otro (Astrom, 2004; Martínez, 2003), siempre con la misma conclusión: dependiendo del problema se debe estudiar el método más apropiado.

En este caso, el código de elementos finitos empleado para resolver los cálculos es de metodología implícita y utiliza una solución iterativa incremental

basada en el método de Newton-Raphson, que es uno de los procedimientos comúnmente utilizados para la resolución de este tipo de problemas.

1.6.4 Métodos de análisis

Existen dos tipos de análisis usados para la modelización con MEF (Wince, 2002), que son los análisis mediante formulación Euleriana y mediante formulación Lagrangiana.

- **Euleriana.** En este caso la red mallada está fijada en el espacio. La ventaja de este método es que es necesario un menor número de elementos, por lo que, se reduce el tiempo del análisis.

La gran mayoría de modelos están basados en la formulación Lagrangiana, donde la red se deforma con el material. Este método requiere instrucciones de remallado, que deben ser especialmente estudiadas si se quieren obtener resultados fiables. Por este motivo, los códigos de elementos finitos actuales incluyen una versión mejorada ("Updated Lagrangian") que permite un remallado automático o adaptación de mallado basado en la penetración de la herramienta y/o en la deformación de los elementos en contacto con la misma.

Sin embargo Umbrello et al., (2006) advierten de los puntos débiles de esta formulación; las altas tensiones y altos gradientes de temperatura a las que se ven sometidos los materiales hacen muy difícil el modelar el remallado. Así pues, es necesario un gran número de elementos en el mallado/remallado para obtener resultados locales en tiempo y espacio aceptables.

Existe un tercer método que combina las ventajas de ambos análisis Euleriano y Lagrangiano (Míguez et al., 2007). Se trata de la técnica "Arbitrarily Lagrangian-Eulerian (ALE)" Esta técnica es utilizada para evitar las altas frecuencias del remallado en el análisis Lagrangiano.

1.6.5 Modelos de deformación de material

Investigadores como Oxley (1989), Vöhringer y Schulze (2000), Joshi y Melkote (2004) y Liu y Melkote (2006) han desarrollado sus propias teorías y modelos de materiales. En concreto, el modelo formulado por Oxley (1989) es el más utilizado en los programas de simulación por el Método de Elementos Finitos.

Muchos autores han abogado por el modelo elástico - plástico (Mackerle, 2003) debido a que este método permite la predicción del llamado “efecto muelle” así como de tensiones térmicas y residuales (Astrom, 2004). Sin embargo en la gran mayoría de la literatura los autores se decantan por un modelo de material de tipo plástico o visco-plástico asimilable a la existencia de un proceso previo de precorte del material (Al-Zkeri, 2007).

Otro factor de deformación a tener en cuenta en los materiales es el índice de plasticidad, indicado mediante la tensión. Un modelo independiente de dicho índice, no tendrá en cuenta la tensión debida a la plasticidad en las ecuaciones usadas para el análisis. En los procesos deformacionales de los metales se ha comprobado que el índice de tensión es muy grande, y por lo tanto en la mayor parte de las simulaciones se utiliza un modelo de material dependiente del índice de plasticidad. Sin embargo, dado la dificultad de obtener datos en ensayos reales para determinados materiales, también se encuentran casos en los que se desprecia dicho índice.

Otros fenómenos como el criterio de fractura, el módulo de Young (para materiales elástico-plásticos), el módulo de Poisson o el coeficiente de expansión térmica también son indicaciones del material que van a servir para la perfecta definición del modelo de material a introducir en el análisis.

1.6.6 Adaptación del mallado (remallado) y regeneración

La adaptación de mallado es una técnica que reorganiza los elementos de un cuerpo mallado. Las tensiones a las que se ven sometidos los cuerpos y en particular cada uno de los elementos creados, hace que éstos se deformen. Con una reorganización de los elementos se impide la deformación excesiva de los mismos debido a tensiones ocurrida en el cuerpo mallado.

En el campo de la deformación el remallado es imprescindible para la simulación de la tracción, debido a las altas deformaciones producidas en los elementos de la pieza traccionada y porque el proceso se genera por deformación plástica. Sin la regeneración de elementos, las altas tensiones a las que los elementos están sometidos darían lugar a errores en la

convergencia de la solución así como a grandes distorsiones con respecto a la realidad.

El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos que son considerados adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia es lo que se denomina malla.

En este módulo se crea la forma geométrica del modelo a estudiar y se introducen las condiciones de contorno de la simulación. Es donde se debe crear y discretizar la solución dominio en elementos finitos, asumir una función forma a representar el comportamiento físico de un elemento, que es una función continua aproximada que se asume para la solución del elemento. Finalmente se deben aplicar condiciones de contorno, condiciones iniciales y cargas adecuadas para la simulación.

En toda simulación se tienen unas determinadas condiciones de contorno que deben ser modeladas según restricciones, temperaturas, cargas, desplazamientos, aceleraciones. En caso de existir más de un cuerpo en el modelo a estudiar, también se habrá de añadir la clase de interacciones existentes entre ellos. Esto es a lo que comúnmente se llama "contactos", que en la modelización de un proceso cobra una importancia relevante. En caso de existir condiciones iniciales que varían con las condiciones de la simulación.

1.6.7 Modelación de la curva Tensión - deformación

La creación de las curvas constitutivas tensión-deformación precisa la obtención de una gran cantidad de datos experimentales que no están disponibles para todos los materiales.

Una vez obtenidos los datos necesarios para la definición de un material, éstos deben ser introducidos punto por punto y curva a curva en el software. Cuantos más puntos se introduzcan, más definida estará la curva y habrá una mayor similitud entre los resultados simulados y los datos experimentales.

Evidentemente cuantas más curvas tensión-deformación se implementen para un material más cercana a la realidad será la simulación.

Se han de definir también los objetos que van a entrar en contacto. Existen varios tipos diferentes de objetos o cuerpos para la aplicación de contactos y el tratamiento de los mismos. De estos tipos cabe destacar dos, los cuerpos deformables y los cuerpos rígidos.

- **Cuerpos rígidos:** Definidos por una colección de curvas o superficies consideradas indeformables y sin masa. Pueden estar mallados o no.
- **Cuerpos deformables:** Definidos por una colección de nodos y elementos, los cuales tendrán las propiedades de rigidez habituales de cualquier modelo estructural de elementos finitos.

Cuando se desea ensayar una probeta mediante el ensayo de tracción simple se suele imponer una pequeña imperfección en la zona central con el fin de obligar a que la estricción se produzca en dicho lugar.

La respuesta de la probeta ensayada, posee dos etapas muy bien marcadas: una primera en la cual la respuesta es prácticamente homogénea y una segunda etapa que se caracteriza por la estricción que aparece en la zona central.

Cuando se realiza la simulación computacional del ensayo de tracción simple puede emplearse una probeta homogénea y realizar un estudio de autovalores para determinar la bifurcación y la trayectoria post-crítica (Needleman, 1972).

Una alternativa más habitual en la práctica computacional consiste en imponer una pequeña imperfección obteniéndose un problema de punto límite con imperfecciones.

Esta segunda opción, también empleada en el contexto de problemas de estabilidad elástica, se distingue por la sensibilidad de los resultados frente al tamaño de las imperfecciones.

Desde el punto de vista de la caracterización de las ecuaciones constitutivas, (García; Garino et al., 2004), la interpretación de los resultados del ensayo es clave para obtener buenos resultados. En consecuencia, es necesario

investigar si la sensibilidad de los resultados frente a las imperfecciones puede influir en la calibración de las ecuaciones constitutivas.

1.7 Análisis de sensibilidad global

Si bien en la literatura no se han realizado estudios de sensibilidad frente a las imperfecciones geométricas para este problema, pueden citarse otros análisis de sensibilidad. En (Simó, 1988b) se presentó la dependencia de los resultados frente a la discretización espacial, y en (Ponthot, 1994) se muestra que el problema es dependiente del programa de carga.

El interés del ensayo de tracción uniaxial es que permite calibrar las propiedades constitutivas de los metales para modelos elasto plásticos con grandes deformaciones, los trabajos iniciales de (Goicolea, 1985) en el contexto de los códigos con integración explícita. Posteriormente estos resultados se reproducen mediante integración implícita en trabajos previos de los autores (Goicolea et al., 1996; Gabaldón, 1999), empleando elementos con deformaciones supuestas (Simó y Armero, 1993; Simó et al., 1993) y el modelo constitutivo desarrollado por (García-Garino, 1993).

1.7.1 Modelos constitutivos para materiales

La distribución de tensiones y otros resultados de interés han sido estudiados hace ya tiempo (Bridgman, 1944; Davidenkov y Spiridonova, 1946) en base a algunos resultados experimentales.

En el ensayo de tracción simple, cuando se ha desarrollado la estricción, se alcanzan grandes deformaciones y grandes rotaciones. Por esta razón, para obtener resultados realistas es necesario emplear elementos con una descripción de la cinemática no lineal, y modelos constitutivos de plasticidad con grandes deformaciones.

El modelo elasto plástico de Von Mises, con endurecimiento isotrópico no lineal adecuada (potencial, saturación) se emplea habitualmente para representar el comportamiento de metales. También se han propuesto modelos más complejos para plasticidad de metales, por ejemplo aquellos en los que el endurecimiento depende del camino de carga (Ortiz y Popov, 1983), pero la

dificultad de los ensayos experimentales necesarios para su caracterización los han hecho poco utilizados.

Para metales dúctiles y procesos de carga suficientemente lentos, en los cálculos no intervienen los fenómenos relacionados con la mecánica de la fractura y los efectos dinámicos.

1.7.2 Interpretación analítica

El ensayo de tracción en metales dúctiles pasa por dos etapas desde el punto de vista del estado tensional de la probeta. En la primera, las deformaciones son pequeñas sin que exista una disminución apreciable de la sección transversal, y el estado tensional en el cuello es uniaxial con distribución homogénea de las tensiones. La segunda fase se presenta cuando la tasa de aumento de la tensión debido al endurecimiento del material es menor que la tasa con que disminuye la sección transversal. Entonces se presenta un fenómeno de inestabilidad de tipo geométrico, en el que las deformaciones se concentran en la sección central de la probeta, formándose un cuello o estricción. El flujo plástico queda confinado en esta zona, permaneciendo en estado de carga plástica, y el resto de la probeta queda en descarga elástica.

Esta segunda fase se caracteriza porque aparecen tensiones radiales y circunferenciales que dan lugar a un estado tensional triaxial no homogéneo en la zona del cuello.

Para una ecuación constitutiva permite calcular fácilmente la carga axial impuesta a partir únicamente del diámetro D del cuello. Esta propiedad, que puede ser sumamente útil para calibrar la ecuación constitutiva de un código de elementos finitos, ha sido sugerida en trabajos previos (García-Garino et al., 1999^a; García-Garino et al., 1999^b) y recientemente en (Valiente, 2001).

Desde el punto de vista experimental pueden citarse dos contribuciones muy importantes: (Norris et al., 1978) quien ensayó y simuló numéricamente probetas de acero y (Goicolea, 1985) que ensayó y estudió computacionalmente probetas de aluminio, ambos autores brindan abundante información

En el contexto de la Mecánica Computacional pueden citarse diferentes contribuciones. Los primeros resultados, obtenidos cuando el cálculo de diferencias/elementos finitos no lineales estaba en sus inicios, se deben a (Wilkins, 1968; Chen, 1971; Needleman, 1972; Norris et al., 1978; Goicolea, 1985). Posteriormente la simulación computacional de este ensayo ha recibido la atención de numerosos autores (Hallquist, 1982; Simó, 1988b; García; Garino, 1993; Simó y Armero, 1993; Ponthot, 1994; Goicolea et al., 1996; García-Garino et al., 1996), situándolo en el contexto de formulaciones modernas de la plasticidad basadas tanto en modelos hipoelásticos como modelos hiperelásticos con descomposición multiplicativa del gradiente de deformaciones.

Es importante señalar que, en general, en la literatura de Mecánica Computacional se ha empleado el problema para validar códigos e implementaciones numéricas de nuevos modelos constitutivos. Sin embargo, se ha dedicado menos atención a profundizar en algunos aspectos que todavía resultan objeto de discusión.

1.8 Ensayos experimentales y numéricos con probetas de acero

En los trabajos de (Norris et al., 1978) se estudiaron probetas de acero A 533 Grado B, Clase 1, extraídas de un material testigo reservado de un recipiente destinado a la industria nuclear.

Ensayaron las mismas siguiendo las normas de la ASTM (no indican la norma en cuestión), para lo cual utilizaron una máquina de ensayos equipada con celdas de carga, así como extensómetros y otros dispositivos de medición que fueron complementados con una serie de fotografías de alta resolución. De esta forma pudieron registrar diferentes variables de interés como la estricción y alargamiento de la probeta, forma del cuello.

La probeta estudiada era ligeramente cónica, con un diámetro máximo de 12,83mm., un diámetro mínimo de 12,70 mm. y la longitud total es 53,34mm.

Las propiedades mecánicas del material empleado son modulo de elasticidad $E = 207 \text{ GPa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,29$, tensión de fluencia inicial $Y_0 = 0,458 \text{ GPa}$ y tensión de rotura $\sigma_r = 0,621 \text{ GPa}$, para una reducción de

área del 65%. Los autores obtuvieron curvas de tensión axial media frente a la deformación logarítmica medida en el cuello. Asimismo se realizaron algunos estudios metalográficos. El más importante fue un corte longitudinal con el fin de investigar la densidad de huecos y defectos para correlacionarlos con los valores obtenidos numéricamente.

Para simular numéricamente el ensayo de tracción simple los autores emplearon el código HEMP (Giroud, 1973), para lo cual modelaron la probeta con 255 celdas, empleando una malla más refinada en la zona del cuello. El cociente de la tensión de fluencia y la tensión axial media σ/sz frente a la deformación plástica efectiva $\varepsilon^p = -2\log(D/D_0)$, también graficaron el cociente entre deformación radial y circunferencial $\varepsilon_r/\varepsilon_\theta$, también frente a deformación plástica efectiva $-2\log(D/D_0)$.

El gráfico $\sigma/sz - \varepsilon$ es importante para su comparación posterior con los resultados de este informe, así como para evaluar el factor de ajuste de Bridgman.

El ensayo de (Norris et al., 1978) fue tomado por (Hallquist, 1982) con el fin de calibrar su código NIKE2D. Este código se basa en una formulación elasto plástica con grandes deformaciones, y emplea un modelo constitutivo hipo elástico. Para describir el movimiento utiliza una formulación lagrangiana actualizada, la discretización espacial se basa en elementos finitos mixtos y resuelve tanto problemas cuasiestáticos como dinámicos. En los cálculos se adoptó el criterio de fluencia de Von Mises.

Se modeló la mitad de la probeta debido a la simetría respecto del plano $r - \theta$ en $z = 0$. Se emplearon 330 elementos axilsimétricos cuadriláteros con presión constante y la malla fue convenientemente refinada en la zona del cuello para obtener la misma densidad de celdas utilizada por (Norris et al., 1978). Las condiciones de contorno son las usuales: simetría a lo largo del eje z en $r = 0$ y en $z = 0$. Cabe destacar que se impidieron los desplazamientos radiales en el extremo donde se impone la carga. Se impusieron desplazamientos axiales de valor final $dL = 14$ mm. El análisis se realizó con 100 incrementos de carga.

En la simulación del problema se empleó la ecuación constitutiva, que se modeló como endurecimiento lineal por trozos. Los resultados obtenidos se ilustraron mediante la evolución de la estricción que contrastó muy bien con los resultados numéricos y experimentales debidos a (Norris et al., 1978). Se mostraron sucesivas mallas deformadas para ilustrar la aparición de la estricción, así como diferentes contornos de variables de interés en la zona del cuello para $D/D_0 = 0,540$. Puede decirse que este es uno de los primeros resultados del problema obtenido con un código elastoplástico relativamente moderno y que, sin duda, todavía es competitivo.

Estos resultados fueron reproducidos posteriormente por (Simó, 1988b) quien empleó un modelo más reciente basado en un material hiperelástico, y en la descomposición multiplicativa del tensor gradiente de la deformación F .

Se utilizó una descripción lagrangiana actualizada y elementos cuadriláteros mixtos. Simó adaptó la ley obtenida por (Norris et al., 1978) a una expresión cerrada denominada ley de saturación:

A grandes rasgos Simó reprodujo los resultados anteriores con la novedad de utilizar una gama de mallas de elementos finitos que cubrían un rango desde 50 hasta 1600 elementos, y empleó solo 14 pasos de tiempo. Si bien en este trabajo no se investigaron distribuciones de tensión y deformación, se señaló la sensibilidad de los resultados en función de la discretización espacial.

Este mismo problema fue estudiado por (Ponthot, 1994) quien empleó el código METAFOR para simular el ensayo. Este código se basa en elementos cuadriláteros mixtos, formulación lagrangiana actualizada y modelo constitutivo hipoeelástico. En su trabajo Ponthot reprodujo los resultados obtenidos por otros autores, y recopiló resultados previos del problema.

1.9 Comportamiento de los materiales

En los metales, la plasticidad se explica en términos de desplazamientos irreversibles. Los sólidos deformables difieren unos de otros en su ecuación constitutiva. Según sea la ecuación constitutiva que relaciona las magnitudes mecánicas y termodinámicas relevantes del sólido, se tiene la siguiente clasificación para el comportamiento de sólidos deformables:

Comportamiento elástico: se da cuando un sólido se deforma adquiriendo mayor energía potencial elástica y, por tanto, aumentando su energía interna sin que se produzcan transformaciones termodinámicas irreversibles (Ortiz, 2007). La característica más importante del comportamiento elástico es que es reversible: si se suprimen las fuerzas que provocan la deformación, el sólido vuelve al estado inicial de antes de aplicación de las cargas. Dentro del comportamiento elástico hay varios subtipos:

- Elástico lineal isótropo, como el de la mayoría de metales no deformados en frío bajo pequeñas deformaciones.
- Elástico lineal no-isótropo, la madera es material orto trópico que es un caso particular de no-isotropía.
- Elástico no-lineal.

El comportamiento dependerá de la forma concreta de la ecuación constitutiva que relaciona parámetros mecánicos importantes como la tensión, la deformación, la velocidad de deformación y la deformación plástica, junto con parámetros como las constantes elásticas, la viscosidad y parámetros termodinámicos como la temperatura o la entropía (Arrazola, 2007).

Se discute el ensayo de tracción simple con énfasis en los siguientes aspectos:

1. Interpretación analítica del ensayo
2. Simulación computacional del ensayo para probetas cilíndricas de acero y comparación de los resultados numéricos con los resultados experimentales.
3. Estudio de la tecnología de elementos finitos disponible para simular el problema.
4. Análisis de la sensibilidad de los resultados frente al tamaño de las imperfecciones geométricas.
5. Análisis de la sensibilidad de los resultados frente a la discretización espacial de la malla de elementos finitos.

En el trabajo más reciente consultado (Piñeiro, 2009) se realiza el comportamiento de la curva $\sigma - \epsilon$ para probetas de acero AISI 1045 sometidas a proceso de deformación y luego traccionada, con lo cual los valores obtenidos del ensayo de tracción y los cálculos de la resistencia máxima, junto

con el de las tensiones de rotura de cada probeta, se pudo construir y analizar la curva tenso - deformacional de cada una de ellas producto de su comportamiento al utilizar variables como fuerza aplicada (P), número de revoluciones (n) y avance (S), atendiendo al diseño de experimento, sin embargo no se tiene en cuenta la simulación computacional por el MEF, por lo que el objetivo principal de nuestro trabajo se centra en realizar dicha simulación a partir de los datos obtenidos en el mismo. Por lo que los datos a tener en cuenta se consultarán a partir del diseño de experimento establecido.

1.10 Conclusiones del capítulo I

- ✓ La tecnología de elementos finitos y los modelos constitutivos para grandes deformaciones elástico plásticas disponibles en la actualidad, permiten simular adecuadamente el ensayo de tracción simple.
- ✓ De los resultados obtenidos puede considerarse que la simulación computacional del ensayo de tracción simple es una herramienta válida para calibrar ecuaciones constitutivas en el rango de grandes deformaciones.

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 INTRODUCCIÓN

El conocimiento del diagrama característico del acero permite dimensionar las secciones sometidas a sollicitaciones normales (flexión, compresión) con mayor precisión y economía. Se recomienda por ello, que los fabricantes de acero establezcan y garanticen este diagrama para cada uno de los tipos que suministren, con el objetivo de poderlos tipificar como diagramas de proyecto. Para establecer el diagrama y comprobarlo con ensayos de recepción, se admite que es suficiente determinar las tensiones que corresponden a las siguientes deformaciones: 0,001; 0,002; 0,003; 0,004; 0,005; 0,006; 0,008 y 0,01.

En rigor, el límite elástico característico es el que corresponde en el diagrama característico a una deformación remanente del 0,2 %. Como simplificación puede adaptarse como valor característico del límite elástico el obtenido a partir de los valores de los límites elásticos de los ensayos de tracción realizados según norma UNE 7.262.

La resistencia (fluencia y rotura) es una propiedad o característica de un material o elemento mecánico. Esta propiedad puede ser inherente al material o bien originarse de su tratamiento y procesado. Habitualmente sólo se dispone de información correspondiente al ensayo de tracción. Los componentes de máquinas en general trabajan bajo estados de tensión multidireccional. El objetivo de las teorías de fallo estático es relacionar el fallo en un estado unidireccional (ensayo de tracción) con el fallo bajo cualquier estado de tensiones.

Se plantea como objetivo del capítulo

1. Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones en la que se realizarán los experimentos.

2.2 Selección del material a someter al proceso de endurecimiento y tracción

El acero AISI 1045 presenta gran capacidad de endurecimiento por deformación y una elevada resistencia al desgaste. Posee alta tenacidad y plasticidad, también es un material con facilidad de conformación y su costo de producción es bajo ofreciendo buenas condiciones de trabajo al desgaste y la fatiga.

La composición química estándar (ver tabla 2.1) de este acero según norma GOST y su equivalencias den otras normas como la American Society for Metals editada por

Databook (1988), muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System-UNS, de la American Society for testing Materials-ASTM y la SAE.

Tabla 2.1 Composición química estándar del acero 45

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0,45	0,25	0,65	0,40	0,10	0,40

La resistencia máxima a la tracción (σ_B), el límite de fluencia (σ_F) el alargamiento (δ) y la dureza (HB) para algunos aceros se recogen en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Muestra los valores de (σ_B) ; (σ_F) ; (δ) y (HB) para algunos aceros

NO SAE AISI	Resistencia a la tracción σ_B		Límite de fluencia σ_f		Alargamiento en 50 mm δ	Dureza brinell
	kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa	%	HB
1025	50,1	491,3	34,5	338,3	34	161
1035	59,8	586,4	38,7	377,5	29	190
1045	68,7	673,7	42,2	413,8	23	215

2.3 Normalización de las probetas para el ensayo de tracción

Según Caraballo (2006), para la realización de un ensayo de tracción se utilizan probetas normalizadas de acuerdo a las normas existentes, pueden ser probetas largas en las cuales la longitud de trabajo (l_0) es 10d y probetas cortas dado $l_0 = 5d$.

En estos ensayos pueden utilizarse probetas de sección transversal no circular, ya sea cuadrada o rectangular, en este caso la longitud l_0 se determina por la expresión (2.1).

$$\begin{array}{ll} l_0 = 11,3\sqrt{S_0} & \text{Probetas largas} \\ l_0 = 5,65\sqrt{S_0} & \text{Probetas cortas.} \end{array} \quad (2.1)$$

Dimensiones de las probetas para D_o igual a 10 ó 20mm de sección circular:

Probetas largas para Do igual a 20mm

$$L_0 = 10 D_0; L = 11 D_0$$

Probetas cortas para Do igual a 20mm

$$L_0 = 5 D_0; L = 6 D_0$$

Probetas largas para Do igual a 10mm

$$L_0 = 10 D_0; L = 11 D_0$$

Probetas cortas para Do igual a 10mm

$$L_0 = 5 D_0; L = 6 D_0;$$

Para el ensayo de tracción utilizaremos probetas cortas para diámetro $D_0 = 11\text{mm}$, atendiendo a la Norma Internacional NTC 595 (ver la tabla 2.3 y figura 2.1; 2.2). El tipo elegido es M II.

Tabla 2.3 Muestra las dimensiones de las probetas según NTC 595

Dimensiones (véase fig. 2.1)		Tipo M I	Tipo M II	Tipo M III
D_0	Ancho de la sección reducida	20	11	6
W	Longitud de la sección reducida	160	60	35
D	Ancho total mínimo	25	20	13
L_0	Longitud total mínimo	220	120	85
G	Longitud de la marca	-	50	-
G	Longitud de la marca	125	-	25
L	Distancia entre mordazas	170	70	40

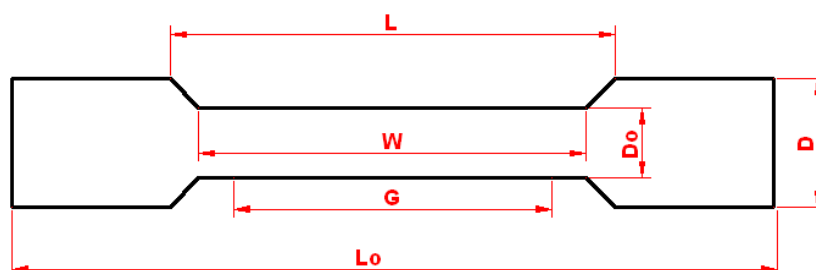


Figura 2.1 Probeta normalizada para un ensayo de tracción

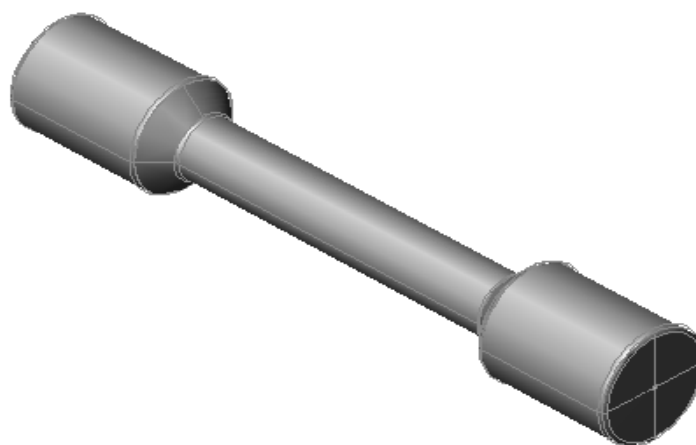


Figura 2.2 Vista en 3D de la probeta luego de su elaboración

Para las características expuestas por (Caraballo, 2006) en la Guía Metodológica para el ensayo de tracción, (L_0) es la longitud de trabajo, en la Norma Internacional NTC 595 se designa como (G), que es la longitud de la marca, y (L) aquí es igual a (W), llamada longitud de la sección reducida, ya que (L) en esta norma es la distancia entre mordazas. El ancho total mínimo o diámetro (D), es el menor que puede tener la probeta para que pueda ser agarrada sin dificultad, por las mordazas de la máquina de tracción, para que de esta forma no pueda desplazarse.

2.4 Características de la máquina herramienta para la fabricación de las probetas

Los trabajos de torneado y la experimentación se realizaron en el torno 16 K 20, el mismo puede efectuar todas las operaciones en cuerpos de revolución, presenta las mejores cualidades del sistema de mando, el cual tiene centralizado todas las operaciones de trabajo y auxiliares.

❖ Características técnicas. Torno universal de cilindrar y roscar: Modelo 16K20

Distancias entre puntos.	1000 / 1330 mm
Altura de los puntos.	215 mm
Diámetro máximo de la pieza a trabajar.	400 mm
Diámetro máximo de la pieza a trabajar sobre el carro transversal.	220 mm
Diámetro máximo de la barra que pasa por el husillo.	.50 mm
Masa máxima de la pieza que se instala en los puntos.	650/900 kg
Masa máxima de la pieza que se instala en el plato.	200 kg
Limite de los pasos de rosca que se tallan.	

- Métricas de modulo: 0,5 - 122 mm

- Espiras por pulgadas: 56 – 0,5

Gama de los números de revoluciones (rev/min): 12.5; 16; 20; 25; 31.5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600.

Gama de los avances longitudinales (mm/rev): 0.05; 0.06; 0.075; 0.09; 0.1; 0.125; 0.15; 0.175; 0.2; 0.025, 0.3; 0.35; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 1.0; 1.2; 1.4; 1.6; 2.0; 2.4.

Desplazamiento máximo del carro portacuchillas del soporte mecánico. 140 mm

Gama de los avances transversales mm/rev. 1/2 de los longitudinales

Longitud máxima del torneado. 935/1335 mm

Valor de las carreras aceleradas en mm/min.

- Longitudinales: 3800

- Transversales: 1900

Dimensiones máximas del cuerpo de la cuchilla (ancho por alto). 25x25 mm

Valor de una división del limbo, en mm.

- Longitudinal: 1,0

- Transversal: 0,5 por el diámetro de la pieza

Potencia del electromotor del accionamiento principal. 11 Kw



Tensión.	400 Volt
Fuerza máxima laborable sobre el mecanismo de avance.	.400 kgf

2.5 Elaboración mecánica de las probetas para el endurecimiento por deformación plástica superficial con rodillo

Para la elaboración de las probetas, se realiza el corte con una segueta mecánica para corte de metales, garantizando un constante y severo régimen de enfriamiento evitando que el calentamiento producido por la fricción durante el proceso de corte pudieran aparecer transformaciones en la estructura.

Corte de las probetas L = 120 mm X 20 mm. Norma NTC 595

Todas las probetas se someten al régimen de maquinado por lo que se asume la posibilidad de que en las superficies de las mismas haya estado presente el fenómeno de la acritud aunque en poca escala.

Para garantizar el buen acabado superficial obtenido y previo al tratamiento, la probeta se cilindrará exteriormente entre plato y punto, con los siguientes datos de corte:

n = 250 rev/min, S = 0,2 mm/rev.

En el torneado se empleara una cuchilla de 45° con sujeción mecánica SANDVIK, código del vástago PSSN R 25 25 M 12, con una plaquita SNMG 12 04 08-PM de calidad 4 025 (SANDVIK Coromant KoroKey, 1996)

2.5.1 Velocidad de corte de las probetas

La velocidad de corte de las probetas debe ser adecuada ya que el mismo depende de varios factores y en ningún caso se debe superar la que aconsejan los fabricantes de las herramientas de corte.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.2)$$

Donde:

V_c = Velocidad de corte; m/min .

D = Diámetro de la pieza; mm .

n = Número de revolución; rev/min .

1 000 = Factor de conversión de metro a milímetro.

2.5.2 Profundidad de corte de las probetas

La profundidad de corte de las probetas es la dimensión de la capa de metal que arranca la cuchilla de una pasada. Si una pieza cilíndrica de diámetro D se torneaba de una pasada de la cuchilla hasta el diámetro d , entonces la profundidad de corte es igual a la mitad de la diferencia entre los diámetros.

$$t = \frac{D - d}{2} \quad (2.3)$$

Donde:

t = Profundidad de corte; mm.

D = Diámetro de la pieza antes y después de la elaboración; mm.

2.5.3 Tiempo de maquinado de las probetas

El tiempo de maquinado para las probetas es el tiempo invertido por el operario en la ejecución del trabajo, también conocido por tiempo básico o tiempo total de maquinado.

$$T_m = \frac{L}{n \cdot s} \cdot i \quad (2.4)$$

Donde:

T_m = Tiempo de maquinado; mm.

L = Longitud a maquinar; mm.

i = Números de pasadas.

n = Números de revoluciones; rev/min.

s = Avance; mm/rev

2.5.4 Endurecimiento por Deformación Plástica Superficial con rodillo de las probetas

La magnitud del endurecimiento por deformación en frío y el nivel de las tensiones remanentes en la capa superficial dependen de la fuerza (P); del número de revoluciones (n); del avance (S); de la geometría de la herramienta (ver anexo figura 2.3 y 2.4) como también de la pieza y las propiedades iniciales del material en tratamiento (HB). Para el diseño del experimento se tendrá en cuenta las mismas condiciones de elaboración según Fernández (2007), donde las variables de la experimentación aparecen en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Parámetros de entrada del experimento

Parámetros	Símbolo	Niveles		
		Mínimo	Medio	Máx.
Fuerza (N)	P	500	1 500	2 500
Número de revoluciones	n	27	54	110
Avance (mm/rev)	S	0,075	0,125	0,25
Dureza (HV)	H	HV	HV	HV
Diámetro del rodillo (mm)	50			

Se determina el número de experimento cuando intervienen k factores con tres niveles cada uno (-1, Δ y +1), con un arreglo de la función exponencial:

$$N = 3^k$$

Donde:

N = Número de experimentos.

K = Número de factores.

En este caso, se analizará la influencia de dos factores, de aquí que $k = 2$ luego, el número de experimento sería:

$$N = 3^2 = 9 \text{ experimentos.}$$

2.6 Metodología y equipos empleados en la experimentación

La eficacia de la estructura de la producción es una consecuencia que depende de cuan correcta haya sido en su elaboración la solución de las cuestiones vinculadas con el nivel de aprovechamiento del equipo tecnológico, con el ciclo prolongado de la producción y con la organización de un trabajo rítmico.

2.6.1 Máquina para ensayos de tracción

Para la obtención del diagrama tensión-deformación necesitamos traccionar una probeta con determinadas características que ya han sido expuestas anteriormente, es por eso que se requiere para la experimentación una máquina por lo general, capaz de:

- Alcanzar la fuerza suficiente para producir la fractura de la probeta.
- Controlar la velocidad de aumento de fuerzas.
- Registrar las fuerzas (F), que se aplican y los alargamientos (L) observados en la probeta.

2.6.2 Datos técnicos de la máquina de ensayos de tracción - compresión

La máquina de ensayo impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas están conectadas a un ordenador que registra el desplazamiento y la carga leída. Utiliza en su parte frontal una escala graduada en kgf donde se puede leer con facilidad el valor de la carga aplicada de acuerdo a la escala utilizada. También consta de un sistema para gráficos que permite obtener el diagrama de tracción del material ensayado; en el eje de las abscisas se registra el alargamiento y en el eje de las ordenadas las cargas actuantes. El diagrama obtenido de la máquina está en función de la carga (P) en kgf, y de la deformación (Δl) en mm. En la figura 2.5 (ver anexo) se muestra una imagen de la máquina de tracción-compresión empleada en la experimentación, la cual se encuentra ubicada en el laboratorio de materiales de la carrera de Ing. Mina del ISMM.

Indicador técnico del calibre: el rango del máximo de longitud: 200 mm

El rango de longitud: 0 - 25 mm

El valor de la división de tambor microscópico 1 intervalo de la graduación = 0,2 μ m

El valor de la división de cursor del arbusto 1 posterior = 0,2 mm

La precisión (el error de valor indicado) 2 mm dentro de 25 mm

2.6.3 Técnicas operatorias para el ensayo de tracción

El tipo de ensayo más utilizado para valorar las propiedades mecánicas de los materiales es el de tracción uniaxial. Este ensayo se puede realizar fácilmente y permite determinar varias características mecánicas importantes de los materiales, las que pasan a ser criterios de su calidad; al mismo tiempo permiten juzgar con suficiente exactitud el comportamiento del material cuando está sometido a otros tipos de solicitaciones.

El propósito de este ensayo consiste en determinar mediante el proceso de tracción de una probeta metálica hasta la rotura, sus características mecánicas, como son:

σ_p – límite de proporcionalidad; σ_f – límite de fluencia; σ_r – límite de rotura;

E – Modulo de Elasticidad; % δ - % de elongación; % φ - % de estricción.

La determinación de las propiedades plásticas del material se realiza a través del % de elongación o alargamiento y la estricción o la reducción relativa.

Al realizar el experimento se emplean probetas normadas o estandarizadas, acordes con las normas vigentes. Esto es debido a que los resultados de los experimentos con probetas de un mismo material, pero con dimensiones y formas diferentes varían.

2.6.4 Procedimiento para el ensayo de tracción

Antes de colocar la probeta en la máquina, con un Pie de Rey se mide su diámetro (d_0) y se establece su longitud de trabajo marcando con un contrapunzón (estos datos se anotan en la tabla 2.4).

El orden de ejecución de las operaciones para la realización del ensayo es como sigue:

1. Selección de la escala de carga a utilizar.
2. Colocar la probeta en las mordazas de la máquina de tracción-compresión.
3. Colocar el extensómetro u otro medio de medición de los desplazamientos.
4. Colocar el papel milimetrado y el centropen para registrar en el papel las variaciones de carga y desplazamiento.
5. Conectar el chuchó general de la máquina.
6. Se aplica la carga.

Mientras la máquina tracciona la probeta, se debe observar detenidamente todos los detalles que ocurren en relación al ensayo.

El cálculo del módulo de elasticidad (E) se realiza a partir de las mediciones de tensión y sus correspondientes deformaciones, el valor se obtiene entonces por la siguiente expresión:

$$E = \frac{\sigma_p}{e_p} \quad (2.5)$$

Donde:

E – Límite de proporcionalidad.

σ_p - Límite elástico.

e_p - Elongación.

El límite elástico se calcula por la siguiente ecuación:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_0} \quad (2.6)$$

Donde:

F_p - Tensión límite de proporcionalidad.

A_0 - Área inicial.

$$A_0 = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{d_o}{2}\right)^2$$

Donde:

d_o - Diámetro inicial

La elongación se determina como:

$$ep = \frac{\Delta L_p}{L_0} \quad (2.7)$$

Donde:

L_0 - Elongación inicial.

Para usar la elongación debemos recordar que $\Delta L_p = \text{Long.finl} - \text{long.inicl}$ y la longitud total es la longitud inicial menos el 30% de la misma longitud.

La tensión de fluencia se calcula por:

$$\sigma_F = \frac{F_F}{A_0} \quad (2.8)$$

F_F - Tensión límite de fluencia.

El esfuerzo a la rotura se puede llamar también como la resistencia máxima a la tracción (σ_B), o tensión máxima del material y se puede calcular por:

$$R = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (2.9)$$

$F_{\max} = Fu$ - Esfuerzo máximo.

Después de este punto el material comienza a debilitarse llegando a la fractura del mismo conocido como tensión de rotura y se determina:

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A_0} \quad (2.10)$$

Donde:

F_R - Punto de rotura o fallo.

Al romperse la probeta se retira la misma de la máquina y con el Pie de Rey determinan su longitud final (l_f), así como el diámetro (d_f) en la zona del cuello (estos datos se anotan en la tabla 2.5).

El comportamiento plástico del material se valora a partir de las magnitudes $\% \delta$ y $\% \varphi$, las cuales se calculan por las siguientes expresiones:

$$\% \delta = l_f - l_o / l_o * 100. \quad (2.8.a)$$

$$\% \varphi = A_o - A_f / A_f * 100. \quad (2.8.b)$$

A partir del gráfico que dibuja la máquina también se pueden obtener las propiedades mecánicas que constituyen el objeto de este trabajo, para ello se retira el gráfico de la maquina de ensayo situando los puntos fundamentales.

Tabla 2.5 Dimensiones de las probetas en [mm] antes y después del ensayo

Probeta	Antes del ensayo			Después del ensayo		
	l_o	d_o	$A_o = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4}$	l_f	d_f	$A_f = \frac{\pi \cdot d_f^2}{4}$
1						
2						

Para la presentación de los resultados se elaborará un sistema de comparaciones de los resultados obtenidos, brindados por las probetas de los cálculos realizados y los gráficos contruidos con los datos necesarios, así como las diferentes tablas.

2.7 Procedimiento para la modelación por Método de Elementos Finitos

Al objeto de determinar las tensiones generadas en barras de acero AISI 1045 sometidas a deformación por rodadura y luego traccionadas mediante simulación numérica por elementos finitos. Para ello se ha utilizado el paquete de software COSMOS DESING STAR. El modelo empleado considera la tracción de estas probetas considerando la estricción en el cuello en las mismas para evaluar las tensiones. Para esta simulación se tuvo en cuenta:

1. Obtención del modelo geométrico
2. Aplicación de las condiciones de fronteras y de cargas
3. Mallado
4. Búsqueda de la solución (solver)
5. Realización del post procesamiento y obtención de las respuestas en el domino de las tensiones, los esfuerzos y los desplazamientos

En el Método de Elementos Finitos es necesario definir los esfuerzos y los desplazamientos; para los esfuerzos (Zienkiewicz, 2000) el sistema fijo de coordenadas cartesianas se denota como x, y, z ó en forma indexada x_1, x_2, x_3 , de la misma manera los desplazamientos pueden ser denotados como u, v, w ó u_1, u_2, u_3 . Por ello es posible definir x_i como las coordenadas y u_i como los desplazamientos, siendo los rangos de 1, 2, 3.

2.7.1 Mallado del modelo

La resolución de cualquier problema, ya sea mecánico o de cualquier otro tipo, mediante el método de los elementos finitos requiere definir previamente el mallado de elementos (i.e. discretizar el problema). El modelado mediante elementos finitos (FEM) involucra, además, la elección del tipo de elementos (i.e. las funciones de forma), del modelo constitutivo correspondiente a cada elemento y del tipo de algoritmo numérico (solver) que se utilizará para resolver el sistema de ecuaciones. La figura 2.3 establece el comportamiento del mallado para el proceso de simulación.

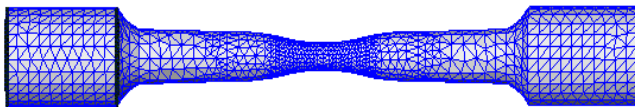


Figura 2.3 Comportamiento del mallado en la probeta para la simulación

2.7.2 Los elementos en el mallado

Un elemento es algo más que una determinada región en una malla. Cuando se programa un elemento hay que definir la expresión analítica de las funciones de forma de sus nodos.

El bloqueo de elementos es un fenómeno numérico que acontece cuando el número de ligaduras iguala al número de grados de libertad del elemento. Cuando esto sucede, el elemento no puede sufrir ningún tipo de deformación, i.e. se vuelve irrealmente rígido. Los elementos no lineales son más susceptibles de sufrir bloqueo, porque al aumentar el número de nodos aumenta el número de ligaduras.

2.8 Conclusiones del capítulo

✓ Se selecciona el acero AISI 1045 para someter a la deformación plástica superficial explicando sus características y composición química ya que mismo posee una gran capacidad de endurecimiento de las capas por acritud.



- ✓ Se realizó el proceso de fabricación de las probetas, teniendo en cuenta las normas estandarizadas de las mismas, como también la matriz experimental a aplicar para la deformación plástica superficial con rodillo, sobre las piezas simétricas rotativas de acero AISI 1045, para luego ser ensayadas a tracción, describiendo la técnica operativa a seguir en este caso.
- ✓ Los parámetros de deformación para la simulación por el Método de Elementos Finitos (fuerza, avance y número de revolución) constituyen factores principales para establecer el comportamiento de la distribución de las tensiones en las probetas deformadas por rodadura y luego traccionadas.

CAPÍTULO III ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 INTRODUCCIÓN

La deformación de los materiales se caracteriza por la composición química, las propiedades mecánicas y físicas del material, teniendo en cuenta la superficie a deformar. La elección de los parámetros durante el ensayo determinan en gran medida los resultados que queremos obtener.

El análisis de estos resultados permite evaluar el comportamiento del material AISI 1045 bajo estas condiciones de operación.

En éste capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, las expresiones matemático - estadísticas que describan las regularidades del comportamiento de la curva tenso - deformacional del acero AISI 1045 endurecido por deformación plástica superficial sometido a la acción de cargas de tracción. Así mismo se revela a partir de los modelos experimentales obtenidos; el mecanismo de rotura del acero 45 en las referidas condiciones empleando el MEF.

El objetivo del capítulo es:

Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

3.2 Establecimiento del modelo

Para reproducir numéricamente el ensayo de tracción, se ha escogido la probeta de acero AISI 1045 normalizada según Norma Internacional NTC 595, en este caso se estableció que la probeta a emplear sería del Tipo M II con una longitud de 120 mm y diámetro 11 mm.

3.2.1 Características mecánicas del acero AISI 1045

El análisis numérico de sólidos no lineales sometidos a grandes deformaciones, requiere para su validez que el modelo constitutivo tensión-deformación sea fiable. Un procedimiento relativamente sencillo y económico para caracterizar estas leyes en metales dúctiles es el ensayo de tracción simple. Para caracterizar el comportamiento elástico del material, los procedimientos de ensayo están normalizados: ASTM E 8-82 (Methods of tension testing of metallic materials), UNE

7474-1 (Materiales Metálicos. Ensayo de Tracción. Parte 1: Método de Ensayo). La tabla 2.1 y 2.2 recoge la composición química y las características del acero AISI 1045. Con los resultados tabulados de las características del acero se podrá determinar el comportamiento de los resultados de los diferentes ensayos después de ser sometidos a cargas y deformación empleando el Método de Elementos finitos.

3.3 Determinación de los regímenes de corte para la elaboración de las probetas

Los trabajos de torneado y cilindrado se realizaron en el torno 16 K 20, el mismo puede efectuar todas las operaciones en cuerpos de revolución.

3.3.1 Cálculo de de la velocidad de corte

Casillas (1987), Fernández, Rodríguez, Alcántara (2007), recomiendan que para el maquinado de estos aceros la frecuencia de rotación (n), se debe tomar entre valores de 125 a 250 rev/min, y el s = 0,3...0,4, considerando la fiabilidad del equipo adoptamos como:

n = 250 rev/min y s = 0,3 mm/rev. Sustituyendo en la ecuación (2.2), entonces:

$$V_c = \frac{3,14 \cdot 22 \cdot 250}{1000} = 17,27 \frac{m}{s}$$

La velocidad de corte que se empleará durante el proceso agilizará el proceso, obteniendo un buen acabado, pero además evitará el deterioro de la herramienta cortante.

3.3.2 Obtención de la profundidad de corte

Para una barra de acero laminado con diámetro igual a 22 mm según la ecuación (2.3), entonces sería:

$$t = \frac{22 - 20}{2} = 1mm$$

La profundidad de corte a desbistar sería es 1 mm, si se tiene en cuenta que en las operaciones de torneado al desbistar en una pieza cilíndrica, 1 mm representa entonces desbistar 2 mm, y como son 20 mm a quedar por las características que establece la norma NTC 595 (probeta tipo M II) para la elaboración.

3.3.3 Determinación del tiempo de maquinado

El tiempo invertido por el operario en la ejecución del trabajo, sustituyendo en la ecuación (2.4), sería:

$$T_m = \frac{125}{250.0,3} \cdot 1 = 1,6 \text{ min}$$

Este resultado es solo para una probeta y como se prepararán 3 probetas para los ensayos de tracción, entonces el tiempo total sería 4,8 min.

3.3.4 Análisis de la velocidad de deformación

Recordemos que el endurecimiento por Deformación Plástica Superficial con rodillo para probetas de acero AISI 1045 se hace atendiendo al diseño de experimento con las variables (n); (S) y (P), por tanto se empleara para la velocidad de deformación la misma ecuación que se utiliza para los regímenes de corte.

❖ Velocidad de deformación para fuerza de 500 N

Con este parámetro se deformará una probeta.

$$V_d = \frac{3,14 \cdot 11 \cdot 25}{1000} = 0,86 \text{ m/s}$$

❖ Velocidad de deformación para fuerza de 1500 N

Con este parámetro se deformará una probeta.

$$V_d = \frac{3,14 \cdot 11 \cdot 50}{1000} = 1,7 \text{ m/s}$$

❖ Velocidad de deformación para fuerza de 1500 N

Con este parámetro se deformará una probeta.

$$V_d = \frac{3,14 \cdot 11 \cdot 100}{1000} = 3,4 \text{ m/s}$$

Estos resultados definen que en la medida que existe mayor velocidad de deformación, conjuntamente con la mayor fuerza aplicada, habrá mayor dureza en la superficie, así como mayor profundidad de la capa deformada.

3.3.5 Análisis del cálculo del tiempo de deformación

El tiempo para el endurecimiento por deformación plástica superficial con rodillo como se demuestra a continuación depende también de los avances, así como del número de revoluciones.

El tiempo para la deformación empleado en las probetas sería:

❖ Fuerza de 500 N y S = 0,075

$$T_d = \frac{60}{25.0,075} = 32 \text{ min}$$

❖ **Fuerza de 1500 N y S = 0,125**

$$T_d = \frac{60}{50.0,125} = 9,6 \text{ min}$$

❖ **Fuerza de 2500 N y S = 0, 075**

$$T_d = \frac{60}{100.0,25} = 2.4 \text{ min}$$

Esto demuestra que en la medida que se incrementa el avance (S), conjuntamente con el número de revoluciones (n), para endurecer las probetas, disminuye el tiempo en cada operación.

3.4 Determinación de las áreas iniciales y finales de las probetas

La tabla 2.5 se empleó con el fin de utilizar los resultados producto del los cálculos dando lugar a la tabla 3.1, necesario esto para determinar las tensiones. Para esto se deben medir los diámetros y las longitudes (l_o ; l_f ; A_o y A_f) de cada probeta ensayada.

En esta tabla, el primer resultado, es de la probeta patrón, la misma no es sometida al proceso de deformación, pero si es traccionada para comparar su tensión límite de resistencia a la tracción con el resultados mostrado en la tabla 2.2 del capítulo 2 del acero AISI 1045.

Tabla 3.1 Muestra los resultados de las áreas iniciales y finales de las probetas

Probeta	Antes del ensayo			Después del ensayo		
	l_o	d_o	$A_o = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4}$	l_f	d_f	$A_f = \frac{\pi \cdot d_f^2}{4}$
	mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ²
Patrón	120,12	11,05	95,89	143,59	5,51	23,81
1	120,11	10,54	87,25	133,56	6,40	32,17
2	120,13	10,63	88,74	132,10	7,65	45,96
3	119,98	10,68	89,58	131,30	8,46	56,21
4	120,05	10,72	90,25	134,80	6,60	34,21
5	120,01	10,65	89,08	133,25	7,56	44,88
6	119,95	10,64	88,91	130,80	8,01	50,39
7	120,17	10,68	89,58	135,09	6,50	33,18
8	120,04	10,79	91,43	133,87	7,28	41,62
9	119,90	10,70	89,92	127,30	8,90	62,21

Los diámetros iniciales de las 3 probetas del experimento son tomados después de ser sometidas al proceso de endurecimiento por deformación plástica superficial con rodillo, originando la deformación de la capa tomada con un micrómetro que varia entre 0,35 y 0,47mm.

Nota: A las 3 primeras probetas se les realizó el cálculo, las demás fueron tomadas junto a las anteriores para la realización del ensayo de tracción por simulación computacional MEF.

3.5 Determinación de las tensiones en las probetas ensayadas

El cálculo de los esfuerzos máximos a la tracción se realiza según la ecuación (2.9) del capítulo 2, para las probetas ensayadas después de ser deformada plásticamente con rodillo, el primer resultado es el de la probeta patrón.

Probeta Patrón

$$\begin{aligned}d_o &= 11.05mm & A_o &= \pi \cdot \left(\frac{d^2}{2}\right) [mm^2] & \sigma_B &= \frac{Fu}{A_o} [MPa] \\Fu &= \left(6.5 + 5 \cdot \frac{0.5}{25}\right) [tf] \\Fu &= 6.6tf & \sigma_B &= 674.91MPa\end{aligned}$$

Utilizando los valores de la tabla 3.1, junto con el esfuerzo máximo indicado por la máquina de tracción-compresión, durante la realización del ensayo y sustituyendo en la ecuación (2.9), obtendremos el valor de la tensión límite de resistencia a la tracción (σ_B). Al analizar el resultado obtenido de la tensión límite de resistencia (σ_B), después del ensayo de tracción de la probeta patrón sin deformar, demuestra que estos resultados tienen correspondencia con los valores reales mostrados en la tabla 2.5 del capítulo 2 del acero AISI 1045. Esto nos asegura que lo obtenido es bastante confiable.

Probeta N° 1

$$\begin{aligned}1tf &\approx 1000 Kgf \\d_o &= 10.54mm \\Fu &= \left(7.5 + 10 \cdot \frac{0.5}{25}\right) [tf] \\Fu &= 7.7tf \\A_o &= \pi \cdot \left(\frac{d^2}{2}\right) [mm^2] \\ \sigma_B &= \frac{Fu}{A_o} [MPa] \\ \sigma_B &= 865MPa\end{aligned}$$

Probeta N° 2

$$\begin{aligned}d_o &= 10.63mm \\Fu &= \left(7.5 + 23 \cdot \frac{0.5}{25}\right) [tf] \\Fu &= 7.96tf \\A_o &= \pi \cdot \left(\frac{d^2}{2}\right) [mm^2] \\ \sigma_B &= \frac{Fu}{A_o} [MPa] \\ \sigma_B &= 879MPa\end{aligned}$$

Probeta N° 3

$$\begin{aligned}d_o &= 10.68mm \\Fu &= \left(8 + 20 \cdot \frac{0.5}{25}\right) [tf] \\Fu &= 8.4tf \\A_o &= \pi \cdot \left(\frac{d^2}{2}\right) [mm^2] \\ \sigma_B &= \frac{Fu}{A_o} [MPa] \\ \sigma_B &= 919MPa\end{aligned}$$

3.5.1 Análisis de las tensiones de resistencia a la tracción del acero AISI 1045

La tensión límite de resistencia de las probetas fabricadas de acero AISI 1045, endurecidas plásticamente por rodadura aumentó considerablemente si tenemos en cuenta las dimensiones con que fueron elaboradas. Los valores oscilan entre 865 MPa y 919 MPa, demostrando que en condiciones de aplicación de cargas entre 500 y 2500 N se endurece la superficie por acritud, por lo que se considera un incremento de la dureza en cada una de ellas.

3.5.2 Determinación de la tensión de rotura en las probetas endurecidas

Para este cálculo utilizamos también los valores de la tabla 3.1, junto con el esfuerzo de rotura. Este se nota en la máquina de tracción-compresión por el decrecimiento del esfuerzo, el cual esta representado por el segundo indicador de carátula del equipo, llegando hasta el punto de rotura perfectamente observado, ya que a partir de ahí este cae aceleradamente. Utilizando la ecuación (2.10), y siguiendo la misma metodología de resolución de cálculo anterior conseguiremos el valor de la tensión de rotura (σ_R).

Como solo varia el esfuerzo de rotura, si evaluamos la ecuación (2.10) para:

$$Fr1 = 6,7 \text{ tf} \quad Fr2 = 6,96 \text{ tf} \quad Fr3 = 7,4 \text{ tf}$$

$$\sigma_R(1...3) = \frac{F_R(1...9)}{A_0}$$

Entonces:

$$\sigma_R(1 \dots 3) = (753 \text{ MPa} ; 769 \text{ MPa} ; 810 \text{ MPa})$$

Estos resultados son las tensiones de rotura de las respectivas probetas ensayadas.

3.5.3 Análisis de las tensiones de rotura de las probetas

La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Realmente la tensión de rotura (zona de estricción) no es importante, pues con ella no se trabaja en ingeniería. Algunos materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose de forma brusca.

3.6 Simulación por el Método de Elementos finitos

Para el desarrollo de la estricción en el MEF, está motivado por la introducción de una pequeña imperfección geométrica (también presente en la probeta real), disminuyendo el radio en la sección central respecto del nominal. La variación del radio entre la sección central y la sección extrema es lineal.

En la definición de las imperfecciones se realizó el estudio numérico, se parte de una geometría perfectamente cilíndrica de diferentes diámetros (d_0) como se observa en la tabla 3.1, y se introduce una serie de imperfecciones en la sección central disminuyendo ligeramente el diámetro.

A partir de las bases de datos obtenidas se procedió a realizar la simulación por el MEF de las probetas deformadas por rodadura y luego sometida a ensayo de tracción, para cada una de las simulaciones se emplearon las muestras reales tratando en todo lo posible de introducir todos los datos en condiciones reales en que se desarrollaron los experimentos de tracción. En la figura 3.1 aparece la probeta real deformada con fuerza de 500 N, avance de 0,075mm/rev y 27 rev/min.



Figura 3.1 Probeta 1 traccionada con fuerza de 500 N, avance de 0,075 mm/rev y 27 rev/min
Los valores obtenidos para la deformación de la probeta mostrada en la figura 3.1, aparecen en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores del ensayo de tracción a la 1ra probeta

Probeta 1											
MPa	0	95	190	285	380	475	570	665	760	855	753
mm	0	0,0267	0,0534	0,0801	0,1068	0,1335	0,1602	0,1869	0,2136	0,2403	0,267

La figura 3.2 muestra las mayas deformadas de la probeta 1 después de haber realizado el ensayo de tracción mediante la simulación por el MEF.

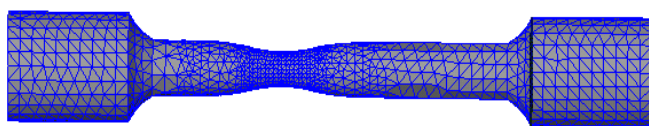


Figura 3.2 Probeta 1 enmallada

En la figura 3.2 se obtiene un modelo con 2 637 nodos y 10 268 elementos, resultando un total de 12 905 grados de libertad, y la figura 3.3 y 3.4 muestran los esfuerzos y deformaciones obtenidos por el MEF después del ensayo de tracción.

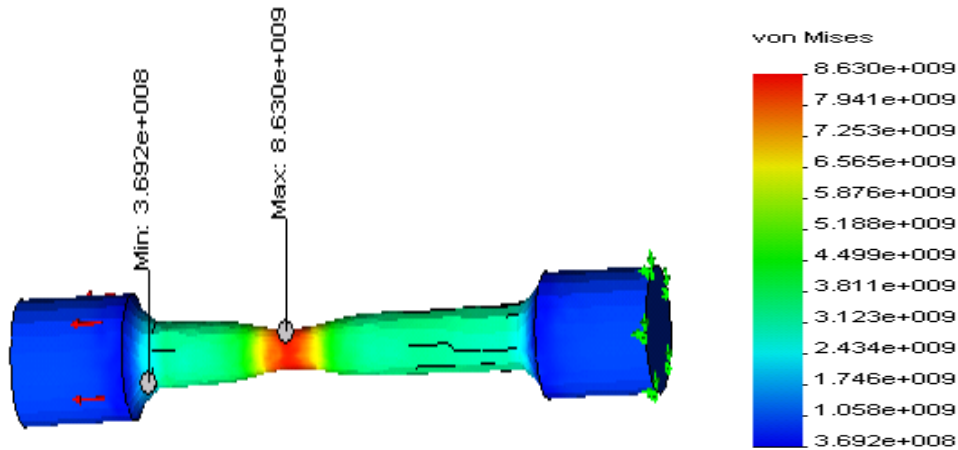


Figura 3.3 Esfuerzos obtenidos en el cuello de la probeta 1

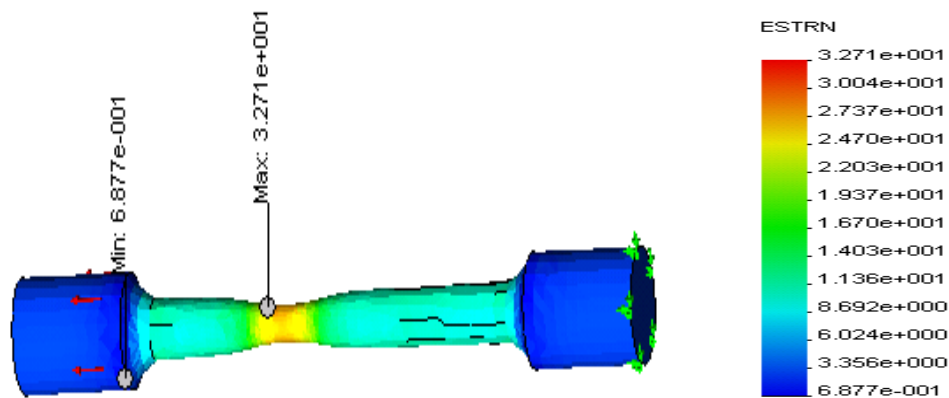


Figura 3.4 Deformaciones que se obtienen en el cuello de la probeta 1

Como se observa en ambas figuras, para fuerza de 500 N, S de 0,075 mm/rev y 27 revoluciones por minutos para la probeta deformada en frío, surge además otro estado tensional en el cuello de la probeta, así como otro estado deformacional

3.6.1 Análisis de la simulación de la probeta 2

Se realizó para la probeta 2 el mismo procedimiento, con fuerza de 1 500 N, S de 0,125 y número de revolución de 27 rev/min, los resultados obtenidos se observan en las figuras 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8.



Figura 3.5 Probeta 2 traccionada con fuerza 1 500 N, avance de 0,125 mm/rev y 27 rev/min

Los valores obtenidos para la deformación de la probeta mostrada en la figura 3.5 aparecen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valores del ensayo de tracción a la 2da probeta

Probeta 2											
MPa	0	97,6	195,2	292,8	390,4	488	585,6	683,2	780,8	878,4	769
mm	0	0,0264	0,0528	0,0792	0,1056	0,132	0,1584	0,1848	0,2112	0,2376	0,264

La figura 3.6 muestra las mayas deformadas de la probeta 2 después de haber realizado el ensayo de tracción mediante la simulación por el MEF.

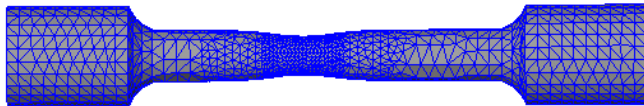


Figura 3.6 Probeta 2 enmallada

En la figura 3.6 se obtiene un modelo con 2601 nodos y 10 127 elementos, resultando un total de 12 728 grados de libertad y en las figuras 3.7 y 3.8 aparecen los esfuerzos y las tensiones de la probeta 3.

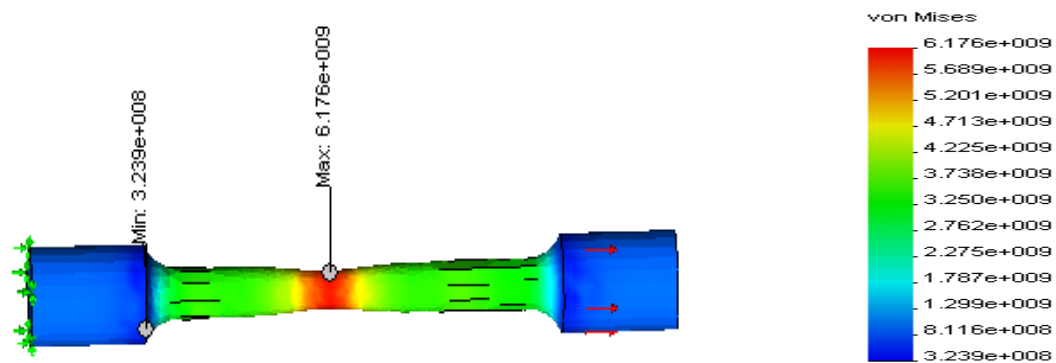


Figura 3.7 Esfuerzos obtenidos en el cuello de la probeta 2

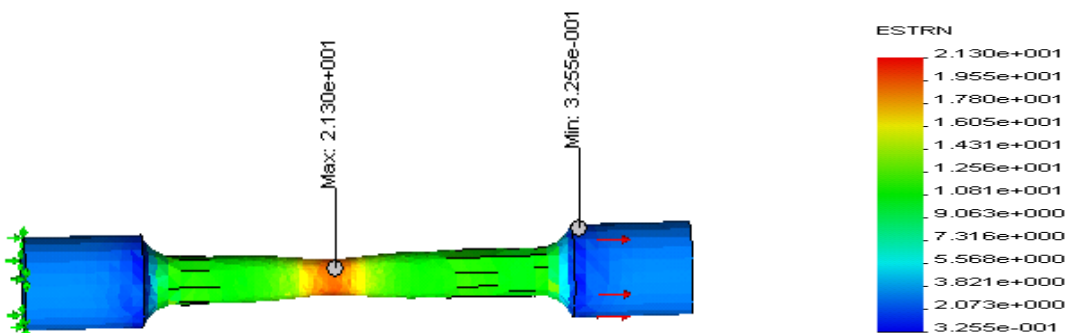


Figura 3.8 Deformaciones que se obtienen en el cuello de la probeta 2

Como se observa en las figuras 3.7 y 3.8 para fuerza de 1 500 N, S de 0,125 mm/rev y 27 revoluciones por minutos para la probeta 2 deformada en frío, surge otro estado tensional en el cuello de la probeta, así como otro estado deformacional.

3.6.2 Análisis de la simulación de la probeta 3

Se realizó para la probeta 3 el mismo procedimiento, con fuerza de 2 500 N, S de 0,075 y número de revolución de 27 rev/min, los resultados obtenidos se observan en las figuras 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12.



Figura 3.9 Probeta 3 traccionada con fuerza 2 500 N, avance de 0,075 mm/rev y 27 rev/min. Los valores obtenidos para la deformación de la probeta mostrada en la figura 3.9 aparecen en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Valores del ensayo de tracción para la 3ra probeta

Probeta 3											
MPa	0	102,1	204,2	306,3	408,4	510,5	612,6	714,7	816,8	918,9	810
mm	0	0,0263	0,0526	0,0789	0,1052	0,1315	0,1578	0,1841	0,2104	0,2367	0,263

La figura 3.10 muestra las mayas deformadas de la probeta 3 después de haber realizado el ensayo de tracción mediante la simulación por el MEF.

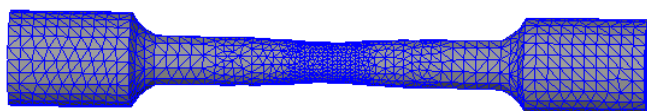


Figura 3.10 Probeta 3 enmallada

En la figura 3.10 se obtiene un modelo con 2 630 nodos y 10 701 elementos, resultando un total de 13 331 grados de libertad y en las figuras 3.11 y 3.12 aparecen los esfuerzos y las tensiones de la probeta 3.

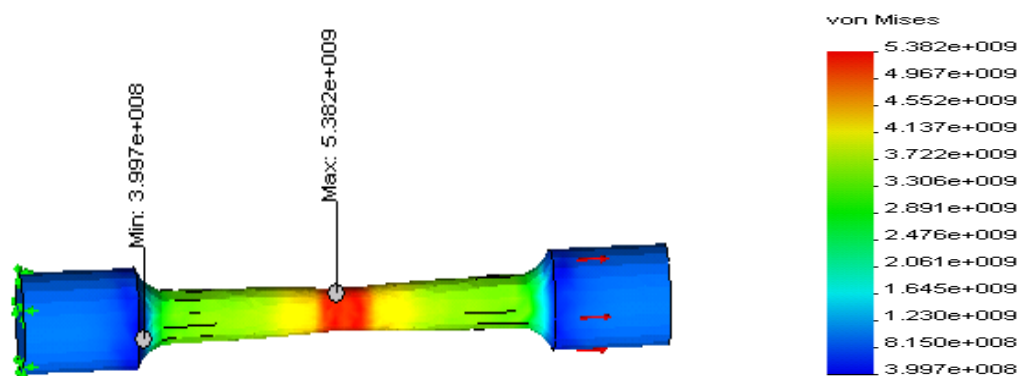


Figura 3.11 Esfuerzos obtenidos en el cuello de la probeta 3

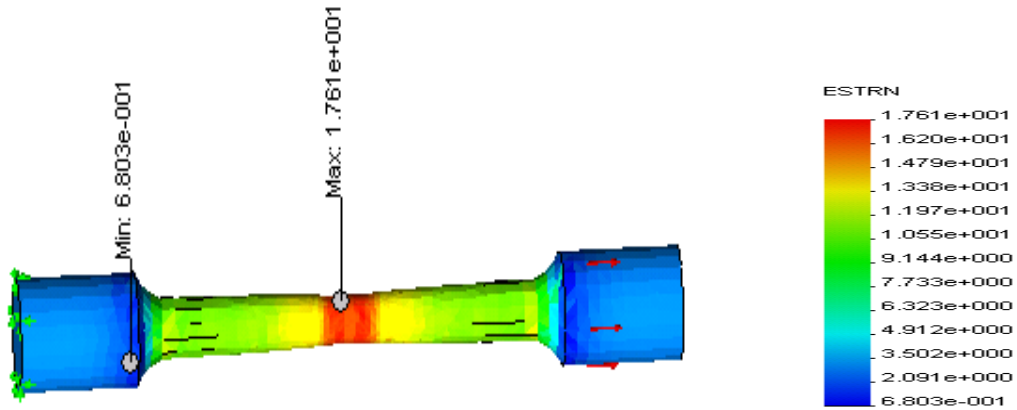


Figura 3.12 Deformaciones que se obtienen en el cuello de la probeta 3

En las figuras 3.11 y 3.12 para fuerza de 2 500 N, S de 0,075 mm/rev y 27 revoluciones por minutos para la probeta 2 deformada en frío, surge otro estado tensional en el cuello de la probeta, así como otro estado deformacional, en correspondencia con estos parámetros.

3.6.3 Análisis de la simulación de la probeta 4

Se realizó para la probeta 3 el mismo procedimiento, con fuerza de 2 500 N, S de 0,075 y número de revolución de 54 rev/min, los resultados obtenidos se observan en las figuras 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16.

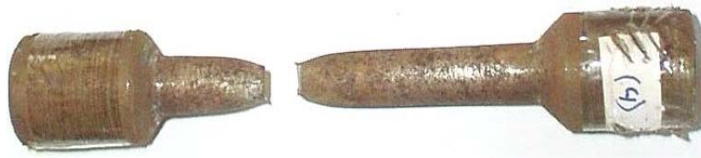


Figura 3.13 Probeta 4 traccionada con fuerza 500 N, avance de 0,025 mm/rev y 54 rev/min
Los valores obtenidos para la deformación de la probeta mostrada en la figura 3.13 aparecen en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores del ensayo de tracción para la 4ta probeta.

Probeta 4											
MPa	0	90,7	181,4	272,1	362,8	453,5	544,2	634,9	725,6	816,3	708
mm	0	0,027	0,054	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,243	0,27

La figura 3.14 muestra las mayas deformadas de la probeta 4 después de haber realizado el ensayo de tracción mediante la simulación por el MEF, se obtiene un modelo con 2 739 nodos y 10 657 elementos, resultando un total de 13 426 grados de libertad.

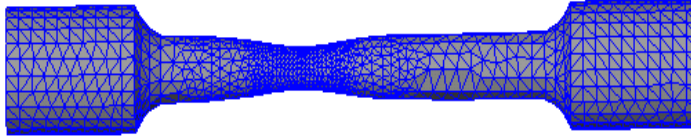


Figura 3.14 Probeta 4 enmallada

La figura 3.15 muestra los esfuerzos obtenidos en el proceso de simulación se puede observar que existen cambios en este parámetro en la medida que se incrementa en esfuerzo de tracción, el cual provoca la estricción del cuello en la probeta, así sucede para las tensiones como se observa en la figura 3.16.

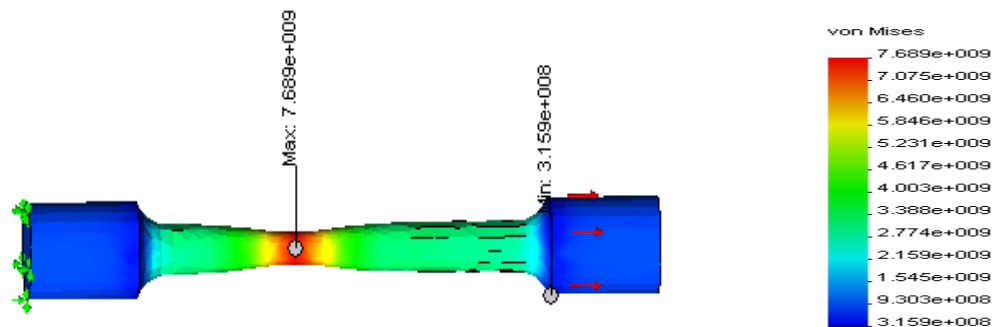


Figura 3.15 Esfuerzos obtenidos en el cuello de la probeta 4

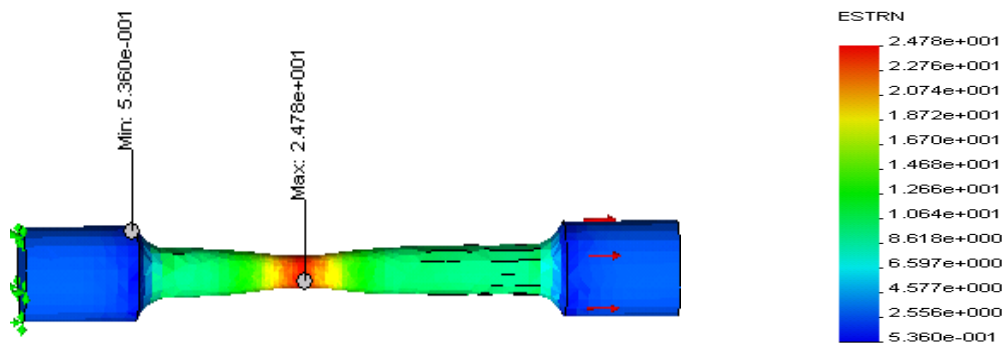


Figura 3.16 Deformaciones que se obtienen en el cuello de la probeta 4

Como se observa en las figuras 3.15 y 3.16 para fuerza de 500 N, S de 0,025 mm/rev y 54 revoluciones por minutos para la probeta 4 deformada en frío, surgen estados tensionales y deformaciones, provocados por el endurecimiento superficial de la misma.

3.6.4 Análisis de la simulación de la probeta 5

Se realizó para la probeta 5 el mismo procedimiento, con fuerza de 1 500 N, S de 0,125 y número de revolución de 54 rev/min, los resultados obtenidos se observan en las figuras 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20.



Figura 3.17 Probeta 5 traccionada con fuerza 1 500 N, avance de 0,125 mm/rev y 54 rev/min

Los valores obtenidos para la deformación de la probeta mostrada en la figura 3.17 aparecen en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Valores del ensayo de tracción a la 5ta probeta.

Probeta 5											
MPa	0	96,5	193	289,5	386	482,5	579	675,5	772	868,5	759
mm	0	0,0267	0,0534	0,0801	0,1068	0,1335	0,1602	0,1869	0,2136	0,2403	0,267

La figura 3.18 muestra las mayas deformadas de la probeta 5 después de haber realizado el ensayo de tracción mediante la simulación por el MEF.

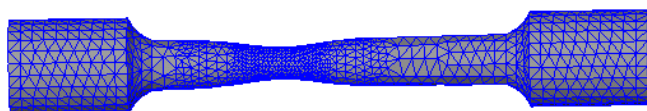


Figura 3.18 Probeta 5 enmallada

En la figura 3.18 se obtiene un modelo con 2 664 nodos y 10 285 elementos, resultando un total de 12 949 grados de libertad.

Las figuras 3.19 y 3.20 establecen los esfuerzos y las deformaciones para esta probeta.

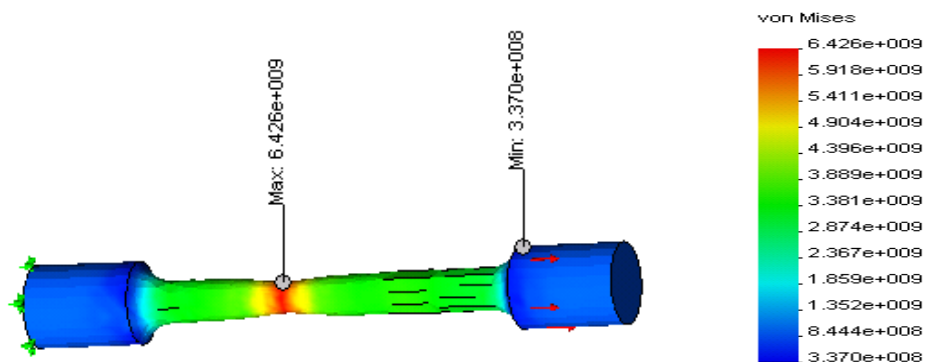


Figura 3.19 Esfuerzos obtenidos en el cuello de la probeta 5

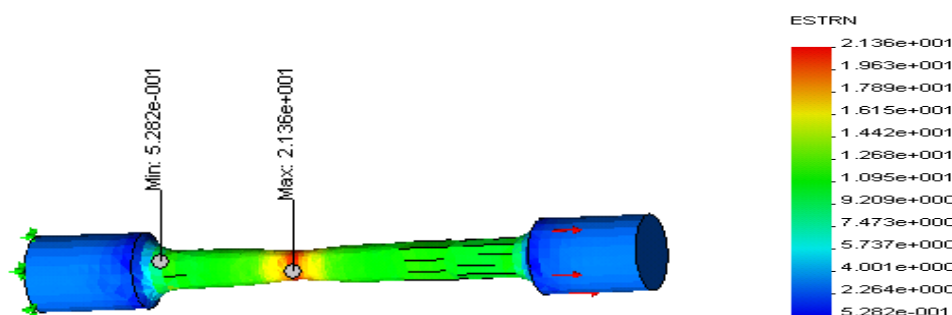


Figura 3.20 Deformaciones que se obtienen en el cuello de la probeta 5

En las figuras 3.19 y 3.20 para fuerza de 1 500 N, S de 0,125 mm/rev y 54 revoluciones por minutos para la probeta 5 deformada en frío, al variar estas variables se puede notar que provocado por el proceso de deformación superficial esta va llegando a la rotura por los estados tensionales y deformacionales que surgen en el interior del material.

3.6.5 Análisis de la simulación de la probeta 6

Se realizó para la probeta 6 el mismo procedimiento, con fuerza de 1 500 N, S de 0,75 y número de revolución de 54 rev/min, los resultados obtenidos se observan en las figuras 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24.



Figura 3.21 Probeta 6 traccionada con fuerza 2 500 N, avance de 0,075 mm/rev y 54 rev/min

Los valores obtenidos para la deformación de la probeta mostrada en la figura 3.21 aparecen en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Valores del ensayo de tracción para la 6ta probeta

Probeta 6											
MPa	0	101,2	202,4	303,6	404,8	506	607,2	708,4	809,6	910,8	800
mm	0	0,0262	0,0524	0,0786	0,1048	0,131	0,1572	0,1834	0,2096	0,2358	0,262

La figura 3.22 muestra las mayas deformadas de la probeta 6 después de haber realizado el ensayo de tracción mediante la simulación por el MEF.

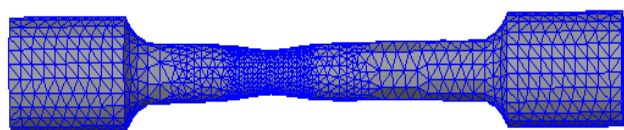


Figura 3.22 Probeta 6 enmallada

En la figura 3.22 se obtiene un modelo con 2779 nodos y 11 066 elementos, resultando un total de 13 845 grados de libertad.

Las figuras 3.23 y 3.24 establecen los esfuerzos y las deformaciones para esta probeta.

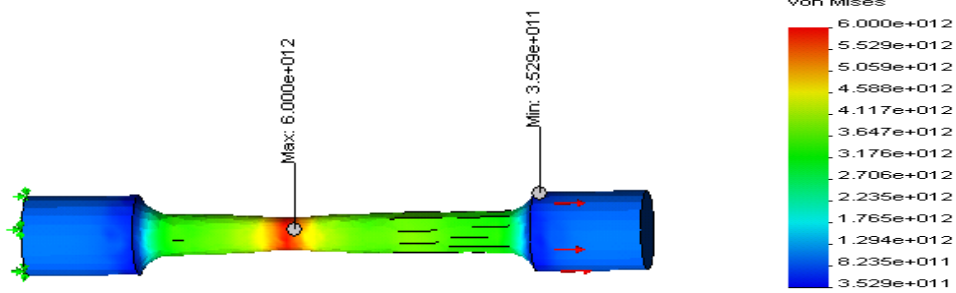


Figura 3.23 Esfuerzos obtenidos en el cuello de la probeta 6

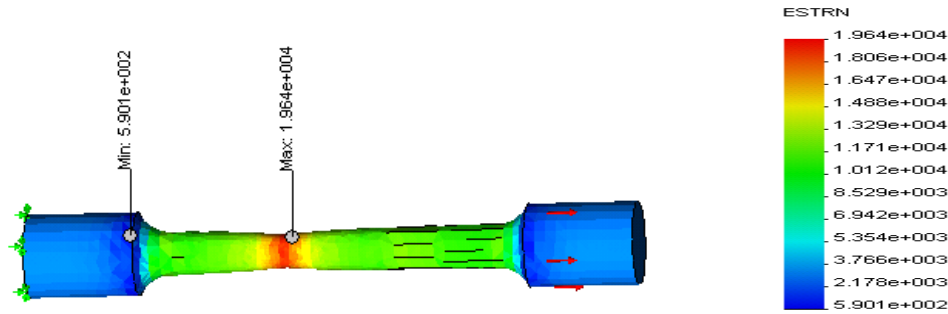


Figura 3.24 Deformaciones que se obtienen en el cuello de la probeta 6

Como se observa en las figuras 3.23 y 3.24 para fuerza de 2 500 N, S de 0,075 mm/rev y 54 revoluciones por minutos para la probeta 6 deformada en frío, surge otro estado tensional en el cuello de la probeta, así como otro estado deformacional.

3.6.6 Análisis de la simulación de la probeta 7

Se realizó para la probeta 7 el mismo procedimiento, con fuerza de 500 N, S de 0,075 y número de revolución de 54 rev/min, los resultados obtenidos se observan en las figuras 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28.



Figura 3.25 Probeta 7 traccionada con fuerza 500 N, avance de 0,075 mm/rev y 54 rev/min
Los valores obtenidos para la deformación de la probeta mostrada en la figura 3.25 aparecen en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Valores del ensayo de tracción a la 7ma probeta

Probeta 7											
MPa	0	90,4	180,8	271,2	361,6	452	542,4	632,8	723,2	813,6	704
mm	0	0,027	0,054	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,243	0,27

La figura 3.26 muestra las mayas deformadas de la probeta 7 después de haber realizado el ensayo de tracción mediante la simulación por el MEF.

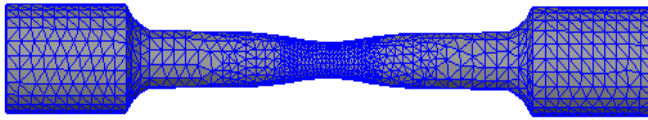


Figura 3.26 Probeta 7 enmallada

Se obtiene un modelo con 2 707 nodos y 10 488 elementos, resultando un total de 13 195 grados de libertad, como se observa en la figuras 3.27 y 3.28

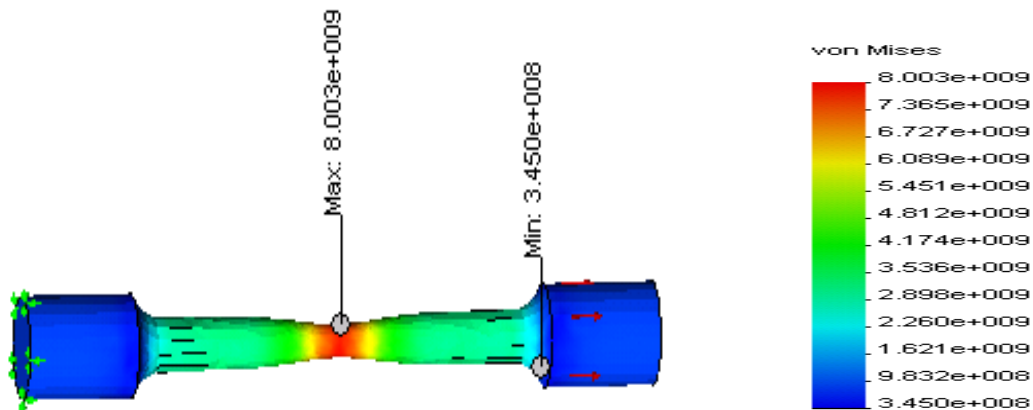


Figura 3.27 Esfuerzos obtenidos en el cuello de la probeta 7

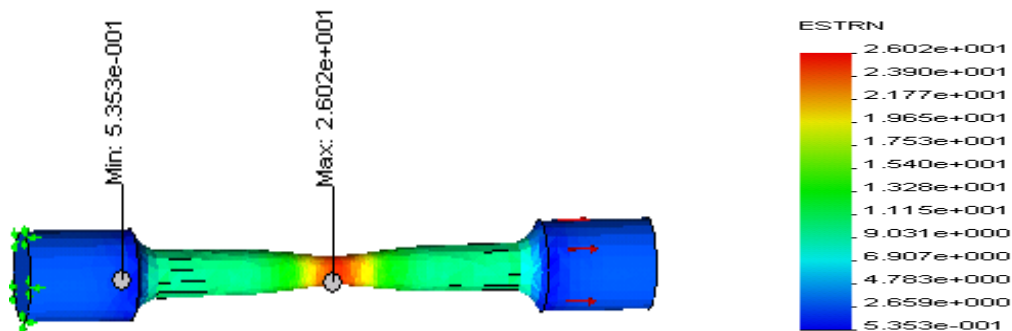


Figura 3.28 Deformaciones que se obtienen en el cuello de la probeta 7

Para fuerza de 500 N, S de 0,075 mm/rev y 54 revoluciones por minutos para la probeta 7 deformada en frío, la introducción de estos parámetros provoca una mayor estricción en el cuello, con esta fuerza, el material presenta menor endurecimiento superficial, como se observa en los estados tensionales y el deformacionales.

3.6.7 Análisis de la simulación de la probeta 8

Se realizó para la probeta 8 el mismo procedimiento, con fuerza de 1 500 N, S de 0,25 y número de revolución de 110 rev/min, los resultados obtenidos se observan en las figuras 3.29, 3.30, 3.31 y 3.32.



Figura 3.29 Probeta 8 traccionada con fuerza 1 500 N, avance de 0,25 mm/rev y 110 rev/min

Los valores obtenidos para la deformación de la probeta mostrada en la figura 3.29 aparecen en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Valores del ensayo de tracción a la 8va probeta

Probeta 8											
MPa]	0	91,4	182,8	274,2	365,6	457	548,4	639,8	731,2	822,6	716
mm	0	0,0268	0,0536	0,0804	0,1072	0,134	0,1608	0,1876	0,2144	0,2412	0,268

La figura 3.30 muestra las mayas deformadas de la probeta 8 después de haber realizado el ensayo de tracción mediante la simulación por el MEF.

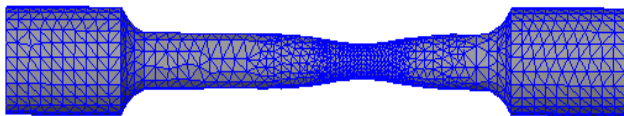


Figura 3.30 Probeta 8 enmallada

Se obtiene un modelo con 2 684 nodos y 10 602 elementos, resultando un total de 13 286 grados de libertad, figuras 3.31 y 3.32.

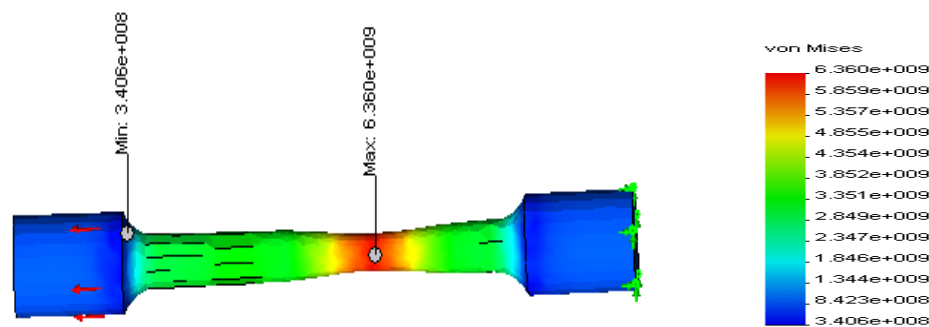


Figura 3.31 Esfuerzos obtenidos en el cuello de la probeta 8

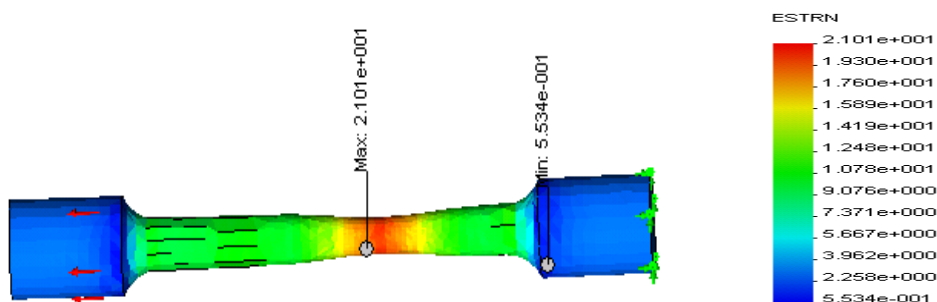


Figura 3.32 Deformaciones que se obtienen en el cuello de la probeta 8

En las figuras 3.31 y 3.32 para fuerza de 1 500 N, S de 0,25 mm/rev y 110 revoluciones por minutos para la probeta 8 deformada en frío, surge otro estado tensional en el cuello de la probeta, así como otro estado deformacional

3.6.8 Análisis de la simulación de la probeta 9

Se realizó para la probeta 9 el mismo procedimiento, con fuerza de 2 500 N, S de 0,075 y número de revolución de 110 rev/min, los resultados obtenidos se observan en las figuras 3.33, 3.34, 3.35 y 3.36.



Figura 3.33 Probeta 9 traccionada con fuerza 2 500 N, avance de 0,075 mm/rev y 110 rev/min

Los valores obtenidos para la deformación de la probeta mostrada en la figura 3.33 aparecen en la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Valores del ensayo de tracción a la 9na probeta

Probeta 9											
MPa]	0	98,1	196,2	294,3	392,4	490,5	588,6	686,7	784,8	882,9	774
mm	0	0,0255	0,051	0,0765	0,102	0,1275	0,153	0,1785	0,204	0,2295	0,255

La figura 3.34 muestra las mayas deformadas de la probeta 9 después de haber realizado el ensayo de tracción mediante la simulación por el MEF

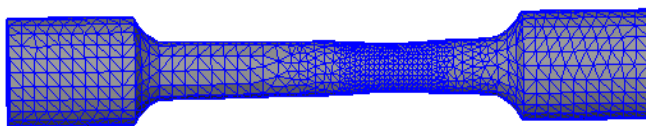


Figura 3.34 Probeta 9 enmallada

Se obtiene un modelo con 2 435 nodos y 9 417 elementos, resultando un total de 11 852 grados de libertad, figuras 3.35 y 3.36.

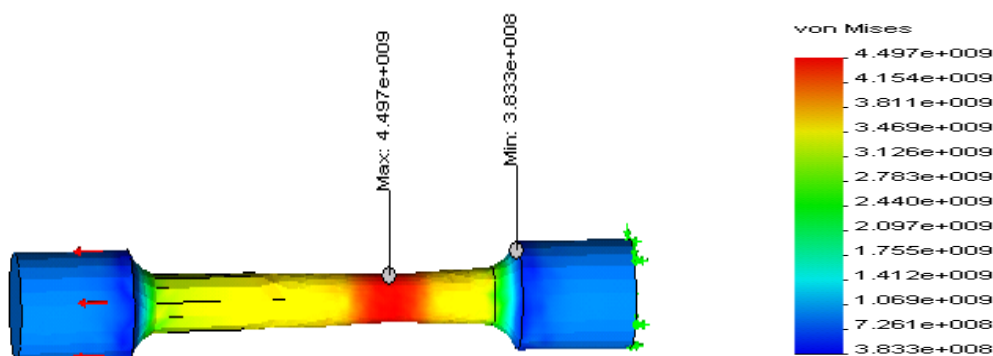


Figura 3.35 Esfuerzos obtenidos en el cuello de la probeta 9

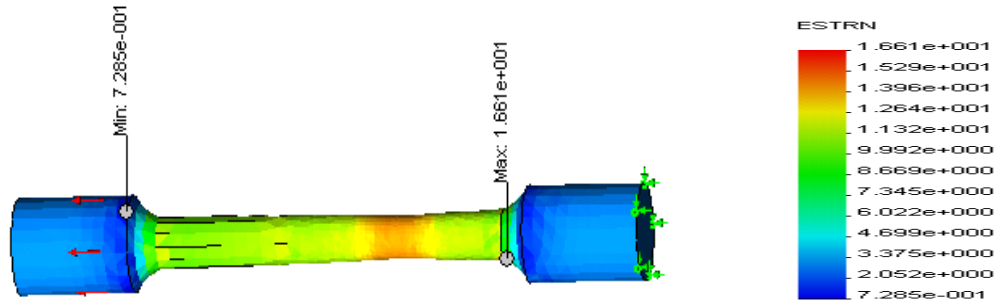


Figura 3.36 Deformaciones que se obtienen en el cuello de la probeta 9

Las figuras 3.35 y 3.36 muestran los resultados de la probeta 9 deformada con fuerza de 2 500 N, S de 0,075 mm/rev y 110 revoluciones por minutos, se puede observar que a diferencia de las demás probetas esta presenta un mayor diámetro después de haberse traccionado.

3.7 Análisis del comportamiento de las probetas ensayadas por el método de elemento finito

En la Tabla 3.11 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de las diferentes probetas de acero AISI 1045 sometidas al ensayo de tracción por el método de elementos finitos.

Tabla 3.11 Resultados obtenidos de las diferentes probetas de acero AISI 1045

Probeta	Fuerza (N)	Avance S (mm/rev)	Número de revoluciones n (rev/min)	Esfuerzo máximo $E_{\text{máx}}$ MPa	Tensión máxima $\sigma_{\text{máx}}$ MPa	Cantidad de nodos	Cantidad de elementos
1	500	0,075	27	$8,630 \cdot 10^3$	32,71	2637	10 268
2	1 500	0,125	27	$6,176 \cdot 10^3$	21,30	2601	10 127
3	2 500	0,075	27	$5,382 \cdot 10^3$	17,61	2630	10 701
4	500	0,25	54	$7,689 \cdot 10^3$	24,78	2739	10 657
5	1 500	0,125	54	$6,426 \cdot 10^3$	21,36	2664	10 657
6	2 500	0,075	54	$6,00 \cdot 10^6$	$1,964 \cdot 10^4$	2779	11 066
7	500	0,075	54	$8,003 \cdot 10^3$	26,02	2707	10 488
8	1 500	0,25	110	$6,360 \cdot 10^3$	21,01	2684	10 602
9	2 500	0,075	110	$4,497 \cdot 10^3$	16,61	2435	9 417

En la tabla 3.11 los modelos tienen diferentes nodos y elementos, se puede observar la variación que hay de los diferentes parámetros (F, S y n) en las probetas sometidas al ensayo de tracción trayendo consigo la variación de sus resultados y que algunas probetas adquieran más dureza que otras, por lo que se necesitaría una mayor fuerza para lograr su deformación (rotura).

Analizando las probetas 1, 4 y 7 con una misma fuerza, pero con avance y número de revoluciones diferentes, tenemos que; para la probeta 4 con respecto a la

probeta 1 se aumenta el avance y el número de revoluciones de la máquina, obteniéndose mayor cantidad de nodos y de elementos, por lo que podemos decir que la probeta 4 tiene más dureza. Comparando la probeta 7 y 4 las cuales tienen el mismo número de revoluciones, pero el avance de la probeta 4 es mayor que el de la probeta 7 se obtiene que la probeta 4 tenga mayor cantidad de nodos y de elementos que la probeta 7, podemos decir que la probeta 4 tiene más dureza. Podemos observar que en estas probetas las tensiones y los esfuerzos que surgen en el cuello de las probetas también varían provocando límite de rotura diferentes.

3.7.1 Análisis de los esfuerzos que surgen en el cuello de las probetas por la modelación del MEF del acero AISI 1045

Como se observa en la tabla 3.11, los esfuerzos que surgen en el cuello de las probetas de acero AISI 1045, endurecidas plásticamente por rodadura aumentó considerablemente si tenemos en cuenta las dimensiones con que fueron elaboradas.

Los valores oscilan entre $4,497 \cdot 10^3$ MPa y $6,00 \cdot 10^6$ MPa, esto se debe a que ha tenido influencia el proceso de deformación a las que fueron sometidas con los valores de las diferentes variables (n, S, P), demostrándose que estas variables tienen incidencia en el proceso de deformación en frío del acero AISI 1045 y que en condiciones de aplicación de cargas entre 500 y 2 500 N se endurece la superficie por acritud, por lo que se considera un incremento de la dureza en cada una de ellas. Lo sucedido se explica debido a que el grado de acritud que adquiere un material depende de factores externos al metal (naturaleza del esfuerzo y velocidad de aplicación de éste), en la estructura cristalina ferrita mas perlita de la probeta. Se puede decir que ocurre un cambio en la superficie principalmente por el fenómeno de las dislocaciones y las maclas, no hay cambio de fase, pero los granos se agrupan y los límites se hacen mas pequeños (Fernández, 2007), endureciéndose esta región de contacto entre el rodillo y el material a endurecer por deformación plástica superficial, ya que el material menos duro trata de adquirir la dureza del otro.

Las tensiones, como se observan en la tabla 3.11, varían considerablemente en el cuello de las probetas de acero AISI 1045, endurecidas plásticamente por rodadura, provocado por la variación de las variables (n, S, P) y las cargas aplicadas a las probetas. Los valores oscilan entre 16,61 MPa y $1,964 \cdot 10^4$ MPa.

3.8 Análisis de los resultados obtenidos por los métodos utilizados

Comparando los resultados obtenidos de los ensayos realizados en la máquina de las probetas mostradas y los resultados obtenidos de los ensayos realizados por el método de elementos finitos a estas probetas, podemos decir que se comportan de forma similar, o sea, a medida que se van transformando los parámetros (n , S , P) y las cargas que se le aplican a las probetas de acero AISI 1045, se producen nuevas tensiones de roturas en las probetas, la estricción en el cuello de la probeta, se comportan de manera similar al realizarlo tanto en la máquina, como en la simulación.

Se puede observar que las probetas en la mayoría de los casos cuando llega a la rotura no lo hace en el centro, a pesar de que se realizan tres ensayos para cada muestra, esto puede estar atribuido a la introducción de dureza que se le realiza a la probeta por medio del rodillo, además las deformaciones en la superficie se comportan de forma no homogénea, las tensiones en los tres ejes tampoco se comportan en igualdad de condiciones. Este criterio parte de que, al traccionar la probeta patrón esta cuando llega a la rotura lo hace en el centro de la misma.

3.9 Valoración económica

Para la realización del análisis económico se toma como referencia el tiempo de ejecución obtenido durante el cálculo de los parámetros de trabajo en máquinas computadoras en la elaboración de las simulaciones. En la tabla 3.12 aparece la ficha de costo para evaluar el comportamiento económico del proceso de tracción de las probetas por el MEF.

Tabla 3.12 Costo del ensayo de tracción de las probetas por el MEF

Por concepto de Tiempo				Por concepto de Consumo				
Operario	Tarifa (\$/h)	Tiempo (h)	Costo _{Ti} (\$)	Cantidad equipos	Consumo (kW/h)	Tarifa (\$/kW)	Tiempo (h)	Costo _{Co} (\$)
Tecnólogo	2,34	0,16	0,37	4 - lámparas 1- Computadora 2-Aire acondicionado	0,16 0,25 2,24	0,09	0,16	0,35
Costo Total para el cálculo con programa.			$C_T = \text{Costo}_{Ti} + \text{Costo}_{Co}$ $C_T = \$0,72$					

Una vez calculados los tiempos para la elaboración de la pieza Deformada Plásticamente y traccionada por el MEF, teniendo en cuenta la incidencia de computadora, operarios y energía eléctrica, el costo estimado de la modelación

computacional del ensayo de tracción del acero AISI 1045, es de \$ 0,72 para una probeta y para las 9 probetas es de \$ 6,48.

3.10 Impacto medio ambiental

Para que el ambiente de trabajo sea el adecuado y el trabajador tenga más comodidad para desarrollar su trabajo y le provoque menos daño a su salud se debe mantener una buena higiene y organización del puesto de trabajo, para esto es necesario tener en cuenta unas series de medidas lo cual evitará al operario y al entorno que le rodea la emisión de contaminantes, daños a la salud del hombre. Para esto se debe reducir la generación de sustancias de desechos y el ruido producido por las máquinas que se están operando.

En el proceso de maquinado se producen grandes cantidades de desechos sólidos, estos desechos en forma de virutas al ser depositados en un lugar específico alteran el equilibrio de ese pequeño ecosistema, debido a que en su composición poseen elementos que son perjudiciales. Además en el taller se consume una gran cantidad de energía eléctrica, a cual se toma de la red nacional convirtiéndose en gasto de combustible y contaminación atmosférica debido al proceso de combustión para generar energía.

Las implicaciones económicas y sociales que todo esto representa son universalmente conocidas, así como de los esfuerzos que a numerosas instancias se hacen en Cuba para disminuir el impacto negativo que estas tecnologías poseen.

El control de estas fuentes de contaminantes generadas por estas máquinas y procesos de tratamientos térmicos, se hace teniendo en cuenta una buena organización técnica de los pasos productivos y con la utilización de los métodos de recolección de desechos sólidos; formando parte de los mismos las virutas de los proceso de maquinado y otros desechos. Los cuales son clasificados adecuadamente permitiendo de esta forma la eliminación de las basuras y el reciclaje de la chatarra.

En este sentido resulta importante reiterar que la aplicación del proceso tecnológico conocido como Deformación Plástica Superficial por rodillo, en muchos casos, evita o hace innecesario el empleo de estas tecnologías contaminantes del medio ambiente y altas consumidoras de energía, pues las propiedades físico -mecánicas

se pueden lograr de las reservas internas del material de la propia pieza, que se manifiestan a partir de la deformación en frío de su superficie en forma controlada. Incluso dicho proceso posee la ventaja adicional de que no induce efectos colaterales negativos en la pieza como en el caso del temple donde hay que aplicar tratamientos adicionales para eliminar las tensiones surgidas.

3.11 Conclusiones del capítulo III

- ✓ Los resultados numéricos obtenidos para tensión axial y carga aplicada frente a deformación son acordes con los resultados experimentales. De hecho, a partir de un cierto número de elementos los resultados varían según se va refinando la malla.
- ✓ Se puede observar que en las probetas traccionadas en la máquina, como en las realizadas por el MEF, tanto en una como en otra las deformaciones y las tensiones se comportan de forma similar.
- ✓ El procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante la deformación Plástica Superficial con rodillo de piezas fabricadas de acero AISI 1045, es técnicamente factible y económicamente racional. Desde el punto de vista social y ambiental se contribuye a evitar los riesgos de contaminación y la expulsión a la atmósfera de polvos nocivos a la salud humana.

CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ Las bibliografías consultadas no aportan información relacionadas con probetas deformadas por rodadura, traccionadas y luego sometida a simulación por el Método de Elementos Finitos (MEF).
- ✓ Las simulaciones computacionales realizadas reproducen correctamente los resultados experimentales correspondientes a la tensión axial media y carga aplicada, para todas las formulaciones de elementos finitos empleadas.
- ✓ Al realizar el mallado para cada una de las probetas presenta diferentes nodos y elementos, esto está dado en correspondencia con los diferentes valores de fuerza, avance y número de revolución, que son los responsables del endurecimiento superficial del material.
- ✓ Los ensayos de tracción pudieron ser corroborados por el Método de Elementos Finitos, ya que los resultados obtenidos por la simulación tienen correspondencia con los obtenidos a través del ensayo realizados en la máquina de tracción.



RECOMENDACIONES

- ✓ Analizar en futuro trabajo, el comportamiento de la ruptura de las probetas, las cuales en la mayoría de los casos parten en un extremo y no por el centro de las mismas.
- ✓ El Método de Elementos Finitos para determinar el estado de tensión en probetas deformadas y luego traccionadas, pero sometida a ensayo de torsión.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adams, V., Askenazi, A. "Building Better Products with Finite Element Analysis" On Word press 2 530 Camino Entrada, Santa Fe, NM 87 505 – 4 835, USA. 1999
2. Al – Zkeri, I. "Finite element modeling of hard turning" Tesis Doctoral. Ohio State University. 2007
3. Astrom, P. "Simulation of manufacturing processes in product development" Luleå University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Computer Aided Design 2 004: 56 • ISSN: 1 402 – 1544 • ISRN: LTU – DT – 04.56 – SE 2 004: 56. 2004
4. Boyle, J.y Spence, J. Stress Analysis for Creep. Londres: Butteerwoths, 1989.
5. Bridgman, P. The stress distribution at the neck of a tensile specimen. Transactions of the American Society of Metals, tomo 32 p. 553 - 574, 1944.
6. Callister, W. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Departament of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7.
7. Camacho López, A. "Análisis por el método de elementos finitos de procesos estacionarios de conformado por deformación plástica" Tesis Doctoral. UNED. Escuela Superior de Ingeniería Industrial, Departamento de Construcción y Fabricación. 2005
8. Casillas, A., "Cálculo de tallers". 5ª ed., Madrid, España 1982. Pág 316-321.
9. Davidenkov, N. y Spiridonova, N. Analysis of the state of stress in the neck of a tension test specimen. En Proceedings of American Society of Testing Materials, tomo 46, págs.1147 - 1158. 1946.
10. Gabaldon, F. Métodos de elementos finitos mixtos con deformaciones su Puestas en elastoplasticidad. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros de Caminos. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1999.
11. Garcia - Garino, C., Mirasso, A., Raichman, S. y Goicolea, J. M. Análisis de sensibilidad local y unicidad aparente en el problema de estricción de barras metálicas. En C. Garcia - Garino, A. Mirasso, J. Barón y J. N. McLeod, eds., Mecánica Computacional, págs. 281 - 288. 1999a.



12. Garcia - Garino, C., Mirasso, A., Raichman, S. y Goicolea, J. M. Local and global sensitivity analysis of necking instability in circular cylindrical bars. En E. Croitoro, ed, First Canadian Conference on Non Linear Solids Mechanics, págs. 760 - 764. University of Victoria and Pacific Institute of Mathematics, Victoria, Canada, 1999b.
13. Goicolea, J. Numerical modelling in large strain plasticity with application to tube collapse analysis. Tesis Doctoral, University of London, 1985
14. Goicolea, J., Gabaldon, F. y Garcia - Garino, C. Interpretación de la estricción en el ensayo de tracción empleando modelos hipoeelásticos e hiperelásticos. En M. Doblaré, J. Correas, E. Alarcón, L. Gavete y M. Pastor, eds., Memorias del III Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería. SEMNI, Zaragoza, 1996.
15. Hallquist, J. User's Manual for DYNA2D – An explicit two – dimensional hydrodynamic finite element code with interactive rezoning. Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, 1982. Technical Report UCID -18756, Rev.1.
16. Hernández, H.G. Estudio del comportamiento del acero AISI 1045 mediante la deformación plástica por rodadura. Informe Técnico. ISMMMoA. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2005.
17. Joshi, S.; Melkote, S. “An explanation for the size – effect in machining based on strain gradient plasticity” Journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol. 126, (4), pp. 679 – 684. 2004
18. Lajtin, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1 ed. Editorial MIR. Moscú. 1973. p 359–360.
19. Liu, K.; Melkote, S. “Material strengthening mechanisms and their contribution to size effect in micro - cutting” Journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol. 128, (3), pp. 730 – 738. 2006
20. Mackerle, J. “Finite element analysis and simulation of machining: an addendum. A bibliography 1996 – 2002” International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 43, (1), pp. 103 – 14. 2003
21. Mallo, M., Manual teórico práctico del mecánico forjador, Editorial Pueblo y Educación, 1987, Cuba. Pág 93-121 y 145-152.



22. Martínez, V. “Comportamiento mecánico de las juntas tipo T – bolt en materials compuestos gruesos” Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 2003
23. Miguélez, H.; Zaera, R.; Cheriguene, R.; Rusinek, A.; Moufki, A.; Molinari, A. 2 007 “Modelización numérica del corte ortogonal utilizando una formulación ALE”VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cuzco. 2 007.
24. Needleman , A. A numerical study of necking in circular cylindrical bars. Journal of Mechanics, Physics and Solids, tomo 20:págs.111 - 127,1972.
25. Normas cubanas: NC 10-56:86. Metalografía. Microestructura de Metales de aleaciones duras. Métodos de ensayo.
26. Norris, D., Moran, B., Scudder, J. y Quinones, D. Acomputer simulation of the tension test. Journal of Mechanics, Physics and Solids, tomo 26: págs. 119, 1978.
27. Oxley, P. “A strain hardening solution for the shear angle in orthogonal metal cutting” International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 3, pp. 219 – 229. 1951
28. Ortiz, M. y Popov, E. Distorsional hardening rules for metal plasticity. Journal of Engineering Mechanics, tomo 109, n 4: págs. 1042 - 1057, 1983.
29. Pero-Sanz, J.A. “Ciencia de los materiales. Metalúrgia Física: Estructura y Propiedades”, Editorial DUSSAT SA, 1999. España.
30. Simó, J. A framework for finite strains elastoplasticity based on maximum plastic dissipation and the multiplicative decomposition. Part ii: Computational aspects. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, tomo 68: págs. 131, 1988 b.
31. Simó, J. y Armero, F. Geometrically nonlinear enhanced strain mixed methods and the method of in compatible modes. International Journal for Numerical Methods in Engineering, tomo 110: págs. 359 - 386, 1993.
32. Simó, J., Armero, F. y Taylor, R. Improved versions of assumed enhanced strain tri – linear elements for 3d finite deformation problems. Computer Method sin Applied Mechanics and Engineering, tomo 110: págs. 359 - 386, 1993.
33. Smith, W.F. “Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los materiales”, Mc Graw-Hill, 2001, España.



34. Umbrello, D.; Filice, L.; Rizzuti, S.; Micari, F.; Settineri, L. 2006 “On the effectiveness of finite element simulation of orthogonal cutting with particular reference to temperature prediction” *Journal of Materials processing Technology*. Vol. 189, (1 – 3), pp. 284 – 291.
35. Usui, S.; Kitagawa, T. “Analytical prediction of three dimensional cutting process, part 3: cutting temperature and crater wear of carbide tool” *ASME Journal of Engineering Material Technological*. Vol. 100, pp. 236 – 243. 1978
36. Valiente, A. On bridgman’s stress solution for a tensile neck applied to axisymmetrical blunt notched tension bars. *Journal of Applied Mechanics*, tomo 68: págs. 412 - 419, 2001.
37. Voringe, O.; Schulze, V. “Influence of alloying elements on the strain rate and temperature dependence of the flow stresses of steels” *Metallurgical and Materials Transactions A*. Vol. (13) pp. 825 – 830. 2000
38. Wilkins, M. Third progress report of light armor program. Inf. Téc., Lawrence Livermore National Laboratory. University of California, 1968. Rept UCRL-50 460.
39. Wince, J. “Modelling chip formation in orthogonal metal cutting using finite element analysis” *Tesis Doctoral*. Mississippi State University. 2002

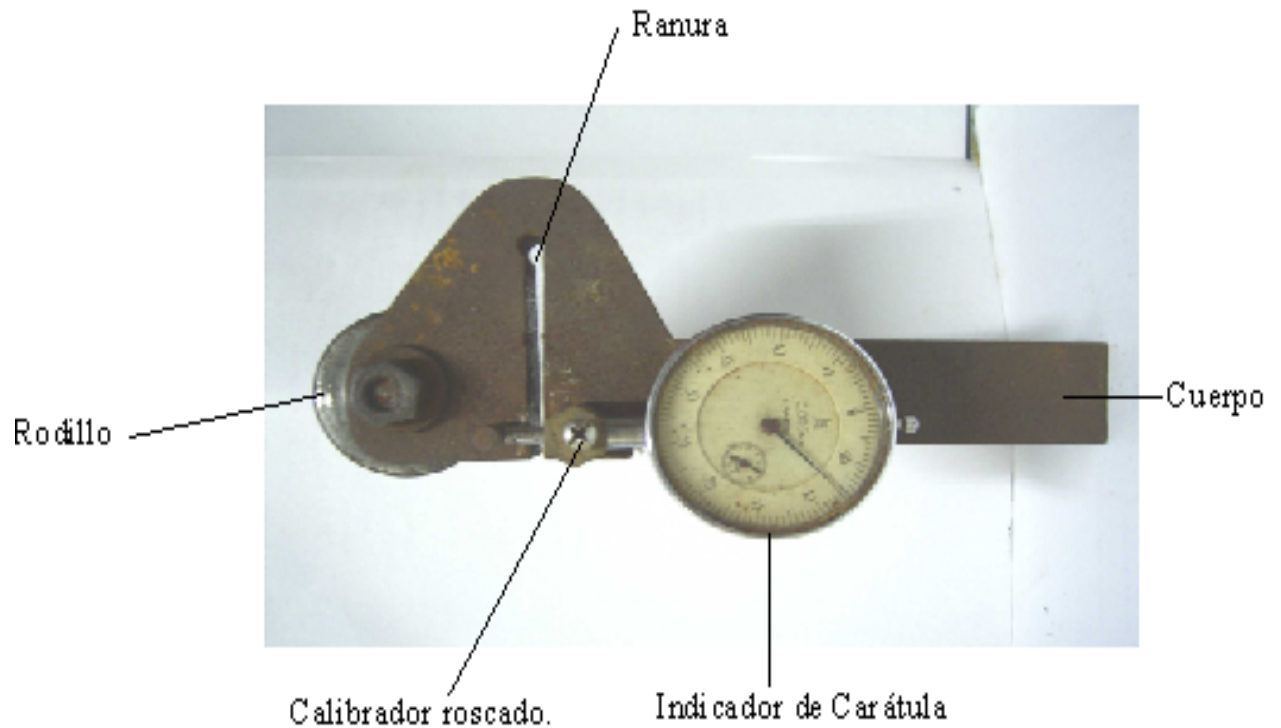
Anexo I

Figura 2.3 Dispositivo que se utiliza para La Deformación Plástica Superficial por rodillo

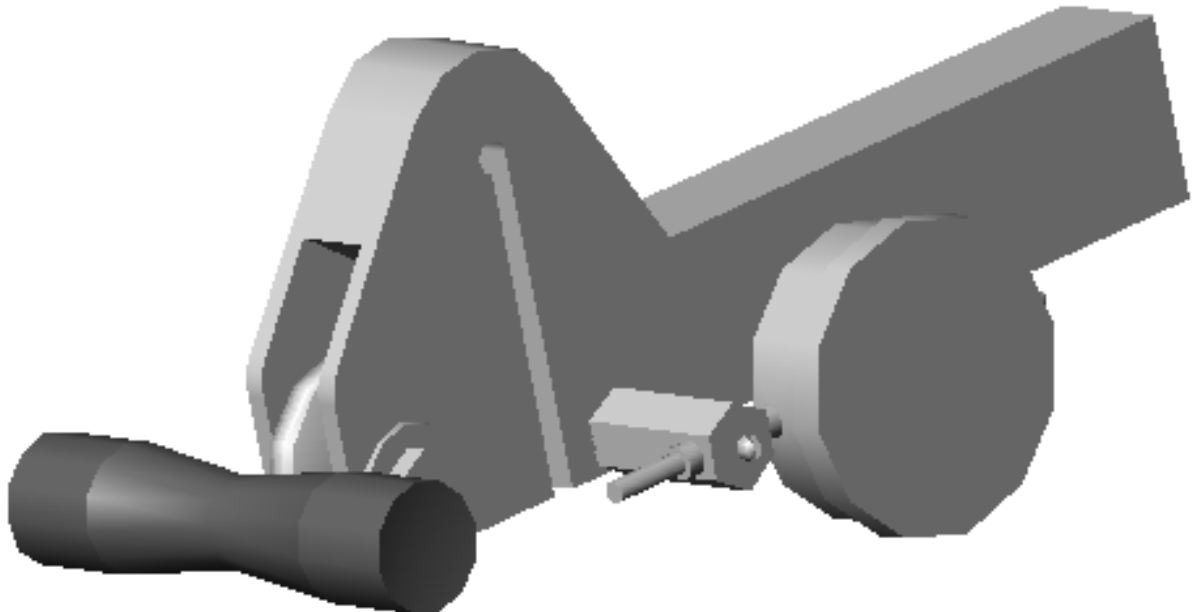


Figura 2.4 Proceso de endurecimiento por Deformación Plástica Superficial con rodillo a piezas simétricas rotativas