



*Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"  
Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Departamento de Ingeniería Mecánica*

*Trabajo de Diploma*

*en opción al título de*

*Ingeniero Mecánico*

*Título: Efecto de la torsión en muestras de acero AISI 1045  
deformado por rodadura.*

*Autor: Guenadis Méndez Terrero.*

*Tutores: Dr. C. Tomás Fernández Columbié.  
Dr. C. Isnel Rodríguez González.*

*Moa: 2012  
"Año 54 de La Revolución"*

***Declaración de Autoridad:***

**Yo:** Guienadis Méndez Terrero

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.

---

Guienadis Méndez Terrero

---

Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié

---

Dr. C. Isnel Rodríguez González

# Agradecimientos

- ❖ *Agradezco primeramente a Dios mi Padre, mi amigo por fortalecerme en los momentos difíciles de mi vida y por alentarme con su palabra.*
- ❖ *Muchas personas son las que hacen posible que este sueño de toda la vida se haga realidad. Son importantes los familiares y amigos que ayudan e inspiran a que uno siga adelante creyendo que todo lo que uno pueda hacer según sus fuerzas pueda hacerlo, a ellos mis más sinceros agradecimientos.*
- ❖ *A mis tutores Dr.C. Tomás H. Fernández Columbié y Dr.C. Isnel Rodríguez González por ayudarme en la realización de este trabajo.*
- ❖ *A todas aquellas personas que de alguna manera u otra supieron darme lo mejor de sí para contribuir con el desarrollo de este trabajo.*

# Dedicatoria

*Dedico este trabajo a Dios porque fue quien me dio la sabiduría y la paciencia, que necesitaba para hacerlo.*

*A mis padres por infundir en mí, ese camino que inició con toda la responsabilidad que representa el término de mi carrera y por ayudarme en mi formación como profesional.*

*A mi hermana, mis primos y mi novia que me alientan y ayudan en los momentos difíciles para que siga hacia adelante.*

*A mi familia, en especial a mi tía Mariela y mi primo Chachi por su dedicación y apoyo incondicional para que lograra esta meta.*



## Resumen

El objetivo del trabajo es determinar el efecto de la torsión en muestras deformadas con rodillo con diferentes valores de fuerza como 500, 1 500 y 2 500 N, avances de 0,075, 0,125 y 0,25 mm/rev y números de revoluciones de 27, 54 y 110 rev/min. Las fuerzas de torsión mínima empleada para lograr la rotura de la muestra deformada con fuerza de 500 N fue de 515,8 N/mm<sup>2</sup>, la cual se incrementó hasta 651,7 N/mm<sup>2</sup> para la muestra deformada con fuerza de 2 500 N. Se prepararon muestras, lo cual se utilizó resina epoxi ROYAPOX 5050, para poder determinar el análisis microestructural en el borde de las mismas. Se realizó un diseño de experimento para establecer el comportamiento de la tensión en relación con la microestructura, donde se pudo apreciar la disminución del tamaño del grano por el efecto combinado de la deformación plástica y el mecanismo de torsión, se alcanzó dureza de hasta 448 HV luego de finalizado el proceso, por último se realizó el análisis económico con su incidencia medioambiental.



### **Abstract**

It is objective of the paper is to determine the effect of the torsion in deformed samples with roller with different securities of force as 500, 1 500 and 2 500 N, feed of 0,075, 0,125 and 0,25 mm/rev and numbers of revolutions of 27, 54 and 110 rev/min. The forces of torsion minimum employee to achieve the break of the deformed sample with force of 500 N were of 515,8 N/mm<sup>2</sup>, which was increased up to 651,7 N/mm<sup>2</sup> for the deformed sample with force of 2 500 N. Got ready samples, that which resin epoxi ROYAPOX was used 5050, to be able to determine the analysis microstructure in the border of the same ones. He was carried out an experiment design to establish the behaviour of the tension in connection with the microestructura, where you could appreciate the decrease of the size of the grain for the combined effect of the plastic deformation and the torsion mechanism, hardness was reached of up to 448 HV after having concluded the process, lastly he was carried out the economic analysis with its environmental incidence.

## Índice

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....</b>	<b>4</b>
1.1 Introducción.....	4
1.2 Generalidades sobre la fatiga.....	4
1.3 Tensión deformación del acero AISI 1045 deformado por rodillo.....	6
1.4 Endurecimiento de barra de acero por ensayos de torsión cíclica.....	7
1.5 Rotura dúctil y rotura frágil de los materiales.....	9
1.6 Endurecimiento de los materiales por acritud.....	10
1.7 El ensayo de torsión.....	13
1.8 Textura de deformación de la estructura cúbica centrada en el cuerpo.....	15
1.9 Diseño de experimento.....	17
1.9.1 <i>Análisis factorial</i> .....	18
1.10 Modelado matemático.....	18
1.11 Conclusiones Capítulo 1.....	20
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
2.1 Introducción.....	21
2.2 Composición química del material.....	21
2.3 Máquinas herramienta para la elaboración de las probetas.....	22
2.3.1 <i>Características técnicas. Torno de cilindrar y roscar: Modelo 16K20.</i>	22
2.4 Elaboración mecánica de las probetas.....	23
2.4.1 <i>Velocidad de corte de las probetas</i> .....	23
2.4.2 <i>Profundidad de corte de las probetas</i> .....	24
2.4.3 <i>Tiempo de maquinado de las probetas</i> .....	24
2.5 Equipos empleados en la experimentación del ensayo de torsión.....	24
2.5.1 <i>Máquina para hacer ensayos de torsión</i> .....	24
2.5.2 <i>Datos técnicos de la máquina de ensayos de torsión</i> .....	25
2.6 Técnicas operatorias para el ensayo de torsión.....	25
2.6.1 <i>Procedimiento para el ensayo de torsión</i> .....	26
2.7 Análisis microestructural.....	29
2.8 Encapsulado de probetas.....	30
2.8.1 <i>Propiedades de la resina Epoxi ROYAPOX – 5050</i> .....	30
2.8.2 <i>Campo de aplicación</i> .....	31
2.9 Diseño de experimento.....	31



2.10	Microscopio óptico.....	32
2.10.1	Equipo para medición de dureza.....	32
2.10.2	Desbaste y pulido.....	32
2.10.3	Paños para pulido.....	33
2.11	Ataque de las muestras para su examen microscópico.....	33
2.12	Conclusiones del Capítulo 2.....	34
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....</b>		<b>35</b>
3.1	Introducción.....	35
3.2	Establecimiento de la probeta para el ensayo.....	35
3.3	Determinación de los regímenes de corte para la elaboración de las probeta	35
3.3.1	Cálculo de de la velocidad de corte.....	35
3.3.2	Análisis de la profundidad de corte.....	36
3.3.3	Determinación del tiempo de maquinado.....	36
3.4	Análisis de la velocidad de deformación.....	36
3.5	Determinación de las tensiones en las probetas ensayadas.....	36
3.5.1	Análisis microestructural en relación a las tensiones para 500 N.....	40
3.5.2	Análisis de regresión lineal.....	42
3.5.3	Análisis microestructural en relación a las tensiones para 1 500 N....	43
3.5.4	Análisis de regresión lineal.....	44
3.5.5	Análisis microestructural en relación a las tensiones para 2 500 N....	45
3.5.6	Análisis de regresión lineal.....	48
3.6	Análisis de las tensiones de resistencia a la torsión del acero AISI 1045.....	49
3.7	Determinación de la tensión de rotura en las probetas endurecidas.....	49
3.8	Análisis del comportamiento de las curvas de las probetas ensayadas.....	50
3.9	Análisis de la microdureza.....	50
3.10	Valoración económica del proceso de endurecimiento.....	52
3.11	Valoración del impacto medio ambiental.....	52
3.12	Conclusiones del Capítulo 3.....	55

## **CONCLUSIONES GENERALES**

## **RECOMENDACIONES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

# *Introducción*

## *Introducción*

## INTRODUCCIÓN

La idónea determinación de propiedades de materiales mediante ensayos mecánicos, requiere que sea básicamente la naturaleza del material lo que reaccione ante la carga aplicada durante el ensayo y no factores extraños a dicha naturaleza. Entre estos factores, y como capaz de influir en el resultado del ensayo de torsión pura estática, puede hallarse el acabado superficial de las probetas, pues los surcos de rugosidad producidos por el torneado actúan como concentradores superficiales de esfuerzos (principio de Saint-Venant) creando esfuerzos diferentes al cortante, el cual es el que propicia la deformación plástica.

Los materiales se seleccionan para diversas aplicaciones y componentes adecuando las propiedades del material a las condiciones funcionales requeridas por el componente. El primer paso en el proceso de selección requiere que se analice la aplicación para determinar las características más importantes que debe poseer el material.

La propiedad elástica de los materiales está relacionada, con la capacidad de un sólido de sufrir transformaciones termodinámicas reversibles. Cuando sobre un sólido deformable actúan fuerzas exteriores y éste se deforma se produce un trabajo de estas fuerzas que se almacena en el cuerpo en forma de energía potencial elástica y por tanto se producirá un aumento de la energía interna. El sólido se comportará elásticamente si este incremento de energía puede realizarse de forma reversible, en este caso decimos que el sólido es elástico, en caso contrario entonces el sólido tendrá un comportamiento plástico.

La plasticidad de los materiales está relacionada con cambios irreversibles en los materiales. A diferencia del comportamiento elástico que es termodinámicamente reversible, un cuerpo que se deforma plásticamente experimenta cambios de entropía, como desplazamientos de las dislocaciones. En el comportamiento plástico parte de la energía mecánica se disipa internamente, en lugar de transformarse en energía potencial elástica.

Microscópicamente, en la escala de la red cristalina de los metales, la plasticidad es una consecuencia de la existencia de ciertas imperfecciones en la red llamadas dislocaciones. En 1934, Egon Orowan, Michael Polanyi y Geoffrey Ingram Taylor,

más o menos simultáneamente llegaron a la conclusión de que la deformación plástica de materiales dúctiles podía ser explicada en términos de la teoría de dislocaciones. Para describir la plasticidad usualmente se usa un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales y no integrables que describen los cambios en las componentes del tensor deformación y el tensor tensión con respecto al estado de deformación-tensión previo y el incremento de deformación en cada instante.

Cuando se trata de cuerpos sólidos, las deformaciones pueden ser permanentes, en este caso, el cuerpo ha superado su punto de fluencia y se comporta de forma plástica, de modo que tras cesar el esfuerzo de tracción se mantiene el alargamiento; si las deformaciones no son permanentes se dice que el cuerpo es elástico, de manera que, cuando desaparece el esfuerzo de tracción, aquél recupera su primitiva longitud.

La **situación problémica** de la investigación la constituye:

Las pruebas mecánicas de resistencias de materiales son un procedimiento cotidiano para verificar la calidad de los materiales utilizados en la industria, mientras que en los centros académicos son un elemento indispensable para la caracterización de los materiales y el análisis de comportamientos bajo ciertos requerimientos de carga. El proceso de deformación plástica por rodillo se emplea para incrementar la dureza superficial del acero y el ensayo de torsión se aplica para la caracterización mecánica de materiales. Las características microestructurales de un acero varían en dependencia del proceso al que sea sometido, la microestructura resultante del acero AISI 1045 luego de ser deformado por rodillo simple y luego sometido a carga cíclica de torsión aún es insuficiente en las literaturas.

El **problema** a investigar lo constituye: Las inestabilidades superficiales provocadas por el efecto de la torsión en muestras de acero AISI 1045 deformado plásticamente por rodadura.

Como **objeto de la investigación** se establece: acero AISI 1045 deformado por rodadura y sometido a carga cíclica de torsión.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**: La microestructura, la dureza, la tensión última y el máximo torque pueden provocar efectos adicionales en el acero AISI 1045 después de haberlo sometido a proceso de deformación plástica superficial por rodillo y luego a ensayo de carga cíclica de torsión.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo**

Determinar el efecto de la torsión en el acero AISI 1045 deformado superficialmente por rodillo simple.

### **Objetivos específicos**

1. Definir las regularidades del comportamiento del acero AISI 1045 endurecido por rodillo y luego sometido a cargas cíclicas de torsión.
2. Establecer los procedimientos metodológicos que permitan la determinación del efecto de la torsión del acero AISI 1045 deformado por rodillo.
3. Analizar los resultados obtenidos de los ensayos experimentales fundamentando los mismos, así como el análisis económico y medioambiental.

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. Análisis de los efectos de las variables empleadas en el proceso de obtención del efecto de la torsión del acero AISI 1045 deformado por rodillo simple.
3. Ejecución experimental para la validación y corroboración de la formulación desarrollada para la determinación de las estructuras metalográficas.
4. Análisis de los resultados y fundamentación del efecto de la torsión en el acero AISI 1045 deformado por rodadura, así como de la valoración económica y el impacto medio ambiental.

# Capítulo 1

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

En ingeniería se necesita saber cómo responden los materiales sólidos a fuerzas externas como la tensión, la compresión, la torsión, la flexión o a la cizalladura. Los materiales sólidos responden a dichas fuerzas con una deformación elástica (en la que el material vuelve a su tamaño y forma originales cuando se elimina la fuerza externa), una deformación permanente o una fractura. Los efectos de una fuerza externa dependientes del tiempo son la plastodeformación y la fatiga.

La primera región que encontramos (elástica) en la mayoría de los materiales metálicos y algunos cerámicos presentan una variación o dependencia lineal que nos indica que dentro de un rango de valores existe una proporcionalidad directa entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida por la pendiente de la curva en esta zona.

Se establece como objetivo del capítulo realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en lo relacionado con los ensayos destructivos empleados para evaluar la resistencia mecánica de los materiales.

### **1.2. Generalidades sobre la fatiga**

La fatiga puede definirse como una fractura progresiva. Se produce cuando una pieza mecánica está sometida a un esfuerzo repetido o cíclico, por ejemplo una vibración. Aunque el esfuerzo máximo nunca supere el límite elástico, el material puede romperse incluso después de poco tiempo.

En algunos aceros, como las aleaciones de titanio, puede evitarse la fatiga manteniendo la fuerza cíclica por debajo de un nivel determinado. En la fatiga no se observa ninguna deformación aparente, pero se desarrollan pequeñas grietas localizadas que se propagan por el material hasta que la superficie eficaz que queda no puede aguantar el esfuerzo máximo de la fuerza cíclica. El conocimiento del esfuerzo de tensión, los límites elásticos y la resistencia de los materiales a la plastodeformación y la fatiga son extremadamente importantes en ingeniería.

Para explicar el fenómeno se propusieron teorías que justificaban la pérdida de resistencia mecánica en la alteración de la estructura interna del acero por campos magnéticos o por el propio giro del eje. Por absurdas que puedan parecer estas teorías, hay que tener en cuenta que por entonces los conocimientos relativos a la estructura

interna de los materiales eran muy limitados, aunque se sabía que el proceso de fabricación condicionaba la textura del material confiriéndole determinadas propiedades.

No es extraño entonces que se razonara que la rotura inesperada se produjera por la transformación de la estructura «fibrosa» del acero en una estructura «cristalina», sin que los mismos que defendían estas teorías supieran muy bien a qué se referían.

Hacia 1845, Rankine demostró que la reducción de las concentraciones de tensiones alargaba la vida del eje. Posteriormente, hacia 1860, Wöhler desarrolló diversas máquinas de ensayo para el estudio sistemático del fenómeno, una de las cuales empleaba una probeta rotatoria, que inspira los actuales ensayos de fatiga de materiales férricos.

Wöhler extrajo dos conclusiones de aquellos ensayos: la primera, que las fuerzas necesarias para provocar la rotura con cargas dinámicas son muy inferiores a las necesarias en el caso estático, y la segunda, que existe un umbral por debajo del cual las probetas no se rompían (límite de fatiga).

Ya en el siglo XX, Humfrey y Ewing observaron que, bajo cargas dinámicas, aparecían deformaciones por deslizamiento similares a las obtenidas en el caso estático, de modo que el progreso de dichas líneas era el que conducía a la rotura. Posteriormente, Hanson y Gough introdujeron la hipótesis del endurecimiento por deformación (acritud) para explicar la existencia del límite de fatiga, de modo que con cargas pequeñas el endurecimiento llegaba a compensar y detener el avance del deslizamiento.

Actualmente, aunque se acepta la teoría del endurecimiento/deslizamiento, no existe una formulación cuantitativa que permita realizar un cálculo fiable. No obstante, la multitud de datos disponibles, especialmente para materiales férricos y otros materiales metálicos, ha permitido desarrollar métodos de cálculo para el diseño de piezas confiables. Este no es el caso de materiales de aparición reciente, para los que es necesaria la fabricación y el ensayo de prototipos.

Desafortunadamente, existe una diferencia notable entre la teoría y la realidad. Esto conduce a incertidumbres significativas en el diseño cuando la vida a fatiga o el límite de fatiga son considerados. La dispersión en los resultados es una consecuencia de la sensibilidad de la fatiga a varios parámetros del ensayo y del material que son

imposibles de controlar de forma precisa. Estos parámetros incluyen la fabricación de las probetas y la preparación de las superficies, variables metalúrgicas, alineamiento de la probeta en el equipo de ensayos, tensión media y frecuencia del ensayo.

### **1.3. Tensión deformación del acero AISI 1045 deformado por rodillo**

Las deformaciones también pueden estar relacionadas con la presencia de dislocaciones. El desplazamiento de los átomos de las posiciones ideales puede surgir en los cristales de las soluciones sólidas debido a la diferencia entre las dimensiones de los átomos y a la interrelación química entre los átomos ya sea del mismo o de diferentes géneros que componen la solución, son llamadas también submicroscópicas, (Lajtin, 1971, Pero- Sanz, 2000, Alfonso, 1995; 2002).

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.

Se ha determinado que en estos procesos de compresión directa surgen tensiones residuales una vez finalizado los mismos. En Dieter (1967); Álvarez (1999), se plantea que las tensiones residuales internas constituyen el sistema de tensiones que puede existir en un cuerpo cuando está libre de la acción de fuerzas externas y se producen cuando un cuerpo sufre una deformación plástica no uniforme, y el signo de la tensión residual producida por dicha deformación será opuesto al de la deformación plástica que la produjo. Para conocer las peculiaridades de la deformación plástica del material es necesario analizar su comportamiento de desplazamiento contra la fuerza aplicada al mismo.

En ese caso, debido a la alta relación superficie/volumen, factores dependientes del mecanizado como, tipo y magnitud de las tensiones residuales, distorsión de forma, deformación plástica y alteraciones de dureza, resultan más significativos y relevantes, afectando la capacidad de carga y el comportamiento al desgaste y a fatiga de las piezas en servicio (Shin y Walter, 1980).

Es conocido que durante la operación de rodilado se genera un estado tensional volumétrico de compresión no uniforme, dado por la fuerza compresiva constante y por

las reacciones de oposición del material ante la misma, en las otras dos direcciones, (Martynenko, 2002).

Fernández *et al.*, (2009) demostraron las mayores tensiones que se originan en el proceso de deformación plástica superficial empleando rodillo simple, se localizan en la parte frontal que entra en contacto con el rodillo durante su desplazamiento, donde el resto de la pieza experimenta una mínima deformación. Las tensiones se incrementan en la medida que aumenta la fuerza, la profundidad y el diámetro de la pieza; obteniéndose un grado de compactación mayor de los granos.

#### **1.4. Endurecimiento de barra de acero por ensayos de torsión cíclica**

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 torsión para comprobar los materiales que van a estar sometidos a impacto durante su funcionamiento, los materiales sometidos a la carga de la viga simple tiene por objetivo definir la resistencia elástica, resistencia última y plasticidad del material cuando se le somete a fuerzas uniaxiales.

Según Key to Steel (2002), la fatiga superficial se relaciona fundamentalmente con estados tensionales del tipo plano; es decir, aquellos donde no existen tensiones normales a la superficie de la pieza. Los valores de tensiones en la red cristalina se verán influenciados por la magnitud de las cargas aplicadas al material y la velocidad de aplicación de dichas cargas, entre otros factores que someten el enrejado cristalino a esfuerzos de torsión y compresión (las cuales actuarán en el mismo sentido o en sentido contrario a las provocadas por los desplazamientos de los cristales) y cuyos átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones (Callister, 1999, Pero-Sanz, 2000).

Alfonso (1995); Martín (2000), consideran que el control de las tensiones de primer género tiene una gran importancia práctica, ya que permite elevar considerablemente la seguridad de las instalaciones, máquinas y mecanismos durante su explotación.

Los autores Boyle y Spence (1989), plantean que al examinar la deformación plástica y el endurecimiento por deformación en frío se puede observar que a cada valor de tensión le corresponde una determinada deformación. Sin embargo, en realidad cualquier material bajo la acción de una tensión constante, puede en determinadas condiciones deformarse progresivamente con el tiempo. Este fenómeno recibe el nombre de fluencia.

El endurecimiento de metales durante la deformación cíclica ha sido investigado en diversos experimentos, asociados a ensayos mecánicos de esfuerzos alternativos y a procesos de conformado. Los resultados sugieren el desarrollo de un comportamiento mecánico anormal, caracterizado por la ocurrencia de endurecimiento a niveles más bajos y por el ablandamiento del material.

Las pruebas cíclicas de tracción/compresión en muestras de acero Sarma y Padmanabhan (1997), de compresión en tres direcciones y de extrusión/compresión en probetas de aluminio (Armstrong *et al.*, (1982); Richert *et al.*, (1988); Richert (1990); Richert *et al.*, (1998), indicaron la obtención de un estado de tensión constante a bajas deformaciones, lo cual no se observa en operaciones de deformación monótona.

El endurecimiento anormal también se ha alcanzado en experimentos de deformaciones sucesivas. Los ensayos de tracción conducidos en distintas direcciones Wilson *et al.*, (1983), pruebas de tracción después de la laminación o de estado plano de deformación Wagoner y Laukonis (1983); Doucet y Wagoner (1989); Vieira y Fernández (1995), y ensayos de tracción seguidos de cizallamiento en diferentes direcciones Peeters *et al.*, (2001); Rauch *et al.*, (2002); Barlat *et al.*, (2003) exhibieron la ocurrencia de transitorios en la curva tensión-deformación y en la velocidad de endurecimiento de los metales. Los resultados de los experimentos han sido asociados a cambios en la forma en la que las dislocaciones se distribuyen e interactúan entre sí.

Se ha observado que la asociación de los efectos obtenidos durante la deformación cíclica y la deformación sucesiva podría llevar al ablandamiento del material (Armstrong *et al.*, 1982; Coffin y Tavernelli, 1959; Lukás y Kunz, 2002), indicado a través de la disminución en la resistencia mecánica. Sin embargo, el estudio del procesamiento cíclico de muestras predeformadas ha sido efectuado, en su mayor parte, a través de ensayos de esfuerzos de la misma naturaleza, para ambas etapas de deformación.

### **1.5. Rotura dúctil y rotura frágil de los materiales**

Desde el inicio de la teoría de dislocaciones se conoce que la deformación plástica en materiales dúctiles a baja temperatura resulta el movimiento de dislocaciones por deslizamiento bajo la acción de la tensión aplicada. Este mecanismo de deformación se define como deslizamiento cristalográfico. Consiste en el deslizamiento de un plano de átomos sobre otro.

Para que se produzca dicho deslizamiento, la tensión de cortadura sobre dicho plano deberá alcanzar un valor crítico, correspondiente al valor de la tensión de cortadura máxima en el ensayo de torsión, y que se define como resistencia al deslizamiento. En materiales frágiles, el tipo de mecanismo de deformación no es del tipo deslizamiento cristalográfico. Así, se produce la fractura cuando la tensión aplicada iguala a la tensión de rotura de los enlaces atómicos. Esta tensión se define como la resistencia de cohesión.

En general, en los materiales dúctiles, la resistencia al deslizamiento es inferior a la resistencia de cohesión. Así, el mecanismo de deformación es el deslizamiento cristalográfico, y la rotura que se produce es dúctil, precedida de gran deformación plástica.

Por el contrario, en los materiales frágiles, no se produce el fenómeno de deslizamiento cristalográfico. La resistencia de cohesión es inferior que la de deslizamiento, y la rotura que se produce es frágil (Badiola, 2004).

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 torsión) con el fallo bajo cualquier estado de tensiones (Korotsiche, 1989).

Se han realizado aproximaciones analíticas, como el trabajo de Zhou y Neale (1995) utilizando el Teorema del Límite Superior y también estudios experimentales, entre los que cabe reseñar los realizados por Lipinski *et al.*, (1990) y Choi y Chung (2002) que mostraron experimentalmente que el grado de daño generado en la zona de deformación depende fundamentalmente de la componente hidrostática de las

tensiones, de la geometría de la matriz, la reducción de área y las condiciones de rozamiento.

Se han elaborado un gran número de criterios de rotura (Oh *et al.*, 1979; Tang *et al.*, 1994), que en general utilizan los resultados (campos de tensión y deformación) obtenidos mediante el análisis con elementos finitos del proceso de conformado. Están basados en una idea básica: la fractura ocurre cuando el valor de un parámetro de daño alcanza un valor crítico.

Normalmente, estos parámetros de daño están relacionados con la fuerza de deformación, las tensiones máximas que sufre el material durante el proceso o con la componente hidrostática de las tensiones.

En general, los aceros son sensibles a la velocidad de deformación. Normalmente su tensión de plastificación aumenta cuando se incrementa la velocidad de deformación.

Se han realizado diferentes intentos de comparar los resultados y las predicciones de los distintos criterios Clift *et al.*, (1990); Wifi *et al.*, (1995) mostrando que los intervalos de validez de los mismos son limitados. En general, la literatura muestra que los diferentes criterios de fractura no permiten predecir de una manera fiable y precisa la iniciación de la fractura en el ensayo de torsión.

### **1.6. Endurecimiento de los materiales por acritud**

**La acritud es una propiedad característica del estado metálico que no presentan los polímeros ni los materiales cerámicos. El material resultará más duro cuanto menor sea el espesor final, es decir, cuanto mayor haya sido la reducción en frío, puede decirse que acritud es el aumento de dureza que adquiere un material por deformación en frío.**

**El grado de acritud que adquiere un material depende de factores externos al material metálico, naturaleza del esfuerzo y velocidad de aplicación de éste, pero sobre todo depende del grado de deformación en frío que el material experimenta y de la naturaleza del material (sistema cristalino, energía de defectos de apilamiento, tamaño de grano, pureza del metal). La acritud guarda relación con el sistema cristalino al que pertenece el metal o aleación (Smelyanky *et al.*, 1990).**

En los cristales metálicos del sistema cúbico, la deformación comienza en unos planos de deslizamientos determinados, que constituyen el sistema primario de deslizamiento;

pero a medida que la deformación continúa, van apareciendo deformaciones en otros planos, constituyendo los sistemas secundario y terciario de deslizamientos. La capacidad de los cristales cúbicos de deformarse en más de un sistema, guarda estrecha relación con la gran acritud que adquieren en la deformación, muy superior a la de los cristales hexagonales, la curva tensión-deformación varía mucho con la naturaleza del metal, su pureza, la orientación del cristal respecto a la probeta, la temperatura, el tamaño y forma del cristal y las condiciones de la superficie de la muestra ensayada.

Cuando la deformación alcanza un valor crítico por encima del límite de acritud, el material se rompe por fractura frágil. Durante este proceso las tensiones de cizalladura, producen deslizamiento en el interior de los granos cristalinos o ruptura de los mismos. Creando tensiones de cizalladura que alcanzan un valor máximo en algún punto, apareciendo deformaciones permanentes o fracturas, punto a partir del cual se inicia el fallo del material (Lubliner, 1986; Álvarez *et al.*, 2004).

Al someter un metal con estructura cúbica a la acción de cargas que sobrepasen el límite de fluencia, después de eliminarlas persistirá la deformación. Si se vuelve a poner al metal bajo la acción de cargas, su actitud para la deformación plástica habrá disminuido y el límite de fluencia se elevará. Esto significa que el metal se ha endurecido por acritud (Barceinas, Juárez, 2001).

La deformación plástica se efectúa por el movimiento de las dislocaciones. Por ejemplo, dentro del cristal, un par de dislocaciones en movimiento genera centenares de nuevas dislocaciones y como resultado de esto la densidad de las dislocaciones aumenta, lo que ocasiona el endurecimiento. Además se producen importantes variaciones en la estructura del metal como es la deformación de la red cristalina y la reorientación de los granos en la dirección de la deformación; el mismo pasa de forma equiaxial a tener ejes desiguales alargados y aplastados (Smelyanky y Blumenstein, 2001).

Según (Badiola, 2004 y Lubliner, 1986) en la teoría de las dislocaciones se conoce que la deformación plástica en materiales dúctiles a baja temperatura, resulta del movimiento de dislocaciones por deslizamiento bajo la acción de la tensión aplicada. Este mecanismo de deformación se define como deslizamiento cristalográfico, y consiste en el deslizamiento de un plano de átomos sobre otro. Para que se produzca dicho deslizamiento, la tensión de cortadura sobre dicho plano deberá alcanzar un valor

crítico, correspondiente al valor de la tensión de cortadura máxima en el ensayo de tracción, y que se define como resistencia al deslizamiento.

El esfuerzo de fractura es el valor al cual se reproduce la fractura de la probeta, y cuyo valor no tiene gran importancia, pues una vez se supere el máximo valor, la probeta fallará, irremediablemente a menores valores de esfuerzo (Callister, 1999).

Generalmente la definición más útil de resistencia a la cedencia es la del corrimiento de 0,2 % (en una gráfica esfuerzo - deformación). En la mayoría de los metales la fluencia comienza con movimientos atómicos que inmovilizan el de las dislocaciones, en polímeros es el relineamiento de cadenas. Cuando el esfuerzo se intensifica estas dislocaciones se liberan y comienzan a moverse y a generar otras dislocaciones móviles. La región resultante de la deformación plástica llamada banda de Lüders, se propaga a través del material (Callister, 1999).

El valor del módulo es una medida de la rigidez del material, entre mayor pendiente tenga la curva mas rígido será el material. Para el caso del acero E vale  $20 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> o  $30 \times 10^6$  PSI. Otros valores característicos del ensayo en esta región elástica, son el límite proporcional y el límite elástico. El valor del límite proporcional es el valor del mayor esfuerzo, para el cual existe proporcionalidad directa entre el esfuerzo y la deformación. El valor del límite elástico es el mayor valor del esfuerzo hasta el cual el material mantiene un comportamiento elástico (Rivero, 1999 y Moreno, 2006).

Según Giagnorio (1997), las cargas de variación brusca, no podrán ser analizadas de la misma manera que en los ensayos estáticos, sino como ondas de tensión que, al propagarse en el volumen de la probeta, generan deformaciones por los mismos mecanismos que en sollicitaciones estáticas, pero su propagación y acumulación serán función de la velocidad de variación de la amplitud de tensión.

En su tesis Marty (1999), plantea que desde que se formularon las bases teóricas de la plasticidad hasta el presente, los estudios ingenieriles han estado preponderantemente dirigidos hacia el análisis de la distribución de tensiones y deformaciones en los materiales bajo un tipo de deformación, y en la predicción del rango límite de esta deformación en relación con la resistencia intrínseca del material.

Plantea (Mallo, 1987), que el análisis exhaustivo del desarrollo de los procesos por deformación plástica se está intentando realizar mediante el seguimiento en cada

instante del continuo cambio en forma y posición de la superficie de fluencia. Un estudio aproximado de la transformación de la superficie de fluencia se puede realizar mediante los criterios del endurecimiento por deformación en frío.

La fatiga puede definirse como una fractura progresiva. Se produce cuando una pieza mecánica está sometida a un esfuerzo repetido o cíclico, por ejemplo una vibración. Aunque el esfuerzo máximo nunca supere el límite elástico, el material puede romperse incluso después de poco tiempo. En algunos metales, como las aleaciones de titanio, puede evitarse la fatiga manteniendo la fuerza cíclica por debajo de un nivel determinado.

En la fatiga no se observa ninguna deformación aparente, pero se desarrollan pequeñas grietas localizadas que se propagan por el material hasta que la superficie eficaz que queda no puede aguantar el esfuerzo máximo de la fuerza cíclica. El conocimiento del esfuerzo de tensión, los límites elásticos y la resistencia de los materiales a la plastodeformación y la fatiga son extremadamente importantes en ingeniería.

### **1.7. El ensayo de torsión**

Los criterios principales para la selección de la probeta de torsión parecen ser que: (1) las probetas deben ser de tal tamaño que permitan que las mediciones de deformación deseadas se logren con exactitud adecuada, y (2) De tales proporciones que eliminen aquella porción de probeta sobre la cual se tomen las mediciones del efecto de los esfuerzos debidos a la sujeción de los extremos.

Los extremos deben ser tales que puedan sujetarse y asegurarse sin desarrollar esfuerzo suficientemente localizados para causar la falla en la máquina adaptan la forma de bloques o transmisiones, algunos tipos de los cuales automáticamente aprietan según el torque es aplicado. Debe tenerse cuidado al sujetar la probeta para no introducir flexión. Usualmente se proveen puntos de centrado en los mandriles de la máquina de torsión para la inserción en pequeños orificios de centrado a cada lado de la probeta; así la probeta puede centrarse exactamente en la máquina.

#### **➤ Torsión**

La carga de torsión es la aplicación de una fuerza que tiende a causar que el miembro gire alrededor del eje axial. La torsión generalmente se la conoce como momento torsor o Torque (T), el cual es producto de una fuerza externa aplicada y un

brazo. El brazo es la distancia de la línea de centros de rotación hasta la línea de fuerza y perpendicular a esta.

Consideremos una barra sujeta rígidamente en un extremo y sometida en el otro a un par  $T = F \cdot d$  aplicado en un plano perpendicular al eje. Se dice que esa barra está sometida a torsión.

### ➤ Efectos de la torsión

Los efectos de la aplicación de una carga de torsión a una barra son: (1) producir un desplazamiento angular de la sección de un extremo respecto al otro y (2) originar tensiones cortantes en cualquier sección de la barra perpendicular a su eje.

### ➤ Momento torsor

A veces, a lo largo de un eje actúan una serie de pares (figura 1.1). En este caso, es conveniente introducir un nuevo concepto, el momento torsor, que se define para cada sección de la barra, como la suma algebraica de los momentos de los pares aplicados, situados a un lado de la sección considerada. Naturalmente, la elección de lado es arbitraria en cada caso.

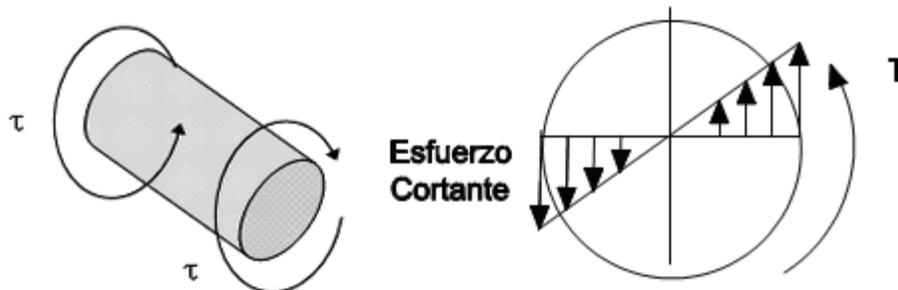


Figura 1.1. Elemento sometido a torsión.

El esfuerzo último al corte se asume que está en el orden del 75% de la resistencia última a la tensión del material.

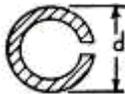
Ciertos elementos estructurales están sujetos a la acción de dos o más tipos de esfuerzos, es decir, un elemento puede trabajar simultáneamente con esfuerzos axiales (compresión y torsión) y a la vez puede estar sometido a flexión y corte.

Cuando esto sucede se dice que el elemento se encuentra trabajando con esfuerzos combinados; en este caso se debe analizar cual es la sección crítica y que tipo de esfuerzo influye en mayor magnitud sobre ésta. El diseño de un elemento sometido a esfuerzos combinados se hace en base a la sección crítica y al esfuerzo

que predomine sobre la misma.

La tabla 1.1 muestra las fórmulas del esfuerzo cortante y la resistencia a la torsión para diferentes secciones.

Tabla 1.1. Propiedades de torsión para diferentes secciones<sup>2</sup>

Sección	Esfuerzo cortante	Resistencia a la torsión (R)
	$\tau = \frac{16 T}{\pi d^3}$	$R = 0.0982 d^4$
	$\tau = \frac{16 T d_2}{\pi (d_2^4 - d_1^4)}$	$R = 0.0982 (d_2^4 - d_1^4)$
	$\tau = \frac{3 T}{\pi d t^2}$	$R = 1.0472 t^3 d$
	$\tau = \frac{4.8 T}{d^3}$	$R = 0.1406 d^4$

### 1.8. Textura de deformación de la estructura cúbica centrada en el cuerpo

Al igual que el carbono, actúan otros elementos que devienen en intersticiales debido a su diámetro atómico menor a 2 Å, lo que les da mayor posibilidad de difusión a través de los intersticios de la estructura cristalina del hierro. Estos elementos son el Nitrógeno ( $d_A = 1,42 \text{ Å}$ ), Hidrógeno ( $d_A = 0,92 \text{ Å}$ ), Boro ( $d_A = 1,94 \text{ Å}$ ), Oxígeno ( $d_A = 1,20 \text{ Å}$ ). Va a ser esta posibilidad de difusión intersticial la responsable de una gran cantidad de posibilidades tecnológicas y variantes de propiedades en el acero, especialmente las vinculadas al endurecimiento, gracias a la solución sólida intersticial de carbono en hierro, y a la formación de compuestos intersticiales como carburos y nitruros que aparecen como componentes usualmente muy duros en los aceros aleados.

Por otro lado, otros elementos como el cromo, níquel, titanio, manganeso, vanadio, cobre, con diámetros atómicos cercanos al del hierro (condición sine quanon), formarán soluciones sólidas sustitucionales en un intervalo que dependerá de la semejanza de estructura cristalina, de la afinidad química y de las valencias relativas.

Estas soluciones sustitucionales son las más frecuentes y numerosas entre los metales, especialmente en el acero.

Según Callister (1999); Pochettino y Sánchez (1999), en los cristales metálicos del sistema cúbico centrado en el cuerpo, la deformación comienza en unos planos de deslizamiento determinados que constituyen el sistema primario de deslizamiento, pero a medida que la deformación continúa, van apareciendo deformaciones en otros planos, constituyendo los sistemas secundario y terciario de deslizamientos. La capacidad de los cristales cúbicos de deformarse en más de un sistema, guarda estrecha relación con la gran acritud que adquieren en la deformación, muy superior a la de los cristales hexagonales.

Kruschov (1957); Lin *et al.*, (2001); Ogburn (2001), consideran que los metales simples de estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo son más desgastados que aquellos de estructura hexagonal compacta y por tanto, menos endurecido por deformación plástica ya que poseen un solo plano simple de desplazamiento normalmente activo, mientras que los cúbicos tienen una gran cantidad de planos equivalentes, multiplican el deslizamiento y las altas concentraciones de dislocaciones y por tanto, un alto trabajo de endurecimiento incrementada en el material por la deformación plástica en la superficie.

El Axir y Serage (1988), demuestran que en la deformación de policristales, el plano de deslizamiento gira a medida que la deformación se lleva a cabo. La deformación de los policristales también resulta de la rotación de planos y ejes. Sin embargo, debido a la interacción con los granos adjuntos, las rotaciones son muy complejas y los alineamientos de los granos con respecto al eje y al plano de deformación son empíricamente determinadas.

Estas alineaciones son llamadas texturas cristalográficas y así las alineaciones son debidas a la deformación, los cuales son llamados texturas de deformación. Surgen texturas cuando la deformación del material es muy grande.

Plantean Niberk (1987); Michael *et al.*, (2002), el concepto de textura recoge la orientación preferencial de determinadas direcciones cristalográficas orientadas hacia el eje de aplicación del esfuerzo. La cualidad de la orientación es función del tipo de estructura cristalina y de conformación plástica efectuada, mientras que el grado de orientación es función del grado de deformación alcanzado.

## 1.9. Diseño de experimento

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente y estimar esta influencia. Para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta. Del análisis y estudio de la información recogida se obtienen las siguientes conclusiones.

La forma tradicional que se utilizaba en la experimentación, para el estudio de estos problemas, es basaba en estudiar los factores uno a uno, esto es variar los niveles de un factor permaneciendo fijos los demás. Esta metodología presenta grandes inconvenientes:

- Es necesario un gran número de pruebas.
- Las conclusiones obtenidas en el estudio de cada factor tiene un campo de validez muy restringido.
- No es posible estudiar la existencia de interacción entre los factores.
- Es inviable en muchos casos por problemas de tiempo o costo.

Para minimizar procesos de fabricación, condiciones de reacción y métodos de análisis entre otros, es necesario conocer qué variables influyen significativamente en el sistema y cómo afectan. A menudo esta información no está disponible y se genera experimentando. Primero se recogen en una lista todas las variables que podrían influir en la respuesta

El elevado coste de la experimentación y las limitaciones de tiempo obligan a ejecutar sólo los experimentos imprescindibles. El método tradicional de variar un factor- cada- vez no suele ser la mejor opción. Puede implicar más experimentos de los necesarios y a pesar de ello, proporcionar sólo información parcial. Por ejemplo, no mostrará si existe interacción entre factores (Ferré, Rius, 2002). Las interacciones suelen ser muy corrientes y a veces son los efectos más importantes, por lo que conocerlas es imprescindible para comprender el comportamiento de muchos sistemas.

### **1.9.1. Análisis factorial**

Cuando se tiene una gran cantidad de datos sobre numerosas variables diferentes con correlación entre ellas. Con ayuda del *análisis factorial*, tales datos suelen poder comprimirse y las variaciones presentarse a través de sólo unas pocas variables.

A través de este análisis se puede descubrir si tras las estimaciones de los sujetos, hay algunas "variables de fondo" cuya medición directa por a través de medios lingüísticos no sería posible a causa de la carencia de adjetivos apropiados en el lenguaje. La hipótesis del investigador es que estas variables de fondo "aparecen" a través de los adjetivos usados en las escalas semánticas, habitualmente no con un adjetivo único, sino mediante un grupo de adjetivos con correlación entre ellos.

Con la ayuda de un análisis factorial, las variables de combinación o factores ocultos tras los atributos medidos pueden detectarse y especificarse, y el análisis también dice lo estrechamente que estos factores están vinculados con las variables originalmente verificadas. A veces se sitúa también una condición suplementaria sobre los factores, concretamente que no deben tener correlación alguna entre ellos y estén por lo tanto en "ángulo recto" uno con respecto a otro ("rotación ortogonal" de los factores durante el análisis).

Un inconveniente del método del análisis factorial es que es demasiado fácil de usar para estudios que son formalmente correctos pero en la práctica absurdos, porque siempre presenta los resultados de una forma elegante y matemáticamente exacta, incluso cuando los factores obtenidos son tienen ningún contenido empírico sensato.

### **1.10. Modelado matemático**

El diseño de estrategias de control clásico y avanzado requiere normalmente de desarrollos teóricos y de simulaciones dinámicas, que deben basarse en un modelo matemático del proceso a controlar. Dicho modelo debe representar con cierto grado de aproximación el comportamiento dinámico de las principales variables de interés.

Como la gran mayoría de los procesos reales poseen características no lineales, entonces su representación natural se efectúa mediante un modelo matemático que involucra normalmente un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales. Cuando el sistema físico o el proceso a modelar se pueden considerar de parámetros concentrados, entonces el modelo matemático resultante incluye ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO); mientras que si el proceso es de parámetros

distribuidos, el modelo matemático incluirá ecuaciones diferenciales parciales (Ray y Lainiotis, 1978).

Por último, los modelos matemáticos pueden ser determinísticos o estocásticos. Un modelo matemático es determinístico cuando asume nulos los ruidos típicos del proceso y de la medición; en tal caso, las evoluciones temporales de todas las variables del modelo pueden ser determinadas en forma precisa. En cambio, en un modelo estocástico las componentes aleatorias propias del proceso y de la medición se asumen de estadística conocida y usualmente se las considera como “ruidos blancos”.

### **1.11. Conclusiones del Capítulo 1**

- ✓ En las fuentes bibliográficas consultadas existe diversidad de criterios sobre el fenómeno de torsión, sin embargo en ninguna de ella se establece el comportamiento de la curva del acero AISI 1045 cuando es deformado por rodadura.
- ✓ Se determina que el flujo plástico de los materiales ocurre por la deformación que experimentan los mismos al ser sometidos a esfuerzos, destacándose en ellos zonas que caracterizan su comportamiento inicial hasta su ruptura final.
- ✓ Los diseños de experimento juegan un papel fundamental en la mayoría de las investigaciones, ya que estos permiten disminuir el elevado coste de la experimentación y las limitaciones de tiempo, obligando a ejecutar sólo los experimentos imprescindibles.

# Capítulo 2

## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Al realizarse el estudio de un objeto o sistema real se debe comenzar por la elección de un esquema de cálculo. Para realizar el cálculo de una estructura se debe, ante todo, separar lo importante de lo que carece de importancia, es decir, se debe esquematizar la estructura prescindiendo de todos aquellos factores que no influyen significativamente sobre el comportamiento del sistema como tal.

Este tipo de simplificación es en todos los casos absolutamente necesario, puesto que la solución del problema que considere todas las propiedades de la estructura es imposible debido a que, en general éstas son inagotables.

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 torsión) con el fallo bajo cualquier estado de tensiones.

#### **Se plantea como objetivo del capítulo:**

1. Relacionar los equipos, materiales y medios que se emplean en la caracterización microestructural del acero AISI 1045 deformado por rodadura y luego sometido a torsión.

### 2.2. Composición química del material

La composición química estándar (ver tabla 2.1) de este acero según norma GOST y su equivalencias en 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 AISI 1045

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

### 2.3. Máquinas herramienta para la elaboración 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.

#### 2.3.1. Características técnicas. Torno 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; 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; 0,25; 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). . . . . 25 x 25 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

#### 2.4. Elaboración mecánica de las probetas

Para la elaboración de las probetas, se realizó el corte en el torno, garantizando un constante y severo régimen de enfriamiento evitando que el calentamiento producido por la fricción durante el proceso de corte y pudieran aparecer transformaciones en la estructura.

Corte de las probetas L = 10 mm X 10 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 cortará al aire, con los siguientes datos de corte:

$n = 250 \text{ rev/min}$ ,  $S = 0,2 \text{ mm/rev}$  (Casillas, 1987).

En el torneado se empleara una cuchilla de TRONZAR 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 coroKey, 1996).

##### 2.4.1. 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.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Donde:

$V_c$  = Velocidad de corte; mm/min .

$D$  = Diámetro de la pieza; mm .

$n$  = Número de revolución; rev/min .

1 000 = Factor de conversión de metro a milímetro.

### 2.4.2. 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 tornea 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.

$$t = \frac{D - d}{2} \quad (2.2)$$

Donde:

$t$  - Profundidad de corte; mm.

$D$  - Diámetro de la pieza antes y  $d$ ; después de la elaboración; mm.

### 2.4.3. 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.

$$T_m = \frac{L}{n \cdot s} \cdot i \quad (2.3)$$

Donde:

$T_m$  = Tiempo de maquinado; min.

$L$  = Longitud a maquinar; mm.

$i$  = Números de pasadas.

$n$  = Números de revoluciones; rev/min.

$s$  = Avance; mm/rev

## 2.5. Equipos empleados en la experimentación del ensayo de torsión

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.

### 2.5.1. Máquina para hacer ensayos de torsión

Para la obtención del diagrama torsión - deformación necesitamos someter a torsión 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:

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

### 2.5.2. Datos técnicos de la máquina de ensayos de torsión

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 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 torsión 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 N, y de la deformación ( $\Delta l$ ) en mm. En la figura 2 (ver anexo) se muestra una imagen de la máquina de torsión empleada en la experimentación, la cual se encuentra ubicada en el laboratorio de Resistencia de materiales de la carrera de Ing. Mecánica del ISMM.

Carga máxima	20 tf.
Potencia del motor	2 kW.
Frecuencia de rotación	1420 rev/min.
Escala de medición	1 kgf/cm, 2 kgf/cm, 5 kgf/cm y 10 kgf/cm.
Altura	2,5 m
Ancho	1,10 m
Masa	900 kg.

### 2.6. Técnicas operatorias para el ensayo de torsión

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 sollicitaciones. Sin embargo otro tipo de ensayo al que se someten los materiales es el de tensión.

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

$\sigma_p$  – límite de proporcionalidad;  $\sigma_f$  – límite de fluencia;  $\sigma_r$  – límite de rotura;

E – Modulo de Elasticidad; %  $\delta$  - % de elongación; %  $\varphi$  - % 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.

### 2.6.1. Procedimiento para el ensayo de torsión

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.

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 torsión.
3. Colocar el extensómetro u otro medio de medición de los desplazamientos.
4. Conectar el chucho general de la máquina.
5. Se aplica la carga.

Los elementos a considerar durante el ensayo aparecen en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros del ensayo

Tb	Máximo Torque	tb	Fuerza de Torsión
ts	Tensión de Torsión	tsu	Tensión de Torsión Superior
tsl	Baja Tensión de Torsión	Tp 0,015	Torsión de desplazamiento Tensión 0,015
tp 0,3	Torsión de desplazamiento Tensión 0,015	$\Phi_{max}$	Máximo Ángulo de Torsión
Ip	Torque Polar Inercial	W	Coefficiente de Sección de la probeta
Ts	Punto de torque	Tsu	Torsión de Rendimiento Superior
Tsl	Bajo Rendimiento de Torsión		

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

La deflexión causada por la torsión es medida por el ángulo de giro o por el movimiento vertical de una esquina de la sección. Para secciones circulares uniformes

sujetas a un giro o momento torsor (torque) el resultado del esfuerzo cortante es:

$$\tau = \frac{TC}{J} \quad (2.4)$$

**Donde:**

$\tau$  - Esfuerzo cortante, MPa.

C - Distancia del centro de la sección a la fibra exterior, mm.

T - Torque, MPa.

J - Momento polar de inercia,  $\text{cm}^4$

$$J = I_x + I_k = 2I \quad (2.5)$$

**Donde:**

I = momento de inercia.

El esfuerzo último al corte se determina como:

$$\theta = \frac{TL}{E_s J} \quad (2.6)$$

**Donde:**

$\theta$  - Ángulo de giro, rad

L - Longitud de la sección, mm

E - Módulo de elasticidad en corte, 12 000 000 PSi

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:

$$E = \frac{\sigma_p}{e_p} \quad (2.7)$$

**Donde:**

E - Límite de proporcionalidad.

$\sigma_p$  - Límite elástico.

$e_p$  - Elongación.

El límite elástico se calcula por la siguiente ecuación:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_o} \quad (2.8)$$

**Donde:**

$F_p$  - Tensión límite de proporcionalidad.

$A_o$  - Área inicial.

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

**Donde:**

$d_o$  - Diámetro inicial

La elongación se determina como:

$$ep = \frac{\Delta Lp}{L_o} \quad (2.9)$$

**Donde:**

$L_o$  - Elongación inicial.

Para usar la elongación debemos recordar que  $\Delta Lp = \text{Long.finl} - \text{long.inicly}$  la longitud total es el 30 % de la longitud.

La tensión de fluencia se calcula por:

$$\sigma_F = \frac{F_F}{A_o} \quad (2.10)$$

$F_F$  - Tensión límite de fluencia.

El esfuerzo a la rotura se puede llamar también como la resistencia máxima a la torsión ( $\sigma_B$ ), o tensión máxima del material y se puede calcular por:

$$R = \frac{F_{\max}}{A_o} \quad (2.11)$$

$F_{\max} = F_u$  - 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:

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A_o} \quad (2.12)$$

**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 2.3).

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

Tabla 2.3. Parámetros para evaluación de las probetas después del ensayo

Número	Tb	Tb	TS	Tsu	Tsl	Tp 0,015	Tp 0,3
	N.m	N/mm <sup>2</sup>					
1							
Promed							
Desv std							
% COV							
Máximo							
Mínimo							
Mediano							
Número	$\Phi_{max}$	$l_p$	W	Ts	Tsu	Tsl	
	Grad	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	N.m	N.m	N.m	
1							
2							
Promed							
Desv std							
% COV							
Máximo							
Mínimo							
Mediano							

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 construidos con los datos necesarios, así como las diferentes tablas.

## 2.7. Análisis microestructural

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón de la probeta traccionada y sin deformar, también se tuvo en cuenta la microestructura del acero AISI 1045 en estado de suministro, pero con un previo normalizado. Ambas microestructuras aparecen en las figuras 2.1 y 2.2. Estas se emplearán para establecer el comportamiento del material de las probetas después del ensayo de torsión.



Figura 2.1. AISI 1045 sin deformar.

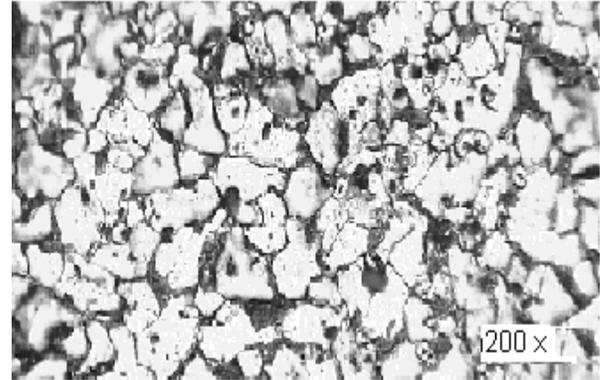


Figura 2.2. AISI 1045 sin deformar, pero torsionada

Según los ensayos realizados y la imagen en las figuras 2.1 y 2.2, se confirma que el material a emplear en los experimentos es un acero AISI 1045 con una estructura metalográfica ferrítica perlítica.

## 2.8. Encapsulado de probetas

Cuando las muestras son pequeñas o de difícil manejo en las operaciones de desbaste y pulido, es necesario montarlas en un material adecuado para hacer posible la preparación, como se observa en la figura 2.3. La muestra se coloca en un molde y luego se agrega la resina hasta cubrir completamente el volumen entre la muestra y el molde. Es utilizada preferentemente en el montaje de muestras sensibles al calor o a la presión. En este caso empleamos la resina de Epoxi ROYAPOX – 5050.

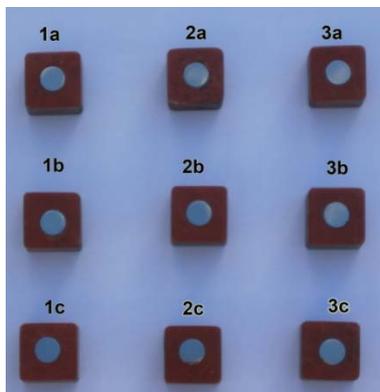


Figura 2.3. Montaje de la muestra empleando resina.

### 2.8.1 Propiedades de la resina Epoxi ROYAPOX – 5050

ROYAPOX 5050 es una resina Epoxi, que se presenta en forma de dos componentes y una vez polimerizada a temperatura ambiente, forma una masa incolora, dura y algo flexible. Presenta buenas cualidades de resistencia a la humedad y buenas

propiedades mecánicas y dieléctricas. La resina ROYAPOX 5050 conserva sus propiedades a temperaturas comprendidas entre  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 2.8.2 Campo de aplicación

La resina ROYAPOX 5050 puede utilizarse en la impregnación ó relleno de pequeños componentes electrónicos, que requieran una protección contra la humedad y los cambios de temperatura. La resina se suministra en dos componentes separados y predosificados: ROYAPOX 5050 y ENDURECEDOR 5050. La relación de mezcla en peso (Resina/Endurecedor) es de 100/40. Los recipientes estancos y precintados, deben ser almacenados a temperatura ambiente ( $15 - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), de esta forma tendrán más de 1 año de tiempo de vida.

### 2.9. Diseño de experimento

A partir de un diseño de experimentos propuesto (Fernández, 2011) como se observa en la tabla 2.4, se realiza el proceso de deformación, para luego realizar el análisis microestructural, según el orden en que fueron deformadas cada una de las probetas, considerando que para cada carga se debe experimentar un cambio en la estructura cristalina del material es lo que justifica la presente investigación.

Tabla 2.4. Matriz de planificación del experimento.

Niveles	Factores		
	n(rev/min)	P(N)	S(mm/rev)
Nivel superior (+1)	110	2 500	0,25
Nivel medio ( $\Delta$ )	54	1 500	0,125
Nivel inferior (-1)	27	500	0,075
Número de ensayo			
1a	27	500	0,075
1b	27	500	0,125
1c	27	500	0,25
2a	54	1500	0,075
2b	54	1500	0,125
2c	54	1500	0,25
3a	110	2500	0,075
3b	110	2500	0,125
3c	110	2500	0,25

Para realizar el análisis microestructural de las 9 probetas se tuvo en cuenta las diferentes cargas a la que fueron sometidas cada una de ellas, considerando que en dependencia de cada carga existirán deformaciones diferentes.

## **2.10. Microscopio óptico**

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleará para la comparación de las micrografías obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas.

### **2.10.1. Equipo para medición de dureza**

Para determinar las durezas de cada material se toman muestras de cada una de ellas, se pulen debidamente con lija de 400 granos de partículas abrasivas por  $\text{mm}^2$  para evitar que alguna suciedad u óxido provoque errores en los resultados. Las mediciones de la dureza se realizaron por el método Vickers (HV), y se efectuarán al menos tres mediciones para cada muestra en diferentes lugares. Para realizar este ensayo se utilizará un durómetro Vickers.

### **2.10.2. Desbaste y pulido**

El desbaste, a grandes rasgos, consiste en obtener primeramente una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de máquinas herramienta y papeles abrasivos.

En el pulido se emplearon lijas del tipo No, 320 y 400, a las cuales les corresponden el mismo número en granos de partículas abrasivas por  $\text{mm}^2$  según (ISO 9001), respectivamente.

Este pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado  $90^\circ$  al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior.

El pulido con los papeles abrasivos se realiza variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina. Al concluir de pasar el papel abrasivo más fino se realiza la operación conocida como pulido fino, en el que se emplea la pasta abrasiva conocida comercialmente como "Pasta GOI", añadida sobre discos provistos de paños o motas. Después de esta operación se obtiene una superficie pulida.

### 2.10.3. Paños para pulido

La textura superficial de los paños de pulir varía desde la que no tienen pelo, como la seda natural y el tejido empleado para cubrir las alas de aeroplanos, hasta aquellos con pelo relativamente largo, como el terciopelo y la pana, que son de aplicación muy general. Dentro de los más comunes y utilizados, se encuentran los paños de mesa de billar, paños de lana de distintas finuras y lonas de diferentes pesos. La selección del paño de pulir, depende del material a pulir y el propósito al cual este destinado el estudio metalográfico.

Una vez pulida las probetas se lavan con agua destilada, se secan con papel de filtro y finalmente se vuelven a lavar con tetracloruro de carbono para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir.

### 2.11. Ataque de las muestras para su examen microscópico

Consiste en atacar la superficie ya pulida con algún reactivo químico, su objetivo es hacer visibles las características estructurales de la muestra que se está analizando, de tal manera que se pueda diferenciar con claridad su microestructura. La superficie debe protegerse de la oxidación y efectos atmosféricos que pudiesen afectarles. Para determinar el tipo de reactivo se debe tener en consideración el material y la finalidad que se busca.

Se realizó con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido hasta alcanzar el brillo de espejo, para observar la estructura metalográfica formada después de la deformación del material bajo carga por rodadura. Según ASTM E-262 - Practice A. Para este ataque químico se utilizó Nital al 4 %

Ácido Nítrico (HNO <sub>3</sub> )	5 mL
Alcohol (etanol)	100 mL

## **2.12. Conclusiones del Capítulo 2**

- ✓ Se selecciona el acero AISI 1045 para someter a la deformación plástica superficial explicando sus características y composición química ya que el mismo posee una gran capacidad de endurecimiento de las capas por acritud.
- ✓ El proceso de fabricación de las probetas, se realizó 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 torsión, describiendo la técnica operativa a seguir en este caso.
- ✓ La metodología desarrollada define el comportamiento del acero AISI 1045 cuando es sometido a un ensayo de torsión luego de ser endurecido plásticamente con rodillo, en función del carácter de la fricción de los dos cuerpos en contacto

# Capítulo 3

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 3.1. INTRODUCCIÓN

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 torque-deformacional del acero AISI 1045 endurecido por deformación plástica superficial sometido a la acción de cargas de torsión. Así mismo se revela a partir de los modelos experimentales obtenidos; el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 en las referidas condiciones.

El objetivo del capítulo es establecer el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 deformado por rodadura a partir del esfuerzo de deformación en cada una de las muestras analizadas.

### 3.2. Establecimiento de la probeta para el ensayo

Como se especificó en el capítulo anterior, el tamaño de las probetas está normalizado según Norma Internacional NTC 595, para nuestro caso de estudio se estableció que la probeta a emplear sería del Tipo M II y sus dimensiones se encuentran tabuladas en la tabla 2.2.

### 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

Según Casillas (1987); Fernández *et al.*, (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  $s = 0,2 \dots 0,4$ , considerando la fiabilidad del equipo adoptamos como:  $n = 250$  rev/min y  $s = 0,2$  mm/rev. Sustituyendo en la ecuación (2.2), entonces:

$$V_c = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 250}{1000} = 7,85 \text{ mm/min}$$

La velocidad de corte que se empleará durante el proceso está en correspondencia con la establecida para el maquinado de acero de medio contenido de carbono, se puede obtener un corte rápido, además evitará el deterioro de la herramienta cortante.

### 3.3.2. Análisis de la profundidad de corte

Para una barra de acero con diámetro igual a 10 mm al cual al que realizar una operación de trozado y según la ecuación (2.2), la profundidad sería:

$$t = 10 \text{ mm}$$

La profundidad de corte a desbaste es 10 mm, si se tiene en cuenta la herramienta cortante seleccionada, cuchilla del tipo SANVIDK, admite emplear mayores parámetros de profundidad, además en pequeñas profundidades de corte existe menor calentamiento de la herramienta cortante y permite mejor acabado en la superficie del material, estas muestras van a ser sometidas a ensayos de pulido, se necesita de una superficie mayormente pulida para de esta forma evitar los concentradores de tensión que se forman en forma de cuello o espiral producto del mismo proceso de maquinado.

### 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:

$$T_m = \frac{10}{250 \cdot 0,2} \cdot 1 = 0,2 \text{ min}$$

Este resultado es solo para una probeta y como se prepararán 10 probetas para el análisis microestructural, entonces el tiempo total sería 20 min, sin considerar los gastos del tiempo tecnológico.

### 3.4. Análisis de la velocidad de deformación

El endurecimiento por deformación plástica superficial con rodillo en probetas de acero AISI 1045 se hace atendiendo al diseño de experimento con las variables (n); (S) y (P), por tanto se empleará para la velocidad de deformación la misma ecuación que se utiliza para los regímenes de corte.

### 3.5. Determinación de las tensiones en las probetas ensayadas

El cálculo de los esfuerzos se realiza según la metodología de cálculo establecida en el capítulo 2, para las probetas ensayadas después de ser deformada plásticamente con rodillo. En las tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 aparecen los resultados de

las nueve probetas sometidas a esfuerzo de torsión y las figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 las curvas obtenidas en correspondencia con las variables n; P; S.

Tabla 3.1. Resultados de la probeta 1a

Number	Tb	tb	ts	tsu	tsl	tp <sub>0,015</sub>	tp <sub>0,3</sub>
	N.m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>				
1b	134,8	515,8	400,4	438,2	400,4	155,5	197,6
Average	134,8	515,8	400,4	438,2	400,4	155,5	197,6
Maximum	134,8	515,8	400,4	438,2	400,4	155,5	197,6
Minimum	134,8	515,8	400,4	438,2	400,4	155,5	197,6
Median	134,8	515,8	400,4	438,2	400,4	155,5	197,6
Number	Φ máx	lp	W	Ts	Tsu	Tsl	
	deg	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	N.m	N.m	N.m	
1b	2,08	1437,4	261,3	104,7	114,5	104,7	
Average	2,08	1437,4	261,3	104,7	114,5	104,7	
Maximum	2,08	1437,4	261,3	104,7	114,5	104,7	
Minimum	2,08	1437,4	261,3	104,7	114,5	104,7	
Median	2,08	1437,4	261,3	104,7	114,5	104,7	

Tabla 3.2. Resultados de la probeta 1b

Number	Tb	tb	ts	tsu	tsl	tp 0,015	tp 0,3
	N.m	N/mm <sup>2</sup>					
1c	139,7	534,4	512,1	512,1	512,1	168,3	195,1
Average	525,1	456,3	475,2	456,3	161,9	196,3	525,1
Std.Dev.	13,14	78,99	52,29	78,99	9,05	1,77	13,14
% COV	0,03	0,17	0,11	0,17	0,06	0,01	0,03
Maximum	534,4	512,1	512,1	512,1	168,3	197,6	534,4
Minimum	515,8	400,4	438,2	400,4	155,5	195,1	515,8
Median	534,4	512,1	512,1	512,1	168,3	195,1	534,4
Number	Φ máx	lp	W	Ts	Tsu	Tsl	
	deg	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	N.m	N.m	N.m	
1c	2,08	1437,4	261,3	104,7	114,5	104,7	
Average	0,62	1437,4	261,3	119,2	124,2	119,2	
Std.Dev.	2,06	0,00	0,00	20,64	13,67	20,64	
% COV	3,32	0,00	0,00	0,17	0,11	0,17	
Maximum	2,08	1437,4	261,3	133,8	133,8	133,8	
Minimum	-0,84	1437,4	261,3	104,7	114,5	104,7	
Median	-0,84	1437,4	261,3	133,8	133,8	133,8	

Tabla 3.3. Resultados de la probeta 1c

Number	Tb N.m	tb N/mm <sup>2</sup>	ts N/mm <sup>2</sup>	tsu N/mm <sup>2</sup>	tp <sub>0,015</sub> N/mm <sup>2</sup>	tp <sub>0,3</sub> N/mm <sup>2</sup>
2c	167,6	641,5	472,8	472,8	208,7	431,0
Average	165,8	634,4	446,6	446,6	104,3	313,8
Std.Dev.	2,59	9,92	37,12	37,12	147,6	165,8
Maximum	167,6	641,5	472,8	472,8	208,7	431,0
Minimum	164,0	627,4	420,3	420,3	0,00	196,5
Median	167,6	641,5	472,8	472,8	208,7	431,0
Number	Φ máx	lp	W	Ts	Tsu	
	deg	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	N.m	N.m	
2c	510,4	1437,4	261,3	109,8	109,8	
Average	353,5	1437,4	261,3	116,7	116,7	
Maximum	510,4	1437,4	261,3	123,6	123,6	
Minimum	196,7	1437,4	261,3	109,8	109,8	
Median	196,7	1437,4	261,3	123,6	123,6	

Tabla 3.4. Resultados de la probeta 2a

Number	Tb N.m	tb N/mm <sup>2</sup>	ts N/mm <sup>2</sup>	tsu N/mm <sup>2</sup>	tp <sub>0,015</sub> N/mm <sup>2</sup>	tp <sub>0,3</sub> N/mm <sup>2</sup>
2a	145,8	557,8	384,4	384,4	169,3	190,8
Average	72,89	557,8	384,4	384,4	169,3	190,8
Maximum	145,8	557,8	384,4	384,4	169,3	190,8
Minimum	0,00	557,8	384,4	384,4	169,3	190,8
Median	145,8	557,8	384,4	384,4	169,3	190,8
Number	Φ máx <sup>0</sup>	lp mm <sup>4</sup>	W mm <sup>3</sup>	Ts N.m	Tsu N.m	
2a	441,2	1437,4	261,3	100,5	100,5	
Average	441,2	1437,4	261,3	100,5	100,5	
Maximum	441,2	1437,4	261,3	100,5	100,5	
Minimum	441,2	1437,4	261,3	100,5	100,5	
Median	441,2	1437,4	261,3	100,5	100,5	

Tabla 3.5. Resultados de la probeta 2b

Number	Tb	tb	ts	tsu	tsl	tp <sub>0,015</sub>	tp <sub>0,3</sub>
	N.m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>				
3b	149,8	573,4	401,1	401,1	0,00	0,00	209,2
Average	149,8	573,4	401,1	401,1	0,00	0,00	209,2
Maximum	149,8	573,4	401,1	401,1	0,00	0,00	209,2
Minimum	149,8	573,4	401,1	401,1	0,00	0,00	209,2
Median	149,8	573,4	401,1	401,1	0,00	0,00	209,2
Number	Φ máx	lp	W	Ts	Tsu	Tsl	
	deg	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	N.m	N.m	N.m	
3b	238,8	1437,4	261,3	104,8	104,8	0,00	
Average	238,8	1437,4	261,3	104,8	104,8	0,00	
Maximum	238,8	1437,4	261,3	104,8	104,8	0,00	
Minimum	238,8	1437,4	261,3	104,8	104,8	0,00	
Median	238,8	1437,4	261,3	104,8	104,8	0,00	

Tabla 3.6. Resultados de la probeta 2c

Number	Tb	tb	TS	TSU	tsl	tp 0,015	tp 0,3
	N.m	N/mm <sup>2</sup>					
3c	170,3	651,7	460,0	460,0	0,00	204,6	411,7
Average	160,1	612,5	430,6	430,6	0,00	102,3	310,4
Std.Dev.	14,48	55,41	41,62	41,62	0,00	144,7	143,2
% COV	0,09	0,09	0,10	0,10	0,00	1,41	0,46
Maximum	170,3	651,7	460,0	460,0	0,00	204,6	411,7
Minimum	149,8	573,4	401,1	401,1	0,00	0,00	209,2
Median	170,3	651,7	460,0	460,0	0,00	204,6	411,7
Number	Φ máx	lp	W	Ts	Tsu	Tsl	
	deg	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	N.m	N.m	N.m	
3c	311,2	1437,4	261,3	120,2	120,2	0,00	
Average	275,0	1437,4	261,3	112,5	112,5	0,00	
Maximum	311,2	1437,4	261,3	120,2	120,2	0,00	
Minimum	238,8	1437,4	261,3	104,8	104,8	0,00	
Median	311,2	1437,4	261,3	120,2	120,2	0,00	

Tabla 3.7. Resultados de la probeta 3a

Number	Tb	tb	TS	TSU	tsl	tp 0,3
	N.m	N/mm <sup>2</sup>				
3a	11 499,1	588,6	426,6	426,6	0,00	208,5
Average	5826,5	323,6	426,6	426,6	0,00	104,2
Std.Dev.	8022,3	374,8	0,00	0,00	0,00	147,4
% COV	1,38	1,16	0,00	0,00	0,00	1,41
Maximum	114,99,1	588,6	426,6	426,6	0,00	208,5
Minimum	153,8	58,56	426,6	426,6	0,00	0,00
Median	153,8	588,6	426,6	426,6	0,00	208,5
Number	Φ máx	lp	W	Ts	Tsu	
	deg	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	N.m	N.m	
3a	204,6	1437,4	261,3	111,5	111,5	
Average	204,6	1437,4	261,3	111,5	111,5	
Maximum	204,6	1437,4	261,3	111,5	111,5	
Minimum	204,6	1437,4	261,3	111,5	111,5	
Median	204,6	1437,4	261,3	111,5	111,5	

Tabla 3.8. Resultados de la probeta 3b

Number	Tb (N.m)	tb N/mm <sup>2</sup>	ts N/mm <sup>2</sup>	tsu N/mm <sup>2</sup>	tp 0,3 N/mm <sup>2</sup>
2b	164,0	627,4	420,3	420,3	196,5
Average	164,0	627,4	420,3	420,3	196,5
Maximum	164,0	627,4	420,3	420,3	196,5
Minimum	164,0	627,4	420,3	420,3	196,5
Median	164,0	627,4	420,3	420,3	196,5
Number	Φ máx <sup>0</sup>	lp mm <sup>4</sup>	W mm <sup>3</sup>	Ts N.m	Tsu N.m
2b	510,4	1437,4	261,3	109,8	109,8
Average	510,4	1437,4	261,3	109,8	109,8
Maximum	510,4	1437,4	261,3	109,8	109,8
Minimum	510,4	1437,4	261,3	109,8	109,8
Median	510,4	1437,4	261,3	109,8	109,8

Tabla 3.9. Resultados de la probeta 3c

Number	Tb N.m	$\tau_b$ N/mm <sup>2</sup>	$\tau_s$ N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{su}$ N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{p_{0,3}}$ N/mm <sup>2</sup>
1	178,772	684,056	392,156	392,156	223,148
Average	178,772	684,056	392,156	392,156	223,148
Std.Dev.	178,772	684,056	392,156	392,156	223,148
% COV	178,772	684,056	392,156	392,156	223,148
Maximum	178,772	684,056	392,156	392,156	223,148
Minimum	178,772	684,056	392,156	392,156	223,148
Median	178,772	684,056	392,156	392,156	223,148
Number	$\Phi$ máx <sup>0</sup>	$I_p$ mm <sup>4</sup>	W mm <sup>3</sup>	Ts N.m	Tsu N.m
Average	220,409	1437,37	261,341	102,486	102,486
Std.Dev.	220,409	1437,37	261,341	102,486	102,486
% COV	220,409	1437,37	261,341	102,486	102,486
Maximum	220,409	1437,37	261,341	102,486	102,486
Minimum	220,409	1437,37	261,341	102,486	102,486
Median	220,409	1437,37	261,341	102,486	102,486

### 3.5.1. Análisis microestructural en relación a las tensiones para 500 N

Para establecer el comportamiento microestructural, se tuvo en cuenta el diseño de experimentos establecido en el capítulo 2, epígrafe 2.9. En la figura 3.1 aparece la tensión de la primera probeta 1a, deformada y sometida a torsión y su comportamiento microestructural.

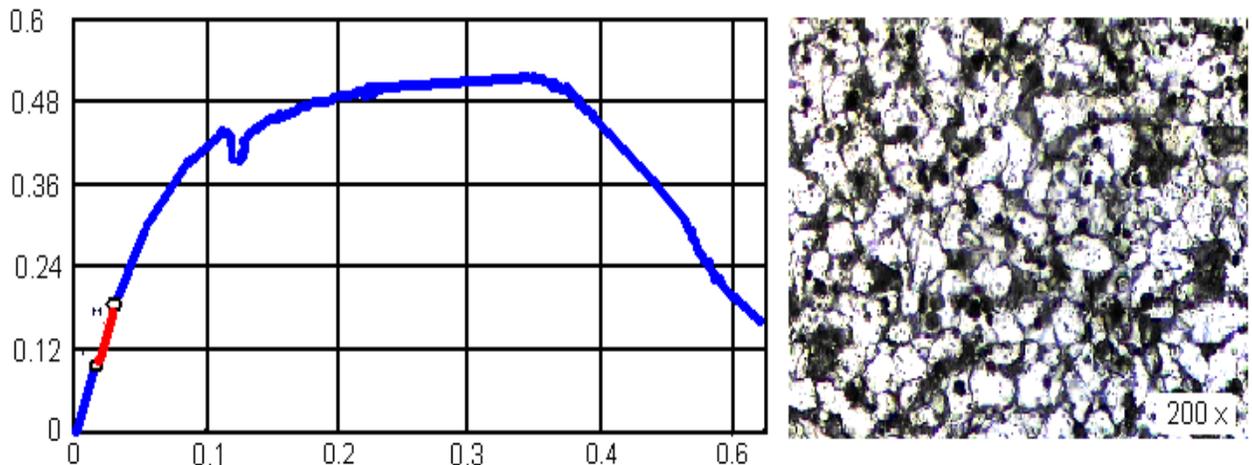


Figura 3.1. Deformada con fuerza de 500 N, S de 0,075 mm/rev y n de 27 rev/min.

La figura 3.1 fue deformada con fuerza de 500 N, avance de 0,075 mm/rev y con un número de revoluciones de 27 rev/min y con una fuerza de torsión de 515,8 N/mm<sup>2</sup>.

Al comparar las microestructuras del capítulo 2, epígrafe 2.7, se puede apreciar una disminución en el tamaño del grano, pero a la vez una distorsión de la red cristalina en la dirección que se produjo el esfuerzo.

La figura 3.2 se relaciona con la muestra 1b, deformada con una fuerza de 500 N, un avance de 0,125 mm/rev y un número de revoluciones de 54 rev/min.

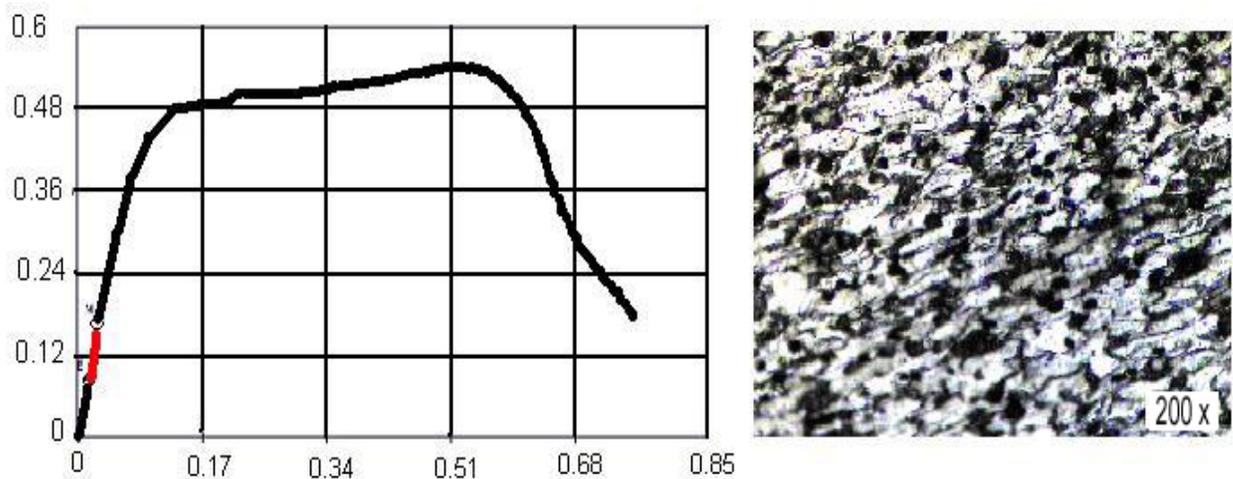


Figura 3.2. Deformada con fuerza de 500 N, S de 0,125 mm/rev y n de 54 rev/min.

Al existir mayor deformación, hay una agrupación de granos más ordenada, la fuerza de torsión empleada para lograr la rotura en esta probeta fue de 534,4 N/mm<sup>2</sup>.

La figura 3.3 se relaciona con la muestra 1c, deformada con fuerza de 500 N, avance de 0,25 mm/rev y número de revoluciones de 110 rev/min.

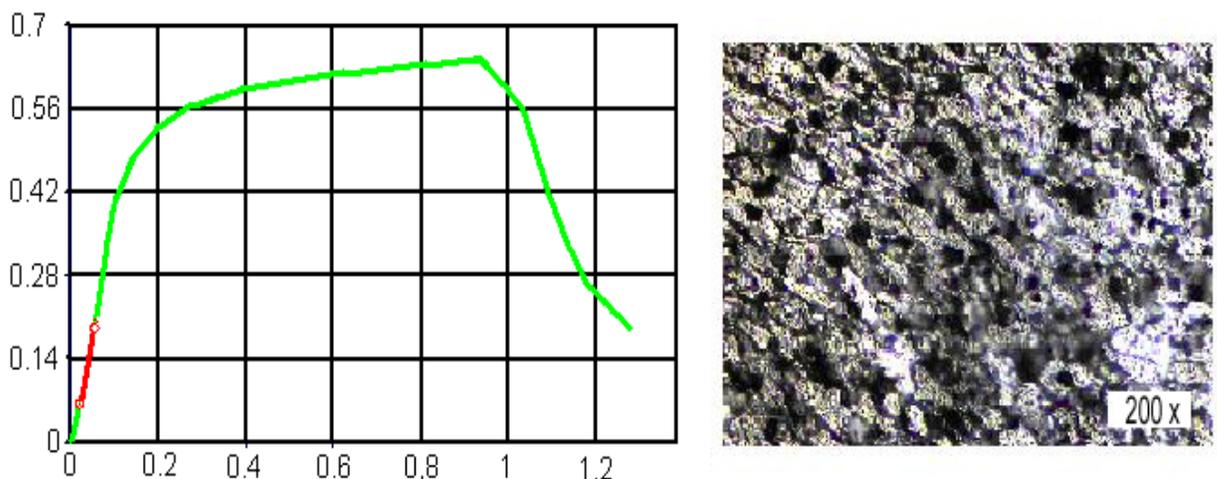


Figura 3.3. Deformada con fuerza de 500 N, S de 0,25 mm/rev y n de 110 rev/min.

La fuerza máxima de torsión aplicada a la muestra obtenida con mayor deformación fue de 641,5 N/mm<sup>2</sup>, aquí se aprecia una deformación clara de la red cristalina y una orientación más definida del grano en una dirección.

Al comenzar el proceso, se observa en la figuras 3.1, 3.2 y 3.3 la deformación de la red cristalina del material con el alargamiento de los granos. La capa endurecida ofrece resistencia al ser torcionada, para una menor deformación se requiere de una fuerza de torsión de  $515,8 \text{ N/mm}^2$ , lo cual se va incrementando hasta  $641,5 \text{ N/mm}^2$  para la muestra con mayores valores introducidos, al introducir valores de fuerza externo en el material el mismo se va tensionando y apareciendo el fenómeno de acritud.

En las muestras observadas, desde la 3.1 hasta la figura 3.3, se presenta una microestructura formada por ferrita y perlita. Se han obtenido tamaño de grano desde el número 6 (muestra patrón) hasta el número 7 (muestra 3.3). Las texturas cristalográficas 3.1; 3.2 y 3.3, en relación a la textura inicial, presentan un reordenamiento de la cristalita, donde se aprecia una agrupación ordenadas de los granos en la dirección de la tensión aplicada. Para las figuras 3.2 y 3.3, presentan mayor alargamiento, inducido por el incremento del avance de la herramienta y el momento torsor a la que fueron sometidas, lo que modifica la dimensión de la deformación en el límite del material.

### 3.5.2. Análisis de regresión lineal

En el análisis de regresión, calcula para cada punto el cuadrado de la diferencia entre el valor Y estimado para ese punto y su valor Y real. La suma de estas diferencias cuadradas se denomina suma de los cuadrados residual.

Para determinar el comportamiento obtenido del análisis de regresión lineal, se empleó el software Statgraphics Plus V 5.1. En la tabla 3.10 se muestran los resultados del análisis.

Tabla 3.10. Análisis de regresión

Modelo	15273,3	1	15273,3	0,05	0,2080
Residuo	1753,65	1	1753,65		
Total (Corr.)	17027,0	2			
R-cuadrado = 89,7008 porcentaje					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 79,4016 porcentaje					
Error estándar de est. = 41,8766					
Error absoluto medio = 22,6899					
Estadístico de Durbin-Watson = 2,98165					
Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,66055					

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la deformación y la fuerza de torsión variables independientes.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Fuerza de torsión} = 321,974 + 289,954 \cdot \text{Deformación} \quad (3.1)$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0,05; existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 90% o superior.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 89,7008% de la variabilidad en la fuerza de torsión. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 79,4016 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 41,8766. El error absoluto medio (MAE) de 22,6899 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

### 3.5.3. Análisis microestructural en relación a las tensiones para 1 500 N

En la figura 3.4 se aprecia el comportamiento microestructural de la probeta 2a deformado con fuerza de 1 500 N, S de 0,075 mm/rev y números de revoluciones de 27 rev/min, la fuerza de torque empleada fue de 557,8 N/mm<sup>2</sup>.

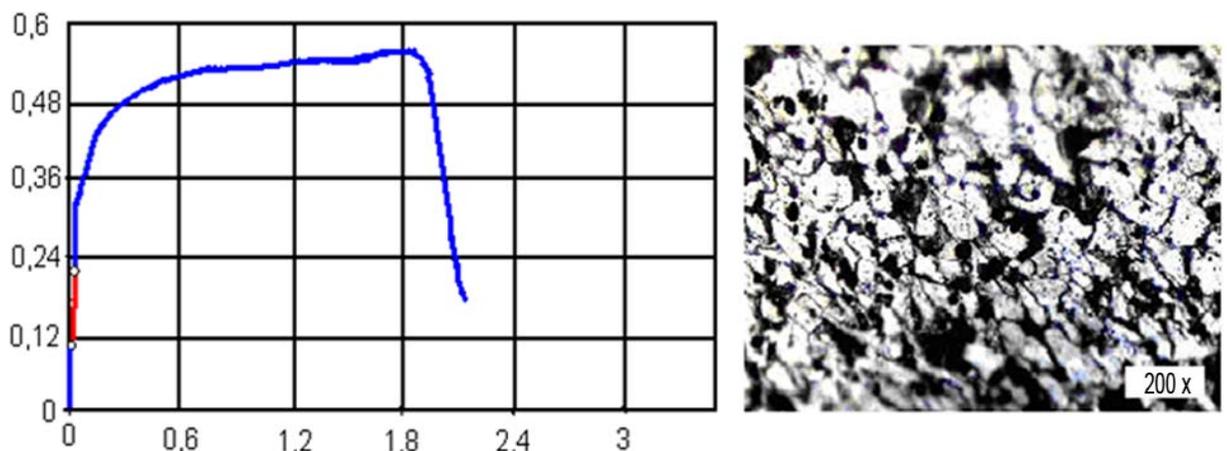


Figura 3.4. Deformada con fuerza de 1 500 N, S de 0,075 mm/rev y n de 27 rev/min.

Al incrementar la fuerza, se aprecia que se mantiene la misma estructura cristalina de ferrita – perlita, pero con cambios en el tamaño de los granos.

La figura 3.5 se corresponde con la muestra 2b, deformada con fuerza de 1 500 N, S de 0,125 mm/rev y números de revoluciones de 54, la fuerza del torque fue de 573,4 N/mm<sup>2</sup>.

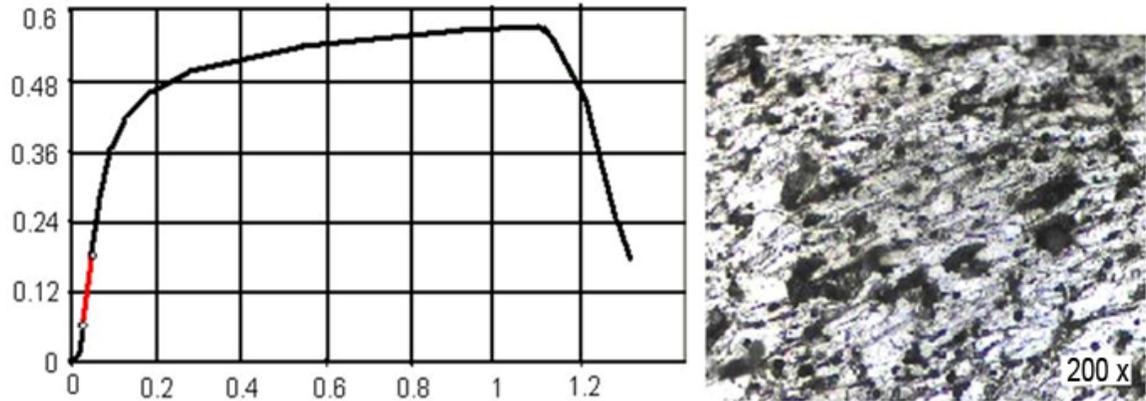


Figura 3.5. Deformada con fuerza de 1 500 N, S de 0,125 mm/rev y n de 54 rev/min.

La figura 3.6 se relaciona con la muestra 2c, deformada con fuerza de 1 500 N, avance de 0,25 mm/rev y número de revoluciones de 110 rev/min y una fuerza de torsión de 651,7 N/mm<sup>2</sup>.

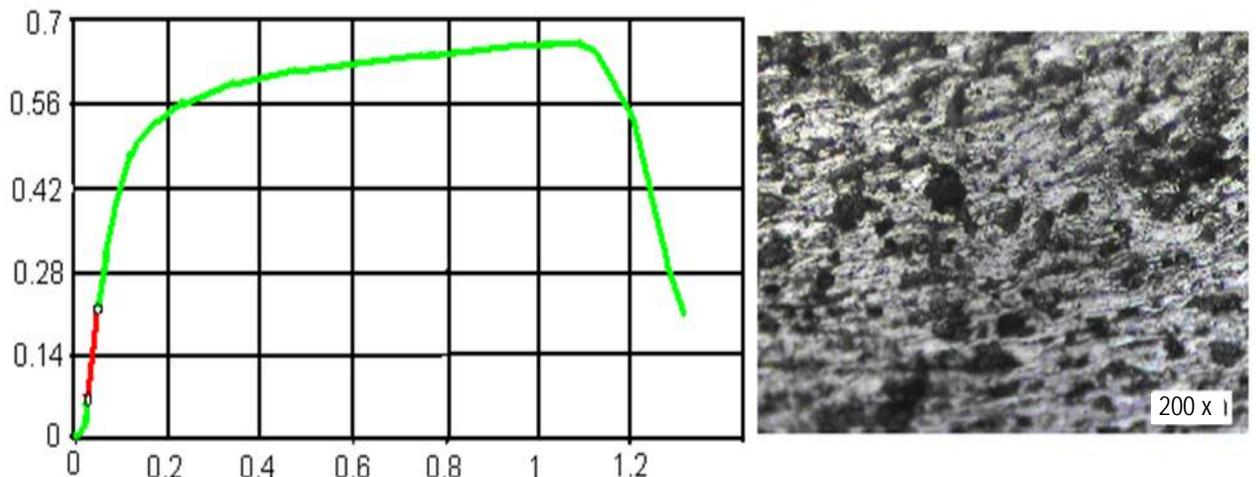


Figura 3.6. Deformada con fuerza de 1 500 N, S de 0,25 mm/rev y n de 110 rev/min.

En este nivel se puede apreciar una mayor agrupación de los granos (número 8) en la estructura en relación con las figuras 3.1, 3.2 y 3.3. Para las figuras 3.5, 3.6 y 3.7, el efecto de las texturas es más relevante en las proximidades de la zona correspondiente a la deformación, se alcanza para la muestra 3.7 un tamaño de grano número 9.

### 3.5.4. Análisis de regresión lineal

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la fuerza de torsión y la deformación. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Fuerza de torsión} = 674,1 - 27,1667 \cdot \text{Deformación} \quad (3.2)$$

En la tabla 3.11 aparece el resumen del análisis.

Tabla 3.11. Análisis de Regresión Múltiple

Variable dependiente: Fuerza de torsión					
Error Estadístico					
Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
CONSTANTE	674,1	85,2422	7,90805	0,0801	
Deformación	-27,1667	33,4863	- 0,811277	0,5661	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	1594,14	1	1594,14	0,66	0,5661
Residuo	2422,08	1	2422,08		
Total (Corr.)	4016,22	2			
R-cuadrado = 90,6925 porcentaje					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 90,056 porcentaje					
Error estándar de est. = 49,2146					
Error absoluto medio = 23,2					
Estadístico de Durbin-Watson = 2,5					
Autocorrelación residual en Lag 1 = - 0,5					

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es menor de 0,10, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 90% o superior.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 90,6925% de la variabilidad en fuerza de torsión. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 90,056 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 49,2146. El error absoluto medio (MAE) de 23,2 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

### 3.5.5. Análisis microestructural en relación a las tensiones para 2 500 N

La figura 3.7 muestra el comportamiento microestructural con relación a las tensiones para la muestra 3a la cual fue deformada con fuerza de 2 500 N, S de 0,075 mm/rev y número de revoluciones de 27 rev/min, la fuerza máxima de torsión necesaria para llegar a la rotura de la muestra fue de 588,6 N/mm<sup>2</sup>.

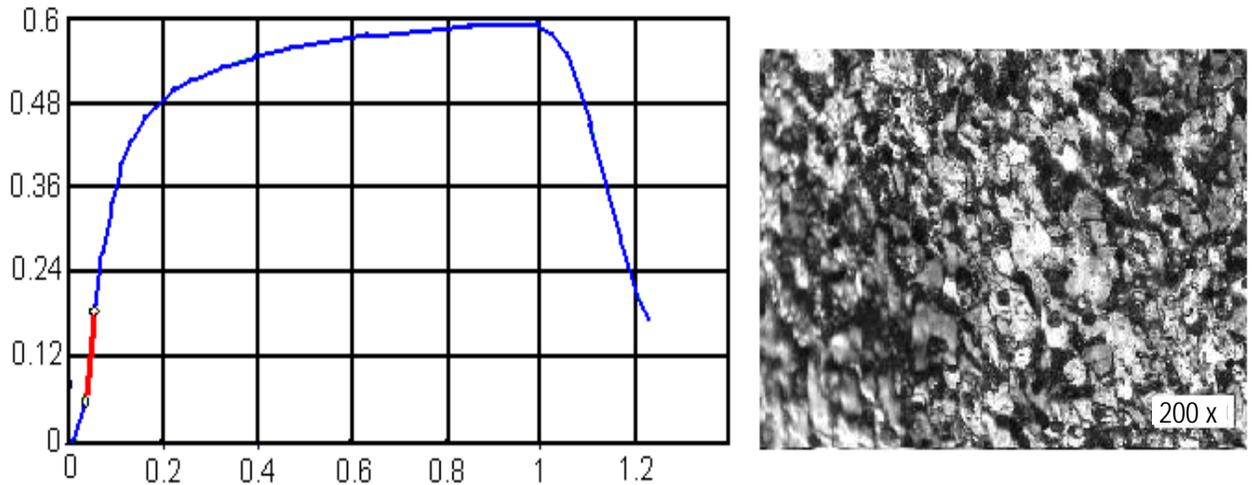


Figura 3.7. Deformada con fuerza de 2 500 N, S de 0,075 mm/rev y n de 27 rev/min.

La figura 3.8 es la probeta 3b que fue deformada con fuerza de 2 500 N, S de 0,125 mm/rev y número de revoluciones de 54 rev/min, la fuerza de torsión fue de 627,4 N/mm<sup>2</sup>.

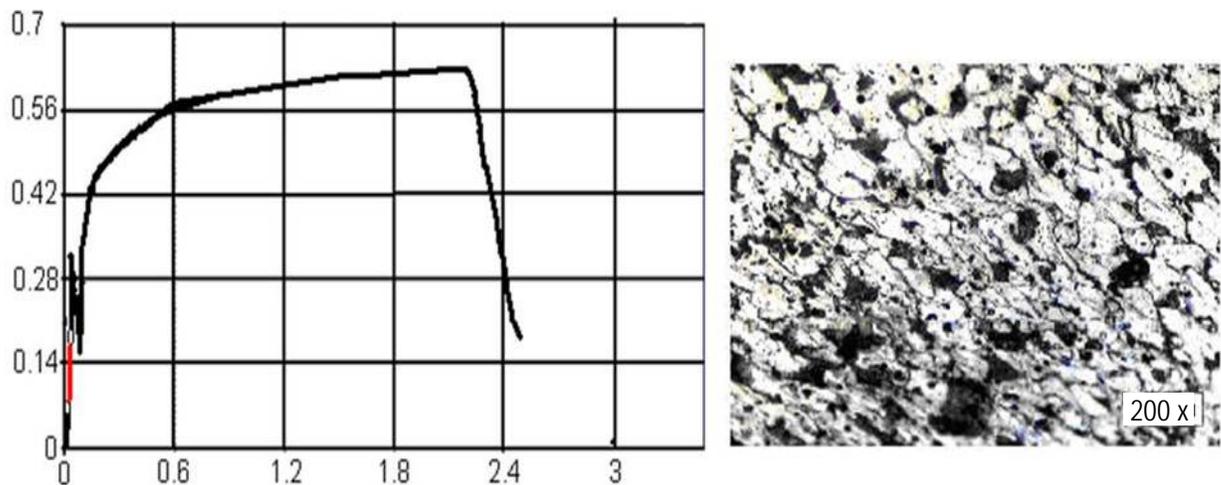


Figura 3.8. Deformada con fuerza de 2 500 N, S de 0,125 mm/rev y n de 54 rev/min.

La figura 3.9 relaciona el comportamiento de la muestra 3c que fue deformada con fuerza de 2 500 N, S de 0,25 mm/rev y número de revoluciones de 110 rev/min, la fuerza de torsión empleada fue de 684,056 N/mm<sup>2</sup>.

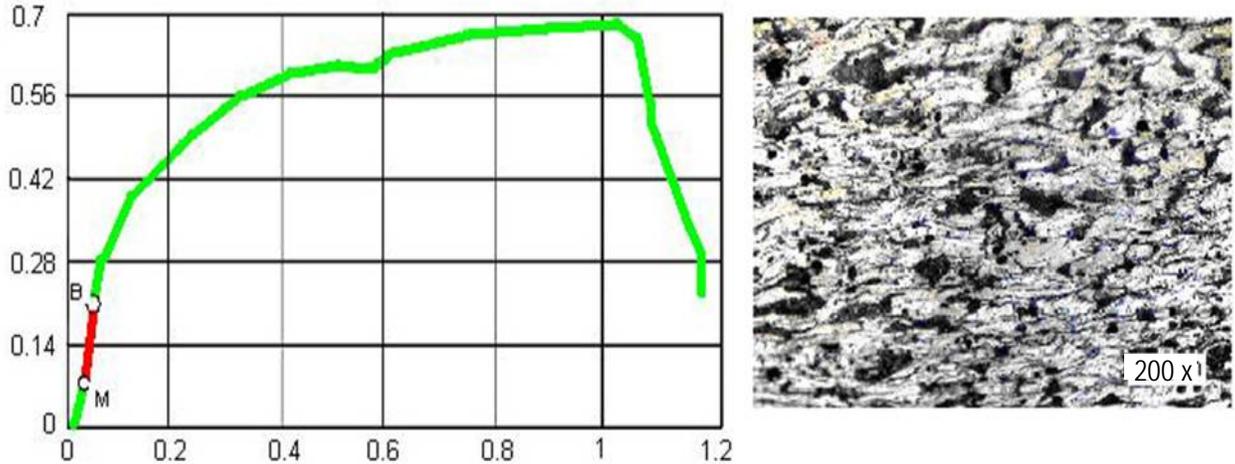


Figura 3.9. Deformada con fuerza de 2 500 N, S de 0,25 mm/rev y n de 110 rev/min.

Para la máxima magnitud de fuerza, se observa una mayor disminución del grano (del número 5 para la muestra patrón hasta el número 10 para la muestra 3.9), las muestras siguen manteniendo la misma composición física lo que fue planteado por Fernández (2011).

Con fuerza de 500 N (figuras 3.1, 3.2 y 3.3), la red cristalina comienza a deformarse con el alargamiento de los granos y con la agrupación del enrejado cristalino, la aleación comienza a adquirir dureza producto de las tensiones de compresión generadas por el rodillo, según ha sido reportado por Fernández *et al.* (2008a; 2008b y 2008c y Fernández, 2011).

Para fuerza de 1 500 N (figuras 3.4, 3.5 y 3.6), con el incremento de las variables hay una mayor compactación de los granos en la red cristalina, la estructura se comporta con granos más homogéneos; en la medida que se introduce más deformación, hay una reducción del tamaño promedio de los mismos, creándose las condiciones para provocar las dislocaciones, las cuales son las causantes de la deformación del material en frío.

Con fuerza de 2 500 N y número de revoluciones de 110 rev/min (figuras 3.7, 3.8 y 3.9), se logra una estructura con mayor agrupación de los granos, motivado por el

incremento de las variables fuerza, avance de la herramienta y número de revoluciones, según fue planteado por Fernández *et al.* (2008a; 2008b y 2008c).

En las probetas sometidas a deformación, se observa una estructura bifásica de ferrita – perlita, donde existe una agrupación orientada de los granos en la superficie, los límites de los granos se hacen más finos (desde el número 5 para la muestra patrón, hasta el número 10, para la muestra deformada con fuerza de 2 500 N), con estructura en bloque de mosaico, dividida en pequeñas proporciones y una deformación clara de la red cristalina.

### 3.5.6. Análisis de regresión lineal

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la fuerza de torsión y la deformación. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Fuerza de deformación} = 1181,15 - 467,5 \cdot \text{deformación} \quad (3.3)$$

En la tabla 3.12 aparece el resumen del análisis.

Tabla 3.12. Análisis de Regresión Múltiple

Variable dependiente: Deformación					
Error Estadístico					
Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
CONSTANTE	1181,15	674,462	1,75125	0,3303	
Deformación	- 467,5	546,462	- 0,855503	0,5495	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	1457,04	1	1457,04	0,73	0,5495
Residuo	1990,81	1	1990,81		
Total (Corr.)	3447,85	2			
R-cuadrado = 92,2595 porcentaje					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 90,0 porcentaje					
Error estándar de est. = 44,6184					
Error absoluto medio = 21,0333					
Estadístico de Durbin-Watson = 1,0					
Autocorrelación residual en Lag 1 = 0,0					

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es menor a 0,10, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 90% o superior.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 92,2595 % de la variabilidad en la fuerza de torsión. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 90,0 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 44,6184. El error absoluto medio (MAE) de 21,0333 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero.

### **3.6. Análisis de las tensiones de resistencia a la torsión 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, según muestran los resultados de las diferentes tablas y figuras, demostrando que en condiciones de aplicación de cargas entre 500 y 2 500N se endurece la superficie por acritud, por lo que se considera un incremento de la dureza en cada una de ellas.

También se ha aumentado en todas las propiedades mecánicas si comparamos los resultados para cada uno de los parámetros establecidos en la experimentación. 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 más perlita de la probeta.

Se puede decir que ocurre un cambio en la superficie principalmente por el fenómeno de las dislocaciones, fundamentalmente por estar sometidas a dos esfuerzos simultáneo, comprensión y torsión, 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.

### **3.7. Determinación de la tensión de rotura en las probetas endurecidas**

Para este cálculo utilizamos también los valores de la tabla 2.4, junto con el esfuerzo de rotura. Este se nota en la máquina de torsión por el decrecimiento del esfuerzo, el cual está observado por punto de rotura en cada una de las muestras, ya que a partir de ahí este cae aceleradamente.

La estricción es la responsable del descenso de la curva de torsión, 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.

Los resultados obtenidos anteriormente de las tensiones límites de resistencia a la torsión y las tensiones de rotura, describen el comportamiento de la curva de torsión del acero AISI 1045 endurecido plásticamente con rodillo.

### **3.8. Análisis del comportamiento de las curvas de las probetas ensayadas**

Como se puede observar al graficar el comportamiento de las 9 probetas endurecidas por deformación plástica superficial por rodadura, fabricadas de acero AISI 1045, muestran todo un aumento de la tensión.

También se aprecia que en la medida que se incrementa el parámetro (fuerza) aumenta el endurecimiento de la capa superficial de la probeta y se incrementa la dureza de las mismas, es por eso que disminuye el por ciento de alargamiento y se comportan menos elásticas, experimentando una tensión de rotura mas alta que la normal. Esto demuestra que el método de deformación plástica superficial por rodillo es una variante tecnológica que se puede emplear para el endurecimiento de aceros de piezas simétricas rotativas.

Los bordes de los granos son una barrera para el desplazamiento de las dislocaciones (Callister; 1999, Guliáev; 1983 y Buraya, 2001). Al reducirse el tamaño del grano, aumenta el número de barreras que frenan el desplazamiento de las dislocaciones; se debe a que el desorden atómico existente en el borde del grano traerá como resultado una discontinuidad de los planos de deslizamiento de un grano a otro. Es decir, la reducción del tamaño del grano ferrítico lo hace más duro y más resistente debido a que aumenta el área total de fronteras del grano, que impiden el movimiento de las dislocaciones (Alfonso, 2002).

### 3.9. Análisis de la microdureza

En correspondencia con la distribución de las probetas deformadas y la tabla establecida en el capítulo 2 epígrafe 2.9, la distribución de las medidas de microdurezas realizadas (tres) por cada muestra, estos resultados se recogen en la tabla 3.13.

Tabla 3.13. Mediciones de microdureza.

Número de ensayo	Salidas			Media
	HV1	HV2	HV3	HV
1a	205	210	224	213
1b	205	210	225	213
1c	204	216	224	214
2a	316	324	328	322
2b	314	326	326	322
2c	312	324	326	320
3a	416	418	427	420
3b	416	418	430	421
3c	414	448	432	431

Los resultados obtenidos en la microdureza guardan relación con el comportamiento microestructural, se puede observar que en la medidas que fueron introducidas las variables Fuerza (P), avance (S) y número de revolución (n), y esta fue incrementándose, los granos del material se fueron deformando y apilándose dando lugar a que la superficie del material se endureciera, la dureza fue incrementando de 205 hasta 448 HV.

El endurecimiento del material no ocurre por el cambio de fase, en el diagrama hierro carbono, para un acero de red cúbica centrada en el cuerpo (BCC) como el acero AISI 1045 de medio contenido de carbono, presenta buenos planos de deslizamiento, puede endurecer en frío o en caliente.

Cuando endurece en caliente se requiere elevar la temperatura por encima de  $727^{\circ}\text{C}$  y enfriarlo en agua o aceite, obteniéndose en su estructura martensita, no hay presencia de acritud, ya que esta es una actitud que presentan los aceros de adquirir dureza en frío, como es el caso de la estructuras obtenidas.

Se puede plantear que el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 está motivado por dos causas:

1. Al ser sometida al proceso de deformación superficial por rodillo, que provoca la acritud por tensiones de compresión.
2. Al ser torsionada, que provoca la aparición de acritud motivo a las tensiones de torsión.

### 3.10. Valoración económica del proceso de endurecimiento

El proceso de Deformación Plástica Superficial por rodadura, como alternativa tecnológica para la dureza superficial de las piezas, y a partir de las ventajas de este tratamiento establecidas, se parte del hecho de que el mismo es altamente beneficioso para mejorar la calidad superficial de las piezas en forma integral, porque mejora la rugosidad superficial y las cualidades físico mecánicas de la superficie.

Todo ello sin dudas repercute económicamente durante el proceso de explotación de las piezas así tratadas, al incrementar su durabilidad por tener mayor resistencia al desgaste y a la corrosión, aumenta su fiabilidad por tener mayor resistencia a la rotura por incremento de la resistencia de las piezas y mayor resistencia a la fatiga, lo que condiciona un funcionamiento más eficiente de la maquinaria en general.

En la tabla 3.14 aparece la valoración económica de la determinación del comportamiento microestructural de las muestras sometidas a ensayos de torsión.

Tabla 3.14 Costo del comportamiento microestructural de muestras torsionadas.

Por concepto de Tiempo				Por concepto de consumo				
Operario	Tarifa (\$/h)	Tiempo (h)	Costo $T_i$ (\$)	Cantidad de equipos	Consumo (kW/h)	Tarifa (\$/kW)	Tiempo (h)	Costo $C_o$ (\$)
Tecnólogo	2,34	0,16	0,37	4 - lámparas 1 - Computadora 2 - Aire acondic	0,16 0,25 2,24	0,09	0,16	1,44
Téc laborat	1,78	6	10,68	1. Microscopio 1. Pulidora	0,25 1,45	0,09 0,30	6,5	2,5
Costo total			$C_T = \text{Costo}_{T_i} + \text{Costo}_{C_o}$ $C_T = \$ 13,18$					

Una vez calculados los tiempos para determinar el comportamiento microestructural del acero AISI 1045 luego de ser sometido a ensayo de torsión, el mismo incurre en un costo de 13,18 CUP.

### 3.11. Valoración del impacto medio ambiental

La capacidad del hombre para modificar sus relaciones con el medio ambiente natural, social y cultural, incluso para transformarlas ha atravesado diferentes etapas. Lo que distingue a la sociedad contemporánea de las que le han precedido, es la rapidez en la modificación de su entorno provocada por la revolución científico técnica, su carácter masivo y la universalidad de algunas de sus consecuencias encontramos las nuevas tecnologías inmersas en la vida cotidiana, en el desenvolvimiento de las instituciones tanto productoras de bienes como de servicios, y también cada vez más se van incorporando en el desempeño individual de los diferentes segmentos de la sociedad.

En la actualidad, son muchos los países que por constituirse en "sociedades informatizadas", han incorporado las nuevas tecnologías sin distinguir las condiciones sociales, culturales e históricas de las realidades de cada país.

Coinciden en el reconocimiento del impacto social de las nuevas tecnologías especialmente de la información y comunicación, los canadienses Harold A. Innis y Marshall McLuhan citados por Iglesias (1998), donde plantean que entre los diferentes tipos de tecnologías sea militar, administrativa, industrial, el de la comunicación es el de mayor impacto social.

El desarrollo tecnológico como proceso social, se percibe como un proceso dinámico que se desarrolla en correspondencia con los intereses de las clases que ostentan el poder y que expresan su sistema de valores.

La ciencia y la tecnología se han vuelto determinantes del desarrollo económico y cultural de las sociedades actuales, y de ellas depende en forma creciente el bienestar de un país y de sus ciudadanos. Hoy más que nunca la ciencia y la tecnología están produciendo impactos positivos y negativos en la sociedad y en el ambiente, al tiempo que constituyen uno de los principales recursos para la solución de problemas. A la vez, para su desarrollo dependen de que las sociedades inviertan en ellas sumas considerables de fondos públicos y privados.

Estos procesos han dado lugar a un modelo de sociedad que ha venido imponiéndose en las últimas décadas: la llamada "sociedad del conocimiento", donde la generación de



riqueza estaría principalmente basada en el control y el desarrollo de nuevas formas de producción y aprovechamiento del conocimiento.

Uno de los principios rectores de la sociedad del conocimiento es que la ciencia y la tecnología son indispensables para lograr las condiciones materiales, ambientales, sociales y culturales, necesarias para garantizar el bienestar, una vida digna y una organización social justa para las presentes y futuras generaciones. Pero el fortalecimiento y el desarrollo de la ciencia y la tecnología por sí solos no son suficientes, es necesario articular estos sistemas con el resto de la sociedad con el fin de que puedan atenderse los problemas tal y como son percibidos y definidos por los afectados, y de manera que las soluciones sean aceptables para ellos, y no a partir de determinaciones que se hagan parcialmente y al margen de los interesados.

### **3.12. Conclusiones del Capítulo 3**

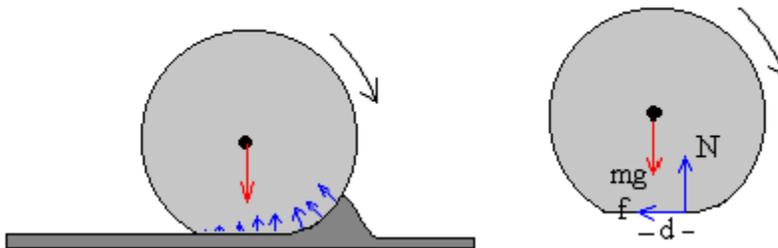
- ❖ El análisis estadístico efectuado a cada una de las probetas permiten determinar que existe relación estadísticamente significativa entre las variables fuerza sw torsión vs deformación ya que el  $R^2$  es estadísticamente significativo para un 90 % o superior.
- ❖ Los resultados numéricos obtenidos para la fuerza de torsión se corresponden con el comportamiento estructural obtenido, en la misma medida que se incrementa la deformación hay disminución del tamaño del grano.
- ❖ Los medios de cómputo provocan afectaciones ya que necesitan del uso de la energía para su desarrollo, de igual manera lo hacen los reactivos químicos empleados en los laboratorios.

## Conclusiones generales

- Para provocar la rotura en las muestras deformadas con fuerza de 500 N se requirió de una fuerza de 515,8 N/mm<sup>2</sup>, la cual se incrementó hasta 684,056N/mm<sup>2</sup> para las muestras deformadas con fuerza de 2 500 N, lo que justifica el endurecimiento superficial con rodillo del acero AISI 1045.
- Las microestructuras analizadas muestran disminución del tamaño del grano por el efecto combinado de la deformación plástica por rodillo, así como granos orientados en la dirección que se produjo la torsión, alcanzando una dureza máxima de 448 HV.
- Al estimar los costos de las muestras torsionadas con su correspondiente análisis microestructural, se incurre por concepto de materiales, mano de obra y equipos en un valor de 13,18 CUP.
- El empleo de los medios de cómputo traen consigo afectaciones al medio ambiente ya que los mismos necesitan del consumo energético para su uso, pero además impactan en la vida económica, política, cultural e ideológica de cada nación.

## Recomendaciones

- ✓ Realizar en próxima investigación un análisis estadístico que contemple otros factores y permitan establecer el comportamiento del acero AISI 1045 deformado por rodillo y sometido a ensayo de torsión.
- ✓ Determinar considerando la siguiente figura, el área deformada bajo la curva durante el proceso de deformación plástica con rodillo simple.





## BIBLIOGRAFÍA

1. Alfonso, E; Martin, J. Aplicación de la Ley de Wolf-Bragg en la determinación de las tensiones residuales de primer género. Memorias del II Taller Internacional de Didáctica de la Física "DIDACFISU' 2000".
2. Alfonso, E. *et.al.*, Investigación del mecanismo de formación de la acritud y tensiones residuales en las capas superficiales durante el proceso de corte de piezas endurecidas, p.52-56, Construcción de Maquinarias (Santa Clara). No. 1. 1995.
3. Alfonso, E. Apuntes sobre la interrelación composición – microestructura y propiedades del acero. Monografía. ISBN 959-16-0188-3. Universidad de Matanzas. 2002.
4. Alvarez, E; G, M. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N 2. Mayo-Agosto. 1995. p 69-76.
5. Alvarez, E. N, Lancestremere, J, Mareglia, J. C, Barr, J. Fundamentos de la trafilación. Tecnología Mecánica II. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería, 2004.
6. Badiola, V. Materiales Departamento. Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, Diseño de Máquinas I, 2004, España.
7. Barceinas, S y A. Juárez, H. Propiedades, Fortalecimiento y Comportamiento de los Materiales, Capítulo IV, 2001.
8. Boyle, J. y Spence, J. Stress Analysis for Creep. Londres: Butteerwoths, 1989.
9. Callister, W. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7.
10. Casillas, A., "Cálculo de talleres". 5ª ed., Madrid, España 1982. Pág 316-321.
11. Díaz, S, Boada, O. "Caracterización del bruñido por rodillo simple en la elaboración del acabado superficial de piezas". Revista Centro Azúcar, Universidad Central de Las Villas, No. 4, Octubre-Diciembre 2004. ISSN 0253-5757.
12. Dieter, G. Metalurgia Mecánica. MacGraw-Hill Book Company, Inc. 1967.
13. El-Khabeery, M.M. "Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials", Journal of Materials Processing



- Technology, Volume 132, Issue 1-3, January 2003, Pages 82-89, The Netherlands.
14. El-Khabeery, M.M., El-Axir, M.H. "Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 41, Issue 12, September 2001, Pages 1705-1719, UK.
  15. Fernández, T., Mecanismos de endurecimiento del acero AISI 1045 deformado por rodadura. Tesis Doctoral. ISMMM. 2011.
  16. Feschenkov, V, Majmutov, R. El torneado. Editorial Mir. Moscú. Pág 152-163. 1989.
  17. Hernández, H.G. Estudio del comportamiento del acero AISI 1045 mediante la deformación plástica por rodadura. Informe Técnico. ISMMM. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2005.
  18. Hernández, S. "Metodología de la Investigación." Editorial McGraw-Hil. México. 1997.
  19. Key to Steel. Fracture Toughness. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com>
  20. Key To Steel. Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com>
  21. Lajtin, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. 1 ed. Editorial MIR. Moscú. 1973. p 359–360.
  22. Lubliner, J. Plasticity Theory. University of California at Berkeley. 1986. Charter 2, pág 77-86.
  23. Mallo, M., Manual teórico práctico del mecánico forjador, Editorial Pueblo y Educación, 1987, Cuba. Pág 93-121 y 145-152.
  24. Martynenko, O.V, "The interconnection of strained condition in the area of contact with the kinematics of points of deformed surface points by the rollers plastic deformation of the surface", Proceeding of Fundamental and application problems of machine building technology International Conference, Technology 2002, March 1-September 10, 2002, Tula Technical University, Russia.
  25. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Version 1.1. 1996.



26. Mazein, P.G. Prusakov, D.V., Tchunin, A.V. "Modelling the residual stresses and deformation during a surface plastic deformation operations", Proceeding of the Chelyabinsk Scientific Center, Issue #1, (10). January-March 2001, Russia.
27. Mech-India. "Process of burnishing", India, Obtenido de la Red mundial el 25 de Marzo del 2005, <http://www.mech.india.com>
28. Moreno, P. A. "Una teoría discreta de dislocaciones en redes cristalinas "Dpto. Mecánica de medios continuos. Universidad de Sevilla. Obtenido de la Red mundial el Lunes 28 de Febrero de 2005.
29. Normas cubanas: NC 10-56:86. Metalografía. Microestructura de Metales de aleaciones duras. Métodos de ensayo.
30. Pero-Sanz, J.A. "Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 1999. España.
31. Pero-Sanz, J.A. "Ciencia de los Materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 2000, 3ra Edición. Pág 393-502. España.
32. Smelianky, V. M., Kalpin Y. G., Barinov V.V. "Empleo de las posibilidades plásticas de los metales en la capa superficial de las piezas durante la elaboración por rodilado exterior." Revista "Novedades de la Construcción de Maquinarias". Moscú. Pág. 54-58. No. 8. 1990. URSS.
33. Smelianky, V.M., Blumenstein, V.Yu. "Technological succession mechanics succession appropriatenesses of the plasticity resource exhaustion at the stage of surface plastic deformation", Proceeding of International Conference of Materials", May 2001, Russia.
34. Smith, W.F. "Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los materiales", Mc Graw-Hill, 2001, España.
35. Stiopin, P.A. Resistencia de materiales. Editorial Mir. Moscú. Pág 26-92. 1985.
36. Sugino Corporation, "Superroll-Roller burnishing tool", USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2003. <http://www.suginocorp.com>
37. Surfing Tools, "Products". India, Obtenido de la Red mundial el 6 de abril del 2005, <http://www.surfinetools.com>