



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

---

---

**ANÁLISIS DE ESFUERZOS APLICADOS A SISTEMAS DE SUJECCIÓN  
(DE BAJO PERFIL) PARA MECANIZADO POR ARRANQUE DE  
VIRUTA A ACEROS ALEADOS (AISI 8620)**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA**

**ING. CARLOS DE LA CRUZ ALEJO**

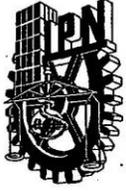
**DIRECTORES**

**DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA**

**DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ**



**JULIO 2013**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

SECRETARÍA

**ACTA DE REVISIÓN DE TESIS**

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 11:00 horas del día 07 del mes de Junio del 2013 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. para examinar la tesis titulada:

**“ANÁLISIS DE ESFUERZOS APLICADOS A SISTEMAS DE SUJECIÓN (DE BAJO PERFIL) PARA MECANIZADO POR ARRANQUE DE VIRUTA A ACEROS ALEADOS (AISI 8620)”.**

Presentada por el alumno:

**DE LA CRUZ**

Apellido paterno

**ALEJO**

Apellido materno

**CARLOS**

Nombre(s)

Con registro: 

B	1	1	0	7	3	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISIÓN REVISORA**

Directores de tesis

DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA

Presidente

DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ

Segundo Vocal

DR. GUILLERMO MANUEL URRIOLAGOITIA CALDERÓN

Tercer Vocal

DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ

Secretario

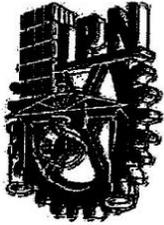
DR. JOSÉ ÁNGEL LODEGARIO ORTEGA HERRERA

DR. SAMUEL ALCÁNTARA MONTES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. MAURO ALBER ENCISO AGUILAR  
 SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 14 de Junio de 2013, el que suscribe, **ING. CARLOS DE LA CRUZ ALEJO**, alumno del programa, **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**, con número de registro **B 110731** adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Profesional Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual de este trabajo de Tesis bajo la dirección del **DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA** y **DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ**, y cede los derechos del trabajo titulado **“ANÁLISIS DE ESFUERZOS APLICADOS A SISTEMAS DE SUJECCIÓN (DE BAJO PERFIL) PARA MECANIZADO POR ARRANQUE DE VIRUTA A ACEROS ALEADOS (AISI 8620)”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido, textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección electrónica: [alejo\\_personal@hotmail.com](mailto:alejo_personal@hotmail.com)

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Nombre y Firma

---

**ING. CARLOS DE LA CRUZ ALEJO**

## **AGRADECIMIENTOS**

**Quiero agradecer al**

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Unidad Zacatenco

**A mis directores de esta tesis**

**Dr. Guillermo Urriolagoitia Sosa**

**Dr. Luis Héctor Hernández Gómez**

Por la confianza y apoyo para la realización de este trabajo

**A mi comité revisor**

**Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón**

**Dr. Samuel Alcántara Montes**

**Dr. José Ángel Lodegario Ortega Herrera**

**Dr. Carlos Torres Torres**

**A mi asesor**

**M. en C. Víctor Fernando Verduzco Cedeño**

Por su trabajo de dirección y su apoyo incondicional

**Y al**

**CONACyT**

Por el apoyo económico

---

---

**Resumen**

Las máquinas-herramienta han jugado un papel fundamental en el desarrollo tecnológico del mundo; gracias a ellas se ha podido realizar de forma práctica maquinaria de todo tipo para el mecanizado, que es el proceso de conformado de materiales consistente en la remoción de material mediante una herramienta de filo. La reciente tecnología permite a la industria hoy en día hacer mejores partes en un menor tiempo. La evolución de los sistemas de sujeción automáticos para la pieza de trabajo ha permitido disminuir significativamente los tiempos de montaje y desmontaje de un proceso de fabricación, donde la rapidez de producción es una de las grandes razones para que estas herramientas tecnológicas se desarrollen. Este trabajo aborda el análisis del campo de esfuerzo y desplazamientos que se generan en el sistema de sujeción (acero H-13) y en el espécimen a maquinar (aceros AISI 8620), lo cual se lleva a cabo mediante la presente investigación.

El Método de Elementos Finitos (MEF), es una herramienta computacional potente para predecir y simular el comportamiento físico de sistemas mecánicos, por lo cual se hará uso extenso de tal herramienta con la ayuda del programa comercial que se fundamenta en tal método para determinar la magnitud de los parámetros principales y que se ejercerá en el sistema de sujeción. Del análisis y discusión de resultados se determinan los costos de producción y de maquinaria, obteniendo la confiabilidad de la técnica de sujeción para la optimización del proceso de manufactura.

Finalmente se analiza el sistema de sujeción y el espécimen a maquinar bajo condiciones elastoplásticas descritas con cargas externas propuestas a fin de ubicarlo en la zona plástica pero sin obtener deformaciones permanentes, en la descarga se localizan los esfuerzos residuales generados tras la historia previa de carga. Dos análisis elastoplásticos se realizaron, el primero se realizó con carga normal de trabajo en el acero a maquinar, obteniendo como resultado, un óptimo diseño mecánico del sistema de sujeción, en el segundo, la carga propuesta es crítica por lo que altera sus capacidades iniciales, éste análisis determina que bajo condiciones solamente extremas, tal como lo sería un error humano con la aplicación de una carga grande, en el cual habrá una generación de esfuerzos que rebasan el propio esfuerzo de cedencia del acero H-13 y que propiciarían la fractura del sistema de sujeción.

---

---

**Abstract**

Machine tools have played a key role in the technological development of the world, thanks to them has been able to make practically all kinds of machinery for machining, which is the process of forming of materials consisting of material removal by cutting tool. The latest technology allows the industry today do best parts in less time. The evolution of automatic restraint systems for workpiece have reduced significantly the time of assembly and disassembly of a manufacturing process, where the speed of production is a big reason for these technological tools are developed. This work deals with the analysis of the stress field and displacement generated by the restraint system (low profile) in alloy steel (AISI 8620), which is carried out by the present investigation.

The finite element method (FEM) is a powerful computational tool for predicting and simulating the physical behavior of mechanical systems, thus will extensive use of such tool with the aid of commercial software that is based on such a method for determining the magnitude of the main parameters to be exercised in the restraint system. Analysis and discussion of results, determine production costs and obtaining machinery reliability optimization technique for manufacturing such a system.

Finally we analyze both specimens steel (AISI 8628 and H-13) under external loads elastoplastic described proposals to place it in the plastic zone without obtaining permanent deformations in the download are localized residual stresses generated after the previous history load. Two elastoplastic analysis were performed, the first was performed with normal workload in machining steel, resulting in an optimal mechanical design of the fastening system, in the second, the proposed charge is critical for disrupting their initial capabilities , this analysis determined that only under extreme, as would be human error by applying a large load, in which there will be a generation beyond the own efforts yield stress of the steel H-13 and that would facilitate the fracture restraint system.

---

---

## Objetivos

### Objetivo general

Determinar los esfuerzos y los desplazamientos que soporta el sistema de sujeción (de bajo perfil), así como del material de acero (AISI 8620) en una máquina fresadora para el mecanizado.

### Objetivos particulares

Para lograr alcanzar el objetivo general, es necesario primeramente cumplir con una serie de objetivos particulares, tal como se observa a continuación.

- Conocer el estado de esfuerzos que se tiene en la vecindad de la sujeción del material.
- Determinación numérica del campo de esfuerzos y desplazamientos que se genera en la zona mediante el software comercial del Método de Elementos Finitos
- Determinar los costos de producción y de maquinaria obteniendo la confiabilidad de la técnica para la optimización de tal sistema de manufactura.

---

---

**Justificación**

La importancia que tienen los sistemas de sujeción en las máquinas-herramienta es de suma importancia dentro de la industria debido a la suma de los costos asociados con el proceso. El sistema de sujeción a analizar permite sujetar con 3 mm de agarre y es capaz de soportar las cargas ejercidas por las herramientas de corte durante el trabajo de maquinado. Además la relevancia que tiene este tipo de sujeción, es en un ahorro de material debido a que el desperdicio de la pieza a trabajar es menor, por lo cual hace de este trabajo interesante y económicamente viable, debido a que el conocimiento del nivel de esfuerzos aplicados a sistemas de sujeción (de bajo perfil) para mecanizado por arranque de viruta a aceros aleados (AISI 8620) permitirá hacer extensiva y confiable la aplicación de esta técnica dentro de la industria metalmeccánica del país, lo que repercutirá en hacer más eficientes las metodologías de maquinados convencionales, logrando optimizar los sistemas de manufactura de control numérico.

---

---

**Índice general**

Resumen	i
Abstract	ii
Objetivos	iii
Justificación	iv
Índice general	v
Índice de figuras	xii
Índice de tablas	xiii

**Capítulo I. Estado del arte**

I.1	Introducción	2
I.2	Breve reseña histórica	5
	I.2.1 Pioneros del proceso de mecanizado	7
	I.2.2 Primeros análisis numéricos del proceso del mecanizado	13
I.3	Planteamiento del problema	15
I.4	Sumario	16
I.5	Referencias	17

**Capítulo II. Fundamentos teóricos**

II.1	Introducción	21
II.2	Generación de superficies	21
II.3	Formación de viruta	22
	II.3.1 Torneado	25
	II.3.2 Fresado	27
	II.3.3 Rectificado	29
II.4	Sistemas de sujeción en máquinas-herramienta	31
	II.4.1 Sujeción en el torno	33
	II.4.2 Sujeción en la fresadora	35
	II.4.3 Sujeción en la rectificadora	37
	II.4.4 Sujeción con prensas hidráulicas	38

II.4.5 Sujeción con dispositivos neumáticos	39
II.4.6 Sujeción con platos magnéticos	40
II.5 Sumario	41
II.6 Referencias	42

### **Capítulo III. Metodología experimental**

III.1 Desarrollo de la evaluación experimental	46
III.2 Diagrama de flujo del proceso de manufactura	47
III.3 Material y geometría de los especímenes	49
III.4 Herramental y mecanizado	52
III.5 Montaje de piezas	56
III.6 Pruebas realizadas	58
III.7 Costos de tiempos y proceso de maquinado	63
III.8 Sumario	66
III.9 Referencias	67

### **Capítulo IV. Análisis numérico elástico de los especímenes de acero**

IV.1 El Método de Elementos Finitos (MEF)	70
IV.2 Evaluación de desplazamientos y esfuerzos en el sistema de sujeción para el fresado	72
IV.3 Evaluación de desplazamientos y esfuerzos en el sistema de sujeción para barrenado	81
IV.4 Sumario	89
IV.5 Referencias	89

### **Capítulo V. Análisis numérico elastoplástico de los especímenes de acero**

V.1 Generalidades	92
V.2 Endurecimiento por deformación (reglas de endurecimiento)	93
V.3 Endurecimiento isotrópico	95
V.4 Endurecimiento cinemático	95
V.5 Endurecimiento lineal cinemático	96
V.6 Análisis elastoplástico de los especímenes con carga normal de trabajo	97
V.7 Análisis elastoplástico de los especímenes con sobrecarga de trabajo	104

Índice general	vii
V.8 Sumario	113
V.9 Referencias	113
<b>Discusiones y conclusiones</b>	116
<b>Trabajo futuro</b>	121

**Índice de figuras****Capítulo I**

Figura I.1	Producción de máquinas-herramienta en millones de dólares en el 2010	2
Figura I.2	Producción por arranque de viruta en Latinoamérica	3
Figura I.3	Jeroglífico egipcio del siglo III a.C. de una operación de torneado	6
Figura I.4	Torno alemán de 1400 y dibujo de <i>Leonardo Da Vinci</i> de un torno	7
Figura I.5	Torno construido por <i>Leonardo Da Vinci</i>	8
Figura I.6	Máquina de cilindrado interior de <i>Wilkinson</i>	9
Figura I.7	Torno con cambio de velocidad de <i>Henry Maudslay</i>	10
Figura I.8	Modelo de corte ortogonal según <i>Merchant</i>	11
Figura I.9	Observación sobre la formación de viruta. a) Tresca, b) Mallock	12
Figura I.10	Torno construido en la década de 1950	12
Figura I.11	Máquinas-herramienta de control numérico. a) Torno, b) Fresadora	13
Figura I.12	Flujos plásticos. a) Método <i>Lagrangiano</i> , b) Método <i>Euleriano</i>	14

**Capítulo II**

Figura II.1	Generación de la geometría. a) En un solo punto, b) Múltiples puntos	22
Figura II.2	Principales parámetros del corte ortogonal	24
Figura II.3	Tipos de formación de viruta en el corte de metal	25
Figura II.4	Torneado. a) Movimientos de corte, b) Fuerzas involucradas	26
Figura II.5	Obtención de diferentes superficies. a) Torneado exterior, b) Torneado interior	27
Figura II.6	Operaciones de Fresado. a) Periférico, b) Frontal	28
Figura II.7	Tipos de fresado. a) En oposición, b) En concordancia	28
Figura II.8	Herramienta muela de la rectificadora	29
Figura II.9	Rectificadora de metales	30
Figura II.10	Modo de sujeción de las piezas en el torneado	34
Figura II.11	Mecanismos de sujeción para torno de control numérico. a) Chucks hidráulico, b) Cilindro neumático	35
Figura II.12	Mecanismos de sujeción en la fresadora directamente sobre la mesa. a) Prensa, b) Juego de bridas	36
Figura II.13	Sujeción en la fresadora con dispositivos comunes. a) Mordazas, b) Plato	36

	vertical y c) Plato horizontal	
Figura II.14	Mordazas mecánicas para fresadora de control numérico	37
Figura II.15	Sujeción en la rectificadora con mordazas. a) Roscas, b) Ángulo de tensión	38
Figura II.16	Prensas hidráulicas. a) Estación sencilla, b) Torreta clúster de cuatro lados	39
Figura II.17	Dispositivos neumáticos. a) Con garras giratorias, b) Brazo lineal	40
Figura II.18	Platos magnéticos. a) Estructura interna, b) montados para mecanizar	41
<b>Capítulo III</b>		
Figura III.1	Sistema de sujeción	46
Figura III.2	Diagrama de flujo del proceso	48
Figura III.3	Mordazas del sistema de sujeción	50
Figura III.4	Acero AISI 8620	50
Figura III.5	Sujeción de la pieza con 3 mm de agarre	52
Figura III.6	Montaje de pieza para conformado de sujeción	57
Figura III.7	Montaje de pieza en sistemas modulares de sujeción <i>Profile gripping</i>	57
Figura III.8	Sujeción <i>Profile gripping</i> en sistema <i>Quick point reference</i>	58
Figura III.9	Centro de mecanizado de 5 ejes	59
Figura III.10	Block toma de gases. a) Vista frontal. b) Vista lateral derecha	60
Figura III.11	Fresado del espécimen de acero AISI 8620	60
Figura III.12	Barrenado del espécimen de acero AISI 8620	61
Figura III.13	Calidad del maquinado	61
Figura III.14	Calidad de posicionamiento de los barrenos	62
Figura III.15	Equipo de medición óptico para la verificación de posiciones y diámetros	62
<b>Capítulo IV</b>		
Figura IV.1	Elemento utilizado para el mallado del sistema	72
Figura IV.2	Modelo parametrizado del sistema	73
Figura IV.3	Geometría y mallado de los especímenes de estudio	73
Figura IV.4	Desplazamiento del cero AISI 8620 en el fresado	75
Figura IV.5	Campo de esfuerzos del acero AISI 8620 en el fresado	75
Figura IV.6	Selección de nodos del espécimen de acero AISI 8620 en el fresado	76

Figura IV.7	Gráfica de esfuerzo nodal de transmisión del acero AISI 8620 en el fresado	78
Figura IV.8	Zona de sujeción del sistema	78
Figura IV.9	Desplazamiento de la mordaza de sujeción en el fresado	79
Figura IV.10	Zona crítica de esfuerzos en la mordaza en el fresado	79
Figura IV.11	Gráfica de esfuerzo nodal en la zona crítica de la mordaza en el fresado	81
Figura IV.12	Colocación de la carga sobre el espécimen de acero AISI 8620	82
Figura IV.13	Desplazamiento del Acero AISI 8620 para el barrenado	82
Figura IV.14	Campo de esfuerzos del acero AISI 8620 en el barrenado	83
Figura IV.15	Selección de nodos del espécimen de acero AISI 8620 en el barrenado	84
Figura IV.16	Gráfica del esfuerzo nodal de transmisión del acero AISI 8620 en el barrenado	85
Figura IV.17	Desplazamiento de la mordaza de sujeción en el barrenado	86
Figura IV.18	Zona crítica de esfuerzos en la mordaza en el barrenado	86
Figura IV.19	Gráfica de fuerza nodal en la zona crítica de la mordaza para el barrenado	88
 <b>Capítulo V</b>		
Figura V.1	Comportamiento elastoplástico de un material	93
Figura V.2	Gráfica esfuerzo-deformación unitaria en descarga y carga	94
Figura V.3	Superficie inicial y subsecuente en el endurecimiento isotrópico	95
Figura V.4	Superficie inicial y subsecuente en el endurecimiento cinemático	96
Figura V.5	Regla lineal de endurecimiento cinemático de <i>Prager</i>	96
Figura V.6	Gráfica de las propiedades mecánicas bilineales del el acero AISI (8620)	97
Figura V.7	Aplicación de la carga sobre el espécimen a maquinar	98
Figura V.8	Componente del esfuerzo residual en X del acero AISI 8620 con carga normal	99
Figura V.9	Componente del esfuerzo residual en Y del acero AISI 8620 con carga normal	99
Figura V.10	Componente del esfuerzo residual en Z del acero AISI 8620 con carga normal	100
Figura V.11	Criterio de <i>Von Misses</i> residual del acero AISI 8620 con carga normal	100

---

Figura V.12	Gráfica de las propiedades mecánicas bilineales del sistema de sujeción (acero H-13)	101
Figura V.13	Componente del esfuerzo residual en X del acero H-13 con carga normal	102
Figura V.14	Componente del esfuerzo residual en Y del acero H-13 con carga normal	102
Figura V.15	Componente del esfuerzo residual en Z del acero H-13 con carga normal	103
Figura V.16	Criterio de <i>Von Misses</i> residual para el acero H-13 con carga normal	103
Figura V.17	Componente del esfuerzo en la coordenada X del acero AISI 8620 con sobrecarga	105
Figura V.18	Componente del esfuerzo en la coordenada Y del acero AISI 8620 con sobrecarga	105
Figura V.19	Componente del esfuerzo en la coordenada Z del acero AISI 8620 con sobrecarga	106
Figura V.20	Criterio de <i>Von Misses</i> del acero AISI 8620 con sobrecarga	106
Figura V.21	Componente del esfuerzo residual en X del acero AISI 8620 con sobrecarga	107
Figura V.22	Componente del esfuerzo residual en Y del acero AISI 8620 con sobrecarga	107
Figura V.23	Componente del esfuerzo residual en Z del acero AISI 8620 con sobrecarga	108
Figura V.24	Criterio de <i>Von Misses</i> residual del acero AISI 8620 con sobrecarga	108
Figura V.25	Componente del esfuerzo en X del acero H-13 con sobrecarga	109
Figura V.26	Componente del esfuerzo en Y del acero H-13 con sobrecarga	109
Figura V.27	Componente del esfuerzo en Z del acero H-13 con sobrecarga	110
Figura V.28	Criterio de <i>Von Misses</i> del acero H-13 con sobrecarga	110
Figura V.29	Esfuerzo residual en el eje de coordenada X del acero H-13 con sobre carga	111
Figura V.30	Esfuerzo residual en el eje de coordenada Y del acero H-13 con sobrecarga	111
Figura V.31	Esfuerzo residual en el eje de coordenada Z del acero H-13 con sobrecarga	112
Figura V.32	Criterio de <i>Von Misses</i> residual del acero H-13 con sobrecarga	112

---

---

**Índice de tablas****Capítulo III**

Tabla III.1	Composición química del sistema de sujeción (acero H-13)	49
Tabla III.2	Composición química del acero AISI 8620	51
Tabla III.3	Propiedades mecánicas del acero AISI 8620	51
Tabla III.4	Dispositivos auxiliares para el mecanizado	53
Tabla III.5	Cálculo de costo unitario de la fabricación de la pieza en las 5 caras	63
Tabla III.6	Cálculo de tiempos de la máquina	64
Tabla III.7	Ocupación de la máquina	66

**Capítulo IV**

Tabla IV.1	Valores de esfuerzos de <i>Von Misses</i> que se transmiten a la zona de agarre de la mordaza en el fresado	77
Tabla IV.2	Valores de esfuerzo de <i>Von Misses</i> en la zona crítica de la mordaza en el fresado	80
Tabla IV.3	Valores de esfuerzos de <i>Von Misses</i> que se transmiten a la zona de agarre de la mordaza en el barrenado	84
Tabla IV.4	Valores de esfuerzos de <i>Von Misses</i> en la zona crítica de la mordaza en el barrenado	87

**Capítulo V**

Tabla V.1	Valores del comportamiento elastoplástico del el acero AISI (8620)	98
Tabla V.2	Valores del comportamiento elastoplástico del sistema de sujeción (acero H-13)	101

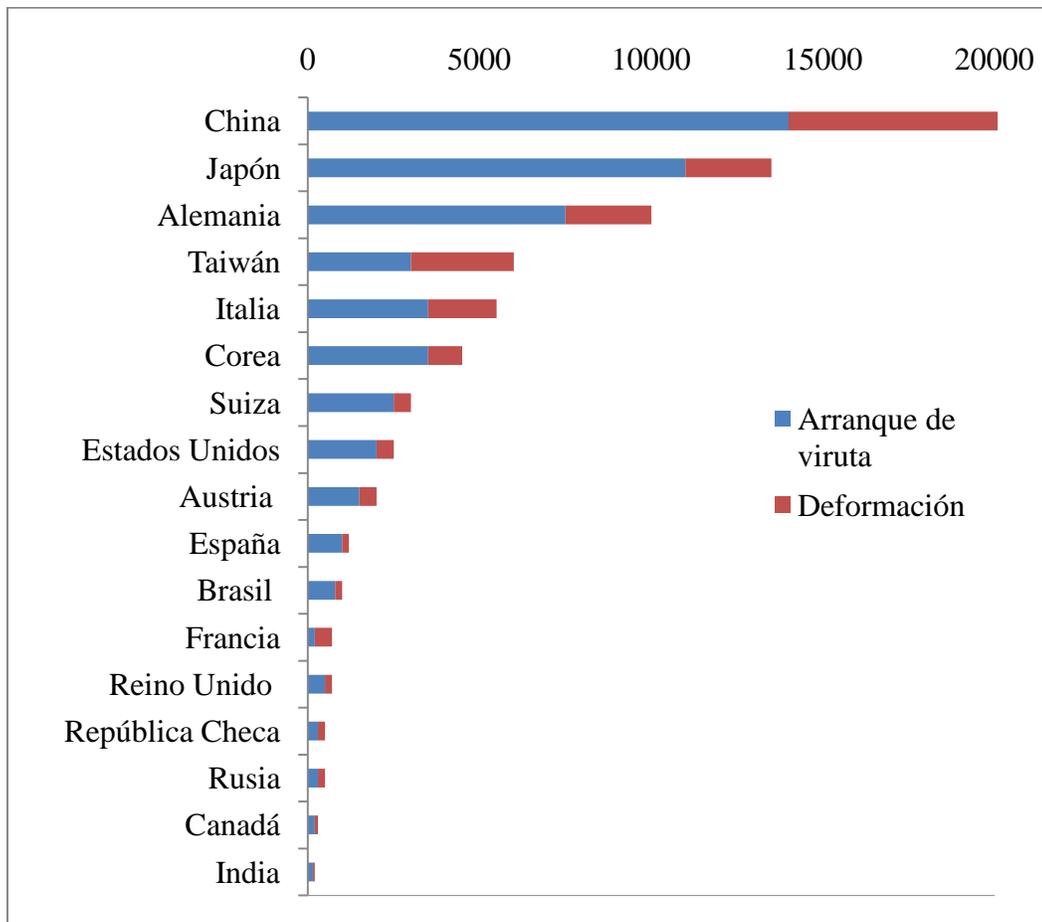


# CAPÍTULO I ESTADO DEL ARTE

### I.1.- Introducción

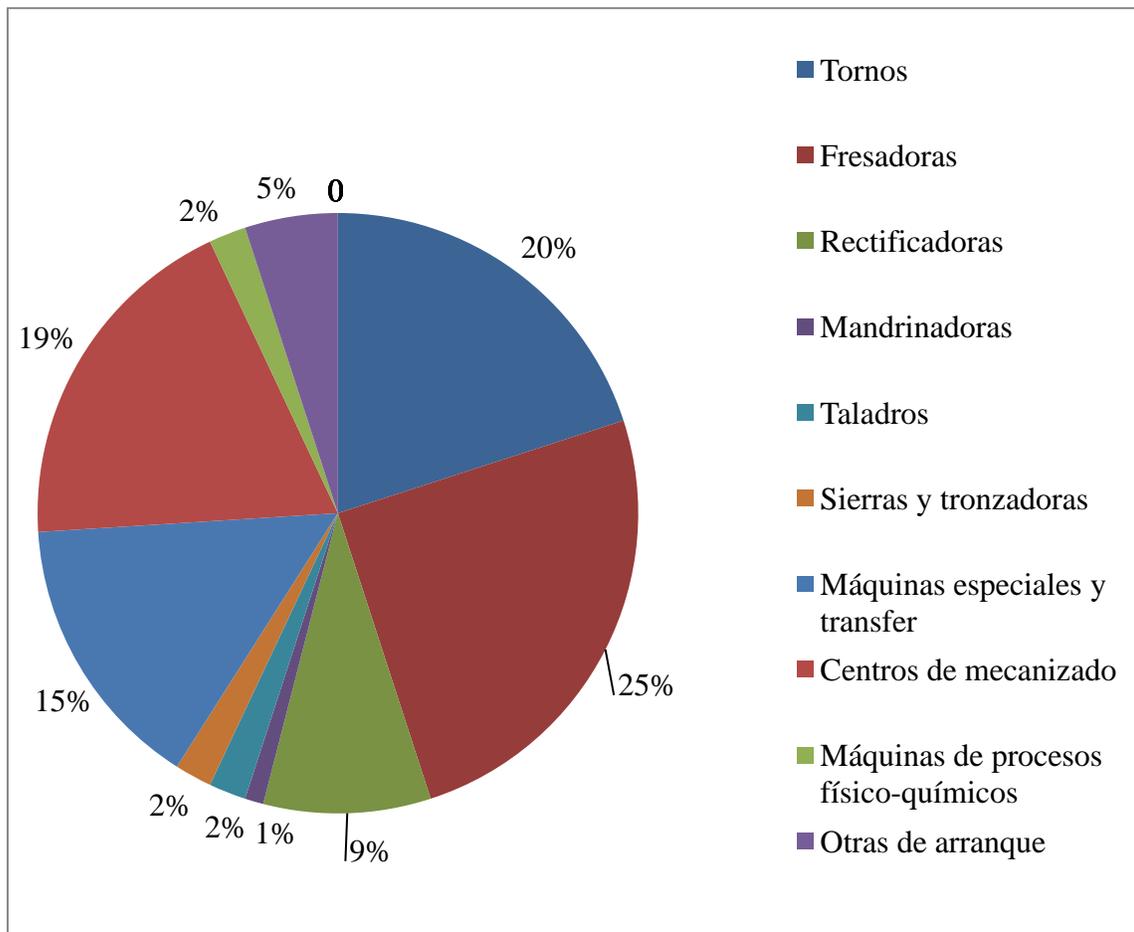
La industria de las máquinas-herramienta es un área de manufactura a la cual se destina una alta inversión en el desarrollo e innovación tecnológica. La situación aumenta si se considera que las máquinas-herramienta son la base de toda la cadena productiva y es prácticamente una condición para que el sector busque estar siempre a la vanguardia en el desarrollo de la tecnología [I.1]. El sector de mecanizado es complejo debido a la cantidad de procesos y variables que los condicionan.

Además, el hecho de no tener un código de actividad propio, así como asociaciones sectoriales específicas, dificulta el análisis del estado actual y evolución del sector manufacturero. En este sentido, con el fin de presentar los indicadores principales y los datos del sector de máquinas-herramienta se utilizarán diversas fuentes, principalmente, *Eurostat NACE C2562-Machining* [I.2] ya que el sector industrial del mecanizado por arranque de viruta está englobado en dichos indicadores.



**Figura I.1.-** Producción de máquinas-herramienta en millones de dólares en el 2010 [I.2].

La mayoría de fabricantes de máquinas-herramienta en el mundo empezaron a salir de la recesión en el año 2010 ya que en este año, la producción de los principales 28 países productores creció a 66,3 miles de millones de dólares. La cifra representa una ganancia de un 21% respecto al año anterior, en el que se produjo por valor de 54,7 miles de millones de dólares, es decir, un tercio menos que en el año 2008 [I.2]. El dominio de China ha sido ya por años y es el mayor consumidor de máquinas-herramienta y en 2009 se convirtió en el principal productor. En 2010, el liderazgo continúa y el país sigue obteniendo grandes ganancias alcanzando una representación del 30% de la producción mundial, sin embargo, la gran mayoría de la producción China está dedicada al mercado interno y todavía se pueden ver pocas máquinas-herramienta instaladas en los mercados occidentales [I.2].



**Figura I.2.-** Producción por arranque de viruta en Latinoamérica.

Respecto al consumo, se estima que China siga incrementando la importación y producción interna de su maquinaria y de esta manera, seguirá siendo el primer consumidor de máquinas-herramienta con mucha diferencia, con un valor estimado de máquinas instaladas de 27,3 miles de millones de dólares.

En términos de valor, cuatro de cada diez máquinas-herramienta instaladas en cualquier lugar del mundo en el año 2011 fueron de una empresa de fabricación China. Alemania es el segundo consumidor de máquinas-herramienta, con 5 miles de millones de dólares y Estados Unidos el siguiente con 2,7 miles de millones de dólares. La producción de mecanizado según *Eurostat* [I.2] fue de 57.655 millones de euros en 2010, un 30% menos del año anterior. Sin embargo, en Europa, al igual que en el resto del mundo, se produjo una mejora de la producción durante 2011 y se espera seguir mejorando ligeramente en los próximos años siguientes [I.2].

Con el fin de observar los principales datos de evolución de este subsector, en el presente trabajo se incluye la información sobre la producción en máquinas-herramienta en toda Latinoamérica. Cabe señalar que aunque estos datos no se pueden relacionar directa y exclusivamente con la actividad de mecanizado, sí que ofrecen una idea sobre las tendencias del sector y algunas de sus principales características. En este sentido, las máquinas-herramienta se clasifican en dos grandes grupos; máquinas de arranque de viruta y máquinas de deformación (pero sólo el primer grupo se puede asociar al proceso de mecanizado) [I.2]. Por otro lado, el mecanizado y fabricación final de piezas en la industria metalmecánica debe cumplir con estándares de calidad cada vez más estrictos y al menor costo posible. Así como les permita ser más competitivos en un mercado globalizado. Para lograr las operaciones específicas dentro de los procesos productivos, es conveniente utilizar máquinas de propósito específico, cuya mayor sencillez les permita ser también de menor precio repercutiendo en menores costos de producción [I.2].

Así, la importancia de las operaciones de remoción de material con el uso de máquinas específicas en el panorama actual se puede visualizar considerando las cifras de los costos asociados con ésta actividad, los cuales incluyen el aumento de los costos de herramientas, costos laborales y costos de inversión de capitales [I.3]. Tal proceso de manufactura requiere de una herramienta de corte sofisticada para remover el exceso de material en la pieza de trabajo, de tal manera que el material remanente sea la forma de la parte deseada.

La acción predominante del corte involucra la deformación cortante del material de trabajo para formar una viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie. Controlar el proceso de mecanizado no es una tarea fácil de conseguir [I.3].

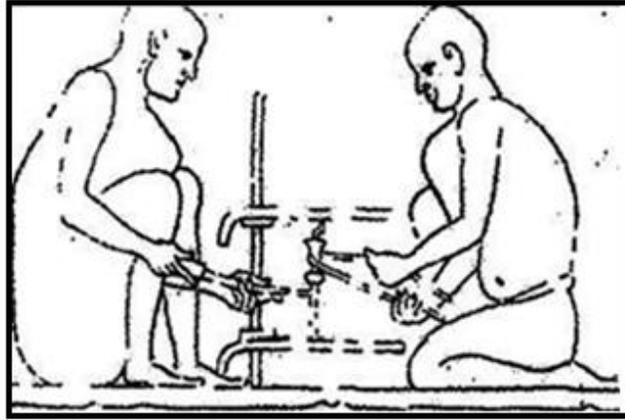
Los mecanismos físicos que definen el arranque de material son complejos porque engloban todo un conjunto de procesos que son objeto de estudio por parte de las disciplinas de la mecánica y de las ciencias de los materiales [I.4]. Parte de la complejidad de este proceso radica en que las condiciones de contacto mecánico y físico entre la herramienta y la pieza influyen notablemente en la formación de la viruta, así como también cambiando algunos de los parámetros de corte, como por ejemplo, la velocidad de corte, la profundidad de corte, ángulo de desprendimiento, etc. Los mecanismos de generación de la viruta pueden cambiar pasando de ser continua a segmentada, debido a sus características, el maquinado se realiza generalmente después de otros procesos de manufactura como la fundición o deformación volumétrica (por ejemplo, forjado y estirado de barras), es decir, otros procesos crean la forma general de la parte y el maquinado produce la geometría final, las dimensiones y el acabado [I.4].

El maquinado no es solamente un proceso, sino una familia de procesos, para realizar la operación se requiere movimiento relativo entre la herramienta y el material de trabajo. El movimiento relativo se logra en la mayoría de las operaciones de maquinado por medio de un movimiento primario, llamado velocidad, y un movimiento secundario, denominado avance [I.5]. Hay muchas clases de operaciones de maquinado, cada uno de las cuales es capaz de generar una cierta geometría y textura superficial. Las operaciones más usadas por la industria son el torneado y el fresado. Fabricar objetos mediante el arranque de material es una tecnología que aparece ya en las actividades de manufactura en las primeras civilizaciones conocidas hace miles de años, a pesar de esto, la modelización de este proceso de mecanizado sigue siendo un desafío para los investigadores debido a la continua necesidad industrial de mejorar el proceso o de mecanizar nuevos tipos de materiales como las aleaciones de baja maquinabilidad o los materiales compuestos [I.6].

## **I.2.- Breve reseña histórica**

El empleo de los procesos de arranque de material para la fabricación de componentes se remonta a la prehistoria. Los primeros materiales que fueron conformados por arranque de material fueron la piedra y la madera [I.7]. El mecanizado es un proceso de fabricación complejo que depende del material de la pieza y de la herramienta. La formación de la viruta también depende de las condiciones de corte del problema, como son; ángulo de corte, ángulo de desprendimiento, velocidad de corte, rigidez de la máquina, etc.

La formulación de una teoría generalizada sobre el mecanizado que defina un modelo capaz de predecir todos los resultados es un reto difícil de conseguir, por lo que los primeros trabajos sobre este tema fueron sobre todo descriptivos, y aún en nuestra actualidad la formulación generalizada fiable sigue siendo un objetivo de alcanzar [I.8].



**Figura I.3.-** Jeroglífico egipcio del siglo III a.C. de una operación de torneado

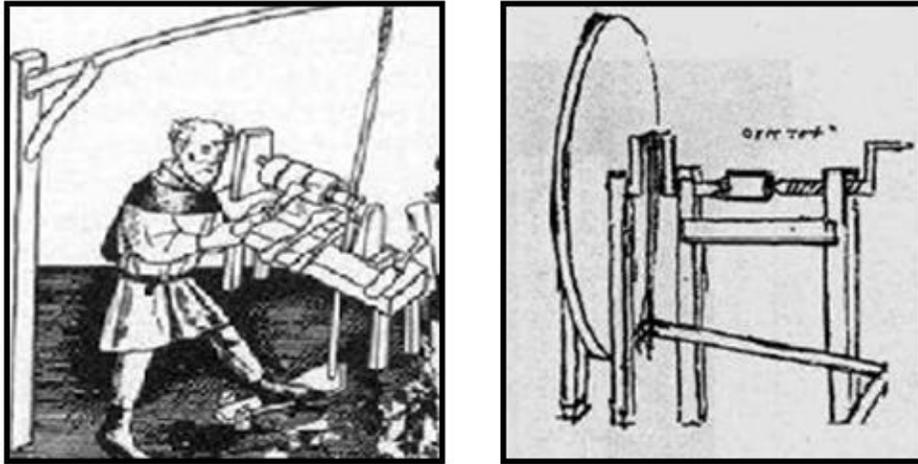
Actualmente existen evidencias arqueológicas de que los egipcios emplearon mecanismos rotatorios formados por palos y cuerdas para realizar taladros [I.9]. Gracias a los estudios realizados en la arqueología se sabe hoy que la práctica del uso de un torno se hacía hace más de 1000 años a.C. y se conoce que en el antiguo Egipto del siglo III d.C. se realizaban operaciones de cilindrado por los artesanos de esa época. Para finales de la Edad Media la operación de torneado a arco fue muy frecuente en Europa. El movimiento rotativo del eje del torno se obtenía mediante un arco cuya cuerda se envolvía en un torno a un eje, el cual lo accionaba un operador con su pie y sus manos sujetaban la herramienta. Este tipo de torno aún se utiliza en la India por los joyeros [I.9].

La concepción de nuevas máquinas-herramienta sofisticadas se llevó a cabo primeramente en Inglaterra con la invención de la máquina de cilindrado por *John Wilkinson* en 1797 y el torno con cambios de velocidades de *Henry Maudslay* en 1797 [I.10]. Posteriormente les tocó a los norteamericanos desarrollar el diseño de las máquinas-herramienta durante el siglo XIX.

Con la invención de la máquina de vapor, la industrialización de la producción empezó. La utilización masiva de las máquinas-herramienta en el siglo XIX hizo posible la fabricación de piezas de gran precisión en grandes cantidades [I.10].

La aparición de materiales abrasivos artificiales a finales del siglo XIX hizo la realización de nuevas máquinas-herramienta y en el siglo XX se desarrollaron nuevas mejoras de estas máquinas, particularmente en el desarrollo de la automatización de las tareas controladas por sistemas electrónicos e informáticos [I.11].

También se desarrollaron nuevas técnicas no convencionales como el mecanizado electroquímico y ultrasónico. Actualmente el desarrollo de las máquinas-herramienta sigue la tendencia de llegar a altas velocidades de corte en el maquinado de metales [I.12].



**Figura I.4.-**Torno alemán de 1400 (izquierda) y dibujo de *Leonardo Da Vinci* de un torno (derecha)

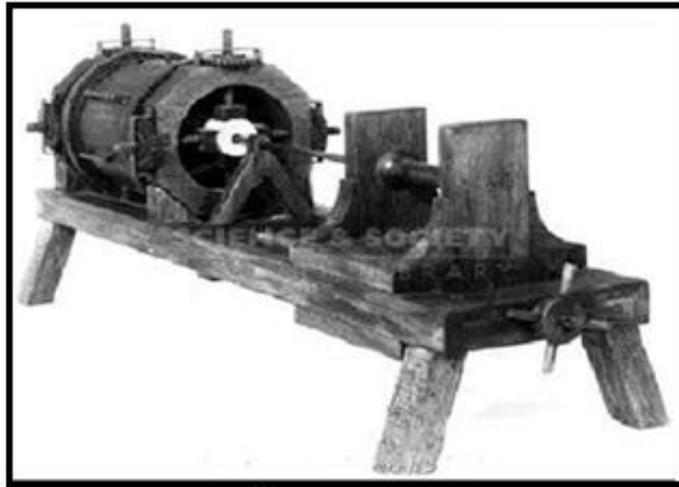
### **I.2.1.-Pioneros del proceso del mecanizado**

Una de las primeras máquinas para el corte de metales es el torno de *Pértiga*, que se inventó alrededor de 1250. A principios del siglo XV se diseñó un torno con transmisión por correa y accionamiento mediante una manivela. Durante ésta época se produjeron avances como el diseño de un torno para roscar, por *Leonardo Da Vinci* [I.13].

La construcción de una máquina cepilladora en 1550 por *Marx Lobsinger*, la introducción del contrapunto en el torno, el apoyo de las herramientas y el mandril alrededor de 1568, y también el diseño de un torno con carro porta herramientas conocido como torno de *Vaucason* en 1760 [I.14].

Algunos autores consideran que las primeras máquinas-herramienta fueron las mandrinadoras de *John Wilkinson* [I.14], construidas alrededor de 1774.

La energía consumida por estas máquinas perforadoras era suministrada por medio de un accionamiento hidráulico y gracias al invento de tales máquinas, no habría sido posible fabricar la máquina de vapor de *James Watt* en Inglaterra alrededor de 1763, ya que presentaba el problema de que una de las superficies interiores del cilindro presentara la precisión suficiente para que el vapor no se escapara por la parte lateral del pistón, fue entonces cuando apareció la máquina mandrinadora de *John Wilkinson*, ya que anteriormente no existían métodos adecuados para obtener tolerancias tan estrechas como las requeridas por la máquina de vapor de *James Watt*, [I.14].



**Figura I.5.-** Torno construido por *Leonardo Da Vinci*

Después de los diseños elaborados por *Leonardo da Vinci* en el siglo XV y *Besson* en 1569, *Henry Maudsley* desarrolló el primer torno cortador de tornillos en Inglaterra alrededor de 1800 [I.15]. También se considera que la primera máquina cepilladora fue hecha por *Roberts* en 1817, pero en realidad esta categoría corresponde a la máquina fabricada por *Eli Whitney* en los Estados Unidos en 1818. En 1835, *Whitworth* fabricó un taladro de columna y en 1836 *James Nasmyh* diseñó la primera máquina limadora. El primer torno automático fue construido por *Shipe* en 1842 [I.15]. Así, la máquina de vapor permitió automatizar el movimiento de avance de las herramientas, haciendo posible lograr las operaciones de roscado con una precisión mucho mayor.

En 1846 *James Nasmyh* construyó una máquina de taladrar que hizo posible la ejecución de agujeros de gran precisión y en 1851 *Cocquilhat* publicó el primer trabajo científico sobre el corte de metales, estableciendo las primeras relaciones entre energía consumida y material separado en el taladro [I.16].

En 1860 *Moseley* fabricó la primera rectificadora cilíndrica [I.16] y *Joessel* llevó a cabo las primeras pruebas sobre velocidades de corte y ángulos de filo recomendables para procesos de mecanizado, basándose en la relación entre la cantidad de material separado y la energía absorbida [I.17]. En 1861 la firma *Brown y Shape* construyó la primera fresadora universal. En 1871 se empezaron a utilizar herramientas de acero aleado y en 1891 *Acheson* descubrió el primer abrasivo artificial, el carburo de Silicio [I.17].

Después de los primeros estudios sobre la formación de viruta, realizados por *Time* en 1870 y los estudios sobre la formación de viruta como un proceso de deformación plástica así como la influencia de los lubricantes, llevados a cabo por *Mallock* en 1881, *Zovrykin* en 1893 efectuó un estudio sobre la geometría de la viruta y de las fuerzas de corte [I.18].



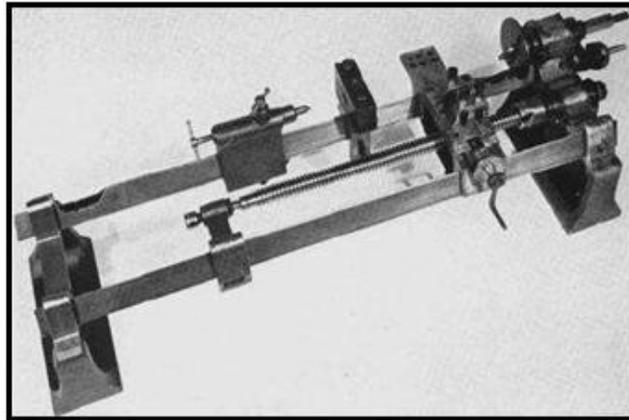
**Figura I.6.-** Máquina de cilindrado interior de *Wilkinson*

Posteriormente en 1878, *Tresca* publicó su trabajo sobre plasticidad de un corte de metal, donde se dio una idea más general para la construcción de una herramienta de corte para realizar una profundidad de corte más adecuada [I.18]. *Tresca* se dio cuenta que los cortes finos causaban más deformación plástica que cualquier otro tipo de corte y observo que la examinación minuciosa de los cortes era de gran importancia. En 1881 *Mallock* determinó que la fricción entre la viruta y la herramienta era de gran importancia en la determinación de la deformación en la viruta, señaló que los lubricantes actuaban como medio de reducción de la fricción entre la viruta y la herramienta y además escribió las ecuaciones de la cantidad de trabajo realizado por el corte interno de la fricción entre la viruta y la herramienta dos parámetros [I.19].

Las investigaciones de *Tresca* y *Mallock* [I.20] introdujeron dos de los principales parámetros de la teoría del corte de metal, a saber, la primera, la plasticidad y la segunda, la importancia de la interacción de la fricción entre la viruta y la herramienta.

En 1878 *Tresca* publica su artículo en donde describe las pruebas hechas previamente y muestran hasta un 94% de conversión del trabajo en calor en un proceso de forjado y explícitamente vincula su discusión a la labor de *Joule* [I.21]. En 1898 la sociedad *Pratt-Whitney* construyó un torno automático con cargador automático de piezas y la primera brochadora fue construida en 1899 por *Smith* y *Coventry* [I.21].

En 1898 *Taylor* y *White* fabricaron las primeras herramientas de acero rápido y en 1906 se mejoraron las propiedades de estas herramientas con la adición de *Vanadio* [I.22]. En 1907 *Taylor* y *White* publicaron el trabajo *On the art of cutting metals* [I.22] y en 1925 *Schlesinger* llevó a cabo la medición de las fuerzas de corte y estableció normas para la verificación de máquinas-herramienta. Un año después, en 1926, *Hebert* demostró que la formación de la viruta está unida a un proceso de cizallamiento [I.23].



**Figura I.7.-** Torno con cambio de velocidad de *Henry Maudslay*.

En el mecanizado, la importancia del calentamiento de la herramienta para su vida útil comenzó prácticamente por los metalurgistas [I.23]. Una serie de desarrollos a partir de la década de 1860 hasta principios de los 1900, donde se vio la introducción de nuevas herramientas de aleaciones de acero, con mayor dureza a altas temperaturas que permitían a su vez más altas velocidades de corte

con producciones a mayor escala. Por lo tanto, los fundamentos de la teoría y la práctica del mecanizado fueron depositados alrededor de 1870 y 1905 [I.24].

En 1930 la firma alemana *Krupp* comenzó a fabricar herramientas de metal duro o carburo sinterizado. Las herramientas estaban constituidas por carburo de *Tungsteno* o compuestos similares que no se encuentran directamente en la naturaleza sino que se obtienen por metalurgia de polvos. El carburo de *Tungsteno* fue fabricado por primera vez a finales del siglo XIX por el francés *Henri Moissan*, pero su importancia tecnológica no fue apreciada hasta dos décadas después [I.21].

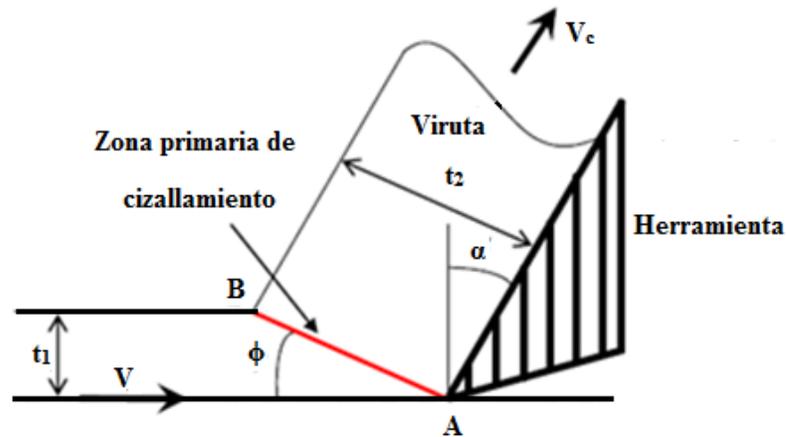


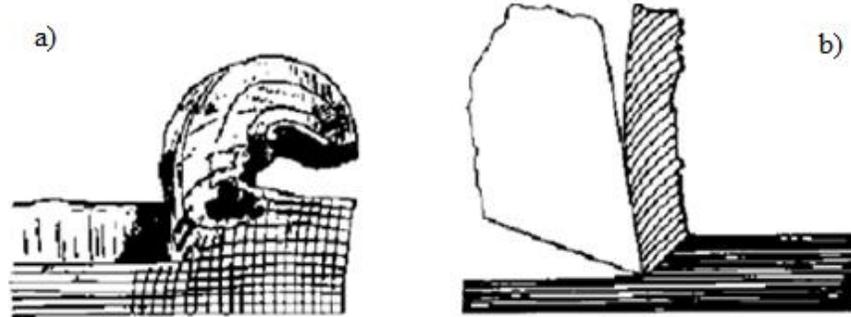
Figura I.8.- Modelo de corte ortogonal según *Merchant*

En 1940 se estableció la teoría de *Ernst y Merchant* sobre el corte de los metales, mientras *Palmer y Oxley* publicaron *Mechanics of the orthogonal machining* [I.25]. En 1943, *Lazarenko* descubrió el mecanizado por electroerosión. Así, la primera etapa predictiva del estudio de corte de metal comenzó alrededor de finales de la década de 1930 y a mediados de la década de 1940 [I.26].

Las necesidades primordiales de la segunda guerra mundial pudieron haber influido en el tiempo, probablemente en la publicación y también en los desarrollos, pero también originó oportunidades para llamar la atención de personas capaces para resolver problemas prácticos sobre la plasticidad del metal.

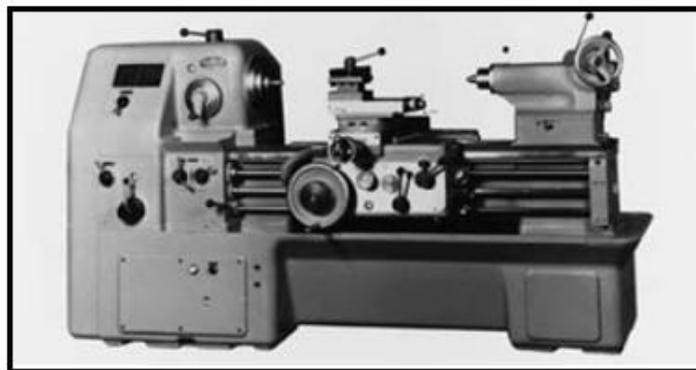
Uno de los factores que ha influido indudablemente en el desarrollo de los procesos de mecanizado ha sido el estudio y desarrollo de nuevos materiales para herramientas y que son capaces de

aumentar la velocidad de corte, así como de trabajar con materiales de propiedades mecánicas aún más exigentes.



**Figura I.9.-** Observación sobre la formación de viruta. a) Tresca, b) Mallock.

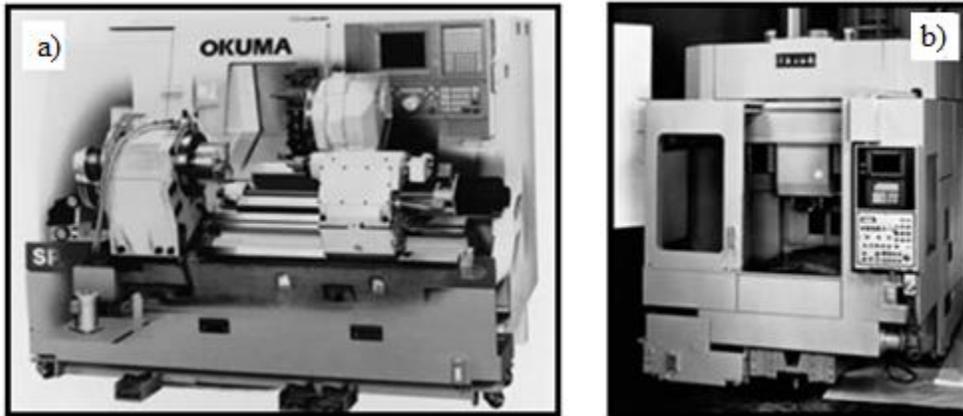
Para 1955, se empezaron a utilizar las primeras herramientas con recubrimiento cerámico. En la mayoría de las máquinas-herramienta actuales y empleadas anteriormente responden al mismo diseño básico de las versiones antiguas que se desarrollaron durante los dos últimos siglos. El desarrollo tecnológico de los circuitos electrónicos permitieron una gran capacidad para los ordenadores desarrollándose máquinas-herramienta de control numérico y en la década de 1950 se crearon los centros de mecanizado, máquinas-herramienta de control numérico capaces de llevar a cabo tareas de varias operaciones de corte [I.27].



**Figura I.10.-** Torno construido en la década de 1950

La aparición de nuevos materiales con mejores propiedades como la dureza y resistencia hacen indispensables el empleo de procesos de mecanizado no convencional, así tales procesos como el mecanizado ultrasónico, mecanizado por electroerosión y el corte por chorro abrasivo, entre otros, permiten la obtención de geometrías complejas en donde las máquinas-herramienta convencionales no las podrían lograr, tales como, el torno, la fresadora y la rectificadora [I.28].

En la actualidad los procesos de mecanizado en general están siendo sometidos a un estudio exhaustivo de características, tales como; la fuerza de corte y los materiales para herramientas que permitan mejorar la productividad del proceso sin perjudicar el acabado de la superficie mecanizada del material a trabajar [I.29], así como determinar la influencia de las fuerzas de corte en las vibraciones de las máquinas-herramienta, además de establecer la relación entre los mecanismos de desgaste de la herramienta y las condiciones de corte para diseñar nuevas herramientas que permitan disminuir las tolerancias dimensionales y mejorar las condiciones de mecanizado de materiales con mejores propiedades mecánicas [I.30].



**Figura I.11.-** Máquinas-herramienta de control numérico. a) Torno, b) Fresadora.

### **I.2.2.- Primeros análisis numéricos del proceso de mecanizado**

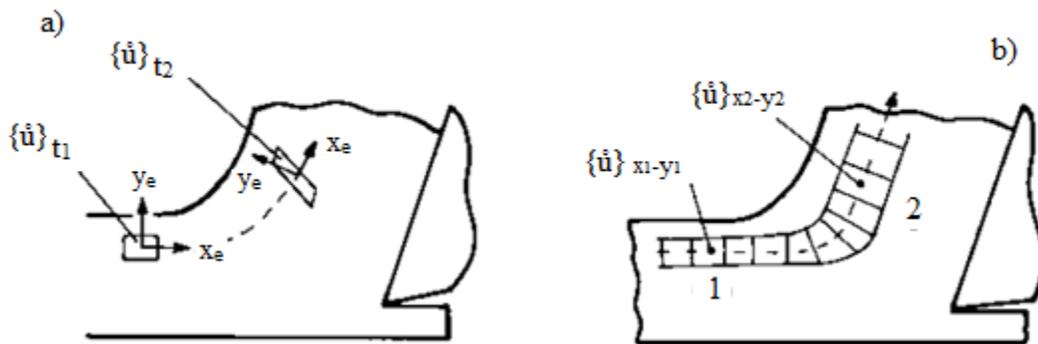
El principio fundamental para un análisis numérico fue el análisis de elementos finitos, en el que las variables del problema se pudieron determinar con exactitud por un conjunto de elementos finitos [I.31]. Estas variables se determinaron para ser evaluadas en un número determinado de puntos: los nodos de los elementos. Entre los nodos, los valores de las variables, o las cantidades derivadas de ellas que se determinaron por interpolación [I.31]. Para lograr un análisis numérico más exacto, se requirió conocer el comportamiento de las variables involucradas, lo que condujo a la definición de mayado. Esto fue la base fundamental para los dos criterios de mayado; método *Lagrangiano* y *Euluriano* [I.32].

- Método *Lagrangiano* [I.32].- Al principio, la modelización del proceso de corte ortogonal se basaba en la formulación *Lagrangiana*, donde la deformación de la malla está directa y únicamente relacionada con la deformación del material solicitado.

Esta formulación, consiste en fijar la atención sobre una porción muy pequeña del flujo en movimiento, es decir, que si seguimos a la partícula en movimiento, la cual ocupa un lugar en determinado tiempo y la relacionamos con su vector de posición, se tendrá la descripción completa de cada uno de los puntos del flujo plástico.

- Método *Euleriano* [I.32].- Este método fija la atención en un punto en el espacio, ahora interesa conocer las características del flujo como velocidad, densidad, temperatura, etc.; de las partículas que pasen por ese punto como función del tiempo (nótese que no se está siguiendo una partícula como en el método *Lagrangiano*). Si se hace lo mismo para todos los puntos del espacio que ocupa el flujo, se tiene una descripción completa del flujo. Este método no se tuvo tantos problemas para la redefinición del mayado.

En el caso de la representación de *Euler*, la atención se centra en como las velocidades varían de elemento a elemento (por ejemplo elementos 1 y 2) al mismo tiempo. En la representación de *Lagrange*, la atención se centra en como la velocidad de un determinado elemento varía con el tiempo, como se muestra en la siguiente figura [I.33].



**Figura 1.12.-** Flujos plásticos. a) Método *Lagrangiano*, b) Método *Euleriano*.

Los primeros análisis y modelos numéricos se remontan a los trabajos hechos por *Zienkiewicz* [I.34] y *Kakino* [I.20] ambos publicados en 1971. Pero, son *Shirakashi* y *Usui* quienes han desarrollado los primeros modelos numéricos termo-mecánicos con un comportamiento termo-visco-plástico para el material de la pieza [I.35], utilizaron un programa iterativo para la formación de la viruta e implementaron una condición de fricción entre la viruta y la herramienta.

Gracias al desarrollo de las capacidades de cálculo a partir de 1980, se ha podido construir los primeros modelos con base del Método de Elementos Finitos, llevando a cabo análisis globales del corte ortogonal [I.35]. *Strenkowski* y *Carrol* [I.36] fueron los pioneros de la modernización numérica del régimen estacionario de corte realizando una simulación de la formación de una viruta discontinua basada en un criterio de deformación plástica. Más tarde con el fin de solventar los problemas numéricos relacionados con las condiciones extremas propias a la formulación de la viruta, *Marusich* y *Ortiz* [I.36], introdujeron en las simulaciones nuevas técnicas numéricas de adaptabilidad del mallado. Se trata de un software que gestionan la operación de remallado del modelo para optimizar la geometría de la malla, particularmente, cerca del filo del corte, con el fin de mejorar el fenómeno de separación del material.

Pero como cada vez hay más estudios publicados sobre el tema, entonces para definir la malla del modelo se tenía ya una nueva formulación híbrida llamada *ALE* (*Arbitrary Lagrangian Eulerian*) [I.37]. Una de las principales ventajas de esta formulación es que permite eliminar los problemas numéricos relacionados con la distorsión excesiva de los elementos de la interface obtenidos a causa de las muy altas deformaciones alcanzadas durante el cálculo, sin recurrir a un costoso programa iterativo de remallado automático [I.38]. Pero sin duda la principal ventaja de la formulación *ALE* es que la separación del material al nivel del filo de corte se define geoméricamente al construir el modelo, y eso sin tener que definir ningún criterio de separación de material (siempre elegido de forma arbitraria), esto tiene la consecuencia de poder considerar unos niveles de fricción realistas entre la viruta y la herramienta, siendo una condición absolutamente necesaria para obtener y comprender los mecanismos que controlan el proceso de corte [I.38].

### **I.3.- Planteamiento del problema**

Los procesos de mecanizado por remoción de material están muy extendidos en la industria, las operaciones de montaje y desmontaje de dispositivos de sujeción que se hacen en la industria normalmente son ajustes inmediatos, basados en la experiencia del operador que generan pérdidas de tiempo y mala calidad del producto, ya que depende de la creatividad de cada uno de los operarios, por lo que la cantidad de desecho industrial producto de la rebaba producida por la transformación de la pieza mecanizada es de considerable porcentaje de la pieza original.

En la actualidad es imprescindible la utilización de sistemas de sujeción (de bajo perfil) para la mejora y rapidez de la producción y contar con operaciones de remoción con una mínima pérdida de material, repercutiendo en la economía de la industria. Un análisis sobre el efecto que tienen los sistemas de sujeción (de bajo perfil) en el mecanizado de materiales es relevante para determinar las condiciones de trabajo de tales sistemas y poder establecer una técnica que permita realizar el maquinado sin mucha pérdida de material que sería de gran impacto económico dentro de la industria metalmeccánica.

#### **I.4.- Sumario**

En éste capítulo se presentó la literatura que hace referencia al principio de la historia misma de la humanidad, ya que con ésta, surge la necesidad de las máquinas para la facilidad y comodidad de nuestras vidas cotidianas. Los primeros trabajos de remoción de material a partir de arcos y tornos de madera a finales de la edad media en Europa. A partir de la revolución industrial, la utilización masiva de máquinas que podían conformar diversas formas a ciertos materiales, el cual les denominaron máquinas-herramienta, e hizo posible que se continuara el desarrollo sofisticado de tales máquinas. Con la aparición nuevos materiales abrasivos artificiales a principios del siglo XX se hicieron mejoras y las tareas se controlaron por sistemas electrónicos, creándose la llamada automatización.

El estudio de la formación de la viruta tiene sus orígenes a partir de los años de 1800, pero no fue sino hasta el año de 1940 que *Ernst y Merchant* sentaron las bases sobre el corte de metales y los primeros análisis numéricos del proceso del corte de metal se realizaron por parte de *Zienkiewicz y Kakino* en 1971.

Gracias al desarrollo tecnológico de los ordenadores en 1980, se lograron construir los modelos a base del método del elemento finito por parte de *Strenkowski y Carrol*. Más tarde con el fin de solventar los problemas numéricos relacionados con las condiciones extremas propias de la viruta se introdujeron nuevas técnicas numéricas de adaptabilidad del mallado, en dónde al principio fue la formulación Lagrangiana y posteriormente la formulación híbrida llamada *Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE*, dónde ésta formulación, repercute al considerar los niveles de fricción reales entre la viruta y la herramienta.

**I.5.-Referencias**

- 1.- Frits, J. J., *Dimensional Analysis for Economist*, Amsterdam. North-Holland Publishing Company, pp 21-22, 1967.
- 2.- *World Machine Tool Output & Consumption Survey*, Ed. Gardner publications Inc., pp 47-50, 2011.
- 3.- Shaw, M. C., *Metal Cutting Principles*, Oxford University Press, Ed. London, pp 12-14, 1984.
- 4.- Hitomi, K., Manufacturing systems engineering, *International Journal Production Research*, Vol. 20, pp 55-57, 1979.
- 5.- Dieter, G. E., *Engineering Design*, Ed. McGraw-Hill, pp 23-25, 1991.
- 6.- Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T. y Yamane, Y., *Metal Machining Theory and Applications*, Ed. Science Publications, pp 145- 146, 2000.
- 7.- Schultz, H., *The History of High-Speed Machining*, Annals of the CIRP, Vol. 50, pp 212-215, 1992.
- 8.- Davim, J. P., *Machining Fundamental and Recent Advances*, Ed. Springer-Verlag, pp 231-233, 2008.
- 9.- Krar, S. y Gill, A., *Exploring Advanced Manufacturing Technologies*, Ed. Industrial Press Inc., pp 44-45, 2003.
- 10.- Beddros, J. y Bibbly, M. J., *Principles of Metal Manufacturing Processes*, ISBN 0 340 731621, pp 24-25, 2000.
- 11.- Edwards, L. y Endean, M., *Manufacturing With Materials*, ISBN 0 340 731621, pp 17-20, 1990.
- 12.- Faura, F. y López, J., *Fundamentos de Fabricación*, Ed. ICE-Universidad de Muecia, pp 12-13, 1998.
- 13.- Jaspers, S., *Metal Cutting Mechanics and Material Behavior*, Ed. Technische Universiteit Eindhoven, pp 102-104, 1999.
- 14.- Chevalier, A. y Bohan, J., *Tecnología del Diseño y Fabricación de Piezas Metálicas*, Ed. Limusa, pp 17-19, 1998.
- 15.- Tresca, H., *On Further Applications of the Flow of Solids*, Mechanical Engineering, pp 301-306, 1878.
- 16.- Reklaitis, G. V., Ravindran, A. y Ragsdell, K. M., *Engineering Optimization. Methods and Applications*, JohnWilley & Sons, Nueva York, pp 191-194, 1983.

- 
- 
- 17.- Stabler, G. V., The chip flow law and its consequence, *International. Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, pp 243-245, 1964.
  - 18.- Mallock, A., *The Action of Cutting Tools*, Proceedings the Royal Society, Vol. 409, pp 127-129, 1881.
  - 19.- Stabler, G. V., *The Fundamental Geometry of Cutting Tool*, Proceedings. of Institution. of Mechanical Engineers, Vol. 165, pp 14-16, 1951.
  - 20.- Kakino, Y., Analysis of the mechanism of orthogonal machining by the finite element method, *Journal of the Japan Society Prediction in Engineering*, Vol. 37, No. 7, pp 503-506, 1971.
  - 21.- Steve, Krar., Stephen, F. y Gill, A., *Exploring Advanced Manufacturing Technologies*, Industrial press Inc., pp 44-46, 2003.
  - 22.- Taylor, F. W., *On the Art of Cutting Metals*, Trans. ASME 28, pp 31-32, 1907.
  - 23.- Bediaga, I., Hernández, J., Muñoa, J., Memorias del XV Congreso Sobre Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación, *Maquinado de Alta Velocidad*, Palacio de Miramar de San Sebastián, España, pp 38-40, 2003.
  - 24.- Zorev, N. N., *Interrelationship Between Shear Process Occurring Along Tool Face and Shear Plane in Metal Cutting*, American Society of Mechanical Engineers, pp 22-25, 1963.
  - 25.- Merchant, M. E., Mechanics of the metal cutting process I, *Journal of Applied Physics*, Vol.16, pp 268, 1945.
  - 26.- Nakayama, K., Chip form geometry-study on the form of chip in metal cutting (Part 1), *Journal of the Japan Society Prediction in Engineering* , Vol. 38, pp 34-37, 1972.
  - 27.- Toni, A. y Tonchia. S., Manufacturing flexibility: A literature review, *International Journal of Production Research*, Vol.36, pp 220-223, 1998.
  - 28.- Marusich, T. D. y Ortiz, M., Modeling and simulation of high-speed machining, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 38, pp 3675-3678, 1995.
  - 29.- Cheriguene, R., *Estudio Numérico de los Fenómenos de Contacto en el Mecanizado*, Tesis Doctoral, Leganés, pp 56-57, 2009.
  - 30.- Shigley, J. E. y Mischke, C. R., *Diseño en Ingeniería Mecánica*, Ed. McGraw Hill, pp 57, 2000.
  - 31.- Shirakashi, T. y Usui, E., Simulation analysis of orthogonal metal cutting process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, pp 335-337, 1974.
  - 32.- Movahhedy, M. S., Gadala, M. S. y Altintas, Y., Simulation of the orthogonal metal cutting process using an arbitrary Lagrangian–Eulerian finite-element method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, No. 2, pp 267-268, 2000.

- 
- 
- 33.- Jonhson, K. L., *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, pp 45-47, 1999.
- 34.- Zienkiewicz, C., *The Finite Element Method in Engineering Science*, Ed. McGraw-Hill, pp 55-57, 1971.
- 35.- Mackerle, J., Finite element analysis and simulation of machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.43, pp 74-76, 2003.
- 36.- Nakayama, K., Ogawa J. M. y Takeyama, H., Basic rules on the form of chip in metal cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 27, pp 17, 1978.
- 37.- Lee, E. H. y Shaffer, B. W., The theory of plasticity applied to a problem of machining, *Journal of Applied Mechanics*, pp 15–16, 1951.
- 38.- Ernst, H., *Physics of Metal Cutting*, Symposium of Machining of Metals, Trans. American Society of Metals 1, pp 105-107, 1938.

CAPÍTULO II  
FUNDAMENTOS  
TEÓRICOS

## II.1.- Introducción

El mecanizado es un proceso mecánico que consiste en la fabricación de piezas de gran precisión y también es un proceso de deformación, en el que se tiene lugar, fuertes deformaciones plásticas a grandes velocidades [II.1]. Los procesos de mecanizado por arranque de viruta están muy extendidos en la industria y dentro de la familia de estos procesos, se destacan, por su importancia los tres más comunes en la industria, que son, el torneado, el fresado y el rectificado [II.2]. Su diferencia estriba en el movimiento relativo entre la herramienta y la pieza, este movimiento se determina por un movimiento principal o movimiento de corte y por un movimiento secundario o movimiento de avance. En tales procesos, el tamaño de la pieza original circunscribe la geometría final y el material sobrante es arrancado en forma de viruta.

Los procesos de mecanizado por arranque de viruta comparado con otros métodos para conseguir la geometría final se observan ventajas y desventajas según los casos [II.3]. Algunas de las ventajas de este tipo de procesos de mecanizado son:

- Pueden realizarse una amplia variedad de formas.
- Se consigue texturas superficiales convenientes para los distintos diseños.
- Se consigue una alta precisión dimensional en sus operaciones.
- Son procesos fáciles de automatizar siendo muy flexibles.
- Poca variedad de herramientas.
- Requiere poco tiempo de preparación.

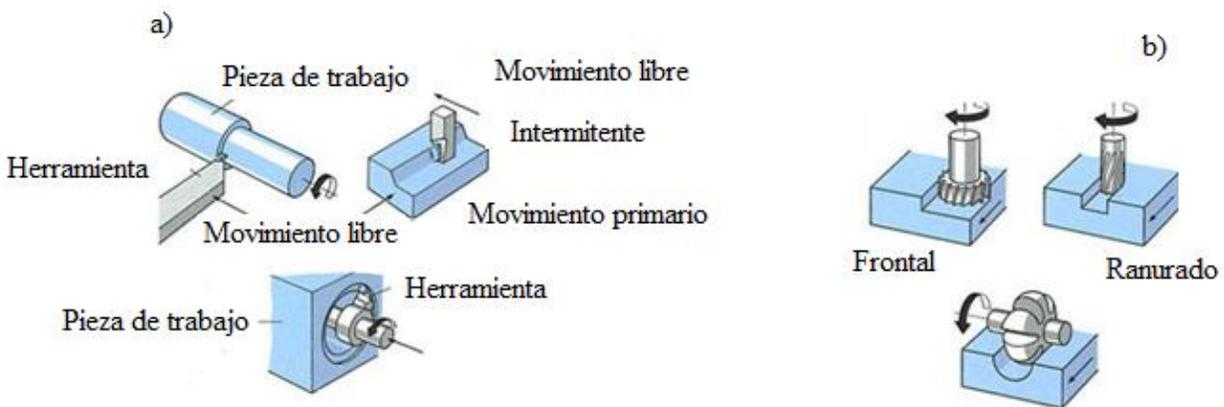
Por otra parte, las desventajas respecto a otros procesos de fabricación son:

- Genera material de desecho en muchos casos no reciclable.
- Los tiempos de producción son elevados.
- Requieren una mayor energía del proceso.
- El tamaño de las piezas está limitado al permitido por las máquinas-herramienta.
- Son poco económicos cuando el tamaño de lote es muy elevado.

## II.2.- Generación de superficies

La geometría de la pieza se realiza a través de la combinación de dos elementos fundamentales que son: la geometría de la herramienta, y el patrón de movimientos relativos entre la pieza y la

herramienta [II.4]. Las máquinas-herramienta son las encargadas de generar esos movimientos relativos aportando la energía necesaria al proceso. El principio de la generación de las superficies en éste tipo de procesos es el bidimensional, ya que la geometría de la herramienta sólo tiene información de un punto o elemento de la superficie de la geometría final. Esto tiene como ventajas la flexibilidad para generar variedad de superficies con la misma herramienta [II.5]. De los dos movimientos relativos mínimos para generar la superficie, suele haber uno que es el que consume la mayor parte de la potencia de la máquina. Estos movimientos pueden ser a su vez lineales o circulares, pueden llevarlos las herramientas o las piezas indistintamente [II.6]. Esto hace que haya mucha variedad de máquinas-herramienta para generar superficies.



**Figura II.1.-** Generación de la geometría. a) En un sólo punto. b) Múltiples puntos.

### II.3.- Formación de viruta

Para el estudio de la formación de la viruta se supondrá que la herramienta es un diedro que se desliza sobre la superficie que está generando [II.7]. La superficie está por debajo de la misma superficie de la pieza original, de tal forma que su movimiento provoca el desprendimiento de la viruta del material base. La interacción entre los dos planos del diedro es una recta que es el filo S de la herramienta [II.7]. Las dos caras del diedro son:

- 1) Cara de incidencia o flanco de la herramienta  $A_\alpha$ . Es el plano más cercano a la superficie generada.
- 2) Cara de desprendimiento  $A_\phi$ . Es el plano por donde se desliza la viruta.

La herramienta se desliza sobre la superficie con una velocidad  $V_c$  que es la velocidad de corte, se puede definir como la velocidad instantánea del movimiento de corte respecto de la pieza y suele

medirse en m/min. Si esta velocidad es perpendicular al filo, se dice que el corte es ortogonal, en otro caso se dice que el corte es oblicuo [II.7].

El corte ortogonal es más sencillo de estudiar que el corte oblicuo ya que se presenta un estado de deformación plana. La superficie generada por encima de la cual se elimina el material por la cara de desprendimiento es el plano de filo  $P_s$  y viene definido por el filo  $S$  y la velocidad de corte [II.8].

La geometría del corte ortogonal viene definida por tres ángulos característicos que son de gran influencia y por la profundidad de la pasada [II.9]:

- *Ángulo de desprendimiento  $\gamma$ .*- Es el ángulo formado por la cara de desprendimiento de la herramienta y la dirección perpendicular a la superficie mecanizada. Este ángulo puede tener un sentido positivo (en sentido horario) o sentido negativo, si es en sentido contrario. Cuánto más positivo es este ángulo, menor es el rozamiento entre la viruta y la herramienta. Por el contrario cuánto más negativo es, aumenta la robustez de la herramienta.
- *Ángulo de incidencia  $\alpha$ .*- Es el ángulo formado por la cara de incidencia de la herramienta y la superficie de la pieza ya mecanizada. Si el valor del ángulo de incidencia disminuye, aumentará el contacto existente entre la herramienta y la pieza, como consecuencia aumentará también la temperatura y disminuirá la vida de la herramienta. Por el contrario, si el valor del ángulo de incidencia aumenta se debilitará el filo de la herramienta.
- *Ángulo de filo  $\beta$ .*- Es el ángulo formado por las caras de incidencia y desprendimiento de la herramienta.
- *Espesor de viruta no deformada  $a_c$ .*- Es el espesor del material que va a ser eliminado antes de sufrir deformación alguna.

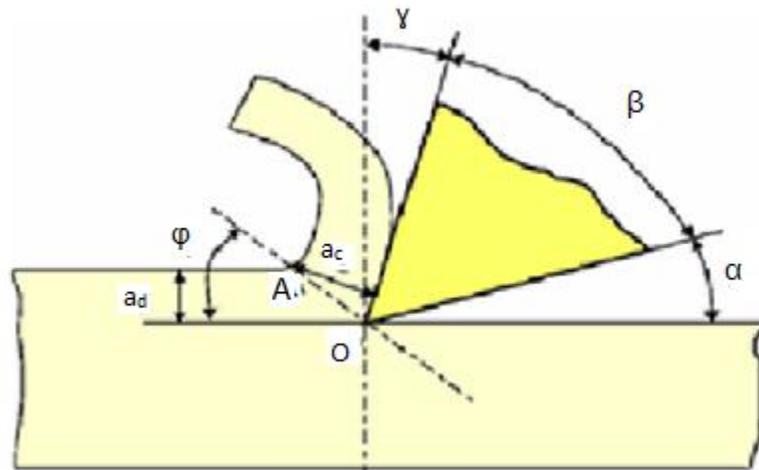
También son de gran importancia los siguientes parámetros:

- *Ángulo de deslizamiento o cizalladura  $\phi$ .*- Es el ángulo formado por la superficie de la pieza y el plano de deslizamiento. Es un plano teórico en el que se produce la deformación del material de la pieza. En rigor se trata de una zona de deslizamiento más

que de un plano propiamente dicho, sin embargo en la práctica es frecuente reducir ésta zona estrecha al plano.

- *Espesor de viruta deformada  $a_d$* .- Es el espesor del material eliminado después de haber sufrido la deformación.
- *Factor de recalcado  $z$* .- Es el cociente entre los espesores de viruta deformada y sin deformar. Es siempre mayor o igual que la unidad.

El arranque de viruta en materiales dúctiles se produce mediante la deformación plástica que ocurre en una franja estrecha llamada plano de cizalladura. El material deformado desliza sobre la cara de desprendimiento venciendo fuerzas de rozamiento elevadas [II.9].



**Figura II.2.-** Principales parámetros del corte ortogonal

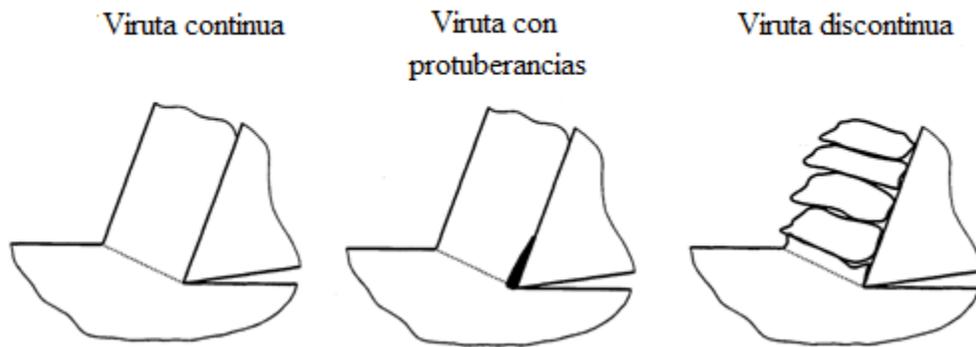
Se distinguen tres tipos básicos de viruta:

- *Viruta discontinua*.- Se produce cuando se mecanizan materiales frágiles y materiales dúctiles a velocidades muy bajas de corte. El corte se produce mediante pequeñas fracturas del material base.
- *Viruta con protuberancias o corte con recrecimiento de filo*.- Se produce en materiales muy dúctiles, o a velocidades de corte bajas. Cuando la fricción entre la viruta y la herramienta es muy alta, se produce una adhesión muy fuerte entre el material de la viruta y la superficie de la herramienta, con lo que la viruta empieza a deslizar, no directamente sobre la cara de desprendimiento sino sobre material adherido sobre ella. Este filo recrecido puede llegar a un tamaño, en el que se desprende el material adherido

sobre la pieza o sobre la viruta dejando en todo caso un acabado superficial muy deficiente.

- *Viruta continua*.- Es el régimen normal de corte y es el que mejor acabado superficial deja.

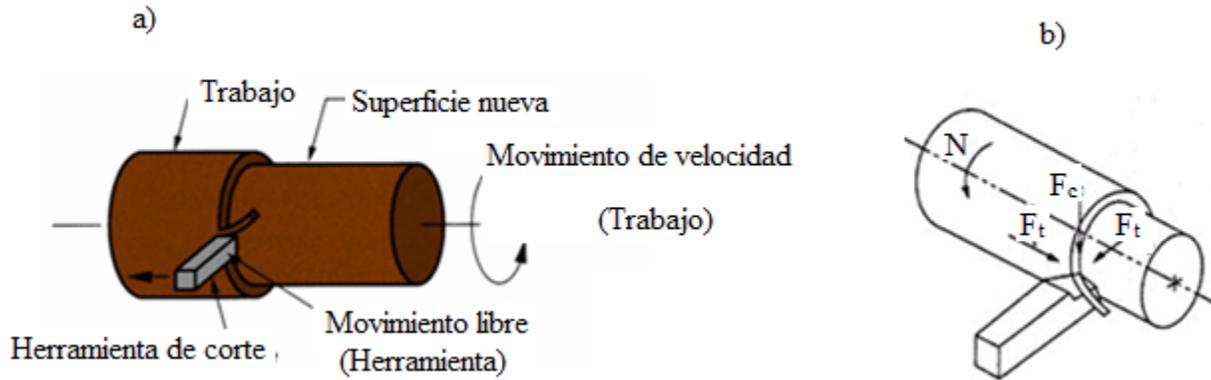
Existen materiales que pueden presentar los tres regímenes de corte citados dependiendo de la velocidad de corte tomada [II.10].



**Figura II.3.-** Tipos de formación de viruta en el corte de metal.

### II.3.1.- Torneado

El torneado, realizado con el torno, el cual es una de las operaciones más útiles en el trabajo de materiales con máquinas-herramienta, ya que éstas mismas sirven para realizar una gran cantidad de trabajos, por lo general de forma sencilla, siendo además, las máquinas más empleadas en los mantenimientos [II.11]. El torneado, es un proceso de arranque de viruta, mediante el borde o filo de la herramienta deforma cierta parte del material hasta lograr que sea separado de la pieza, a éste desbaste de material se le llama viruta. La viruta se forma en un proceso de cizalladura localizada, que se desarrolla en zonas muy pequeñas. Se trata de una deformación plástica bajo condiciones de gran tensión y alta velocidad de deformación que se genera a partir de una región de compresión radial que se mueve por delante de la herramienta cuando ésta se desplaza por la pieza. La compresión genera dislocaciones que generan endurecimiento a tal punto en que el material se fractura. Se forman grandes esfuerzos en la capa del material que se convertirá en viruta, de manera tal que, primeramente se acerque al esfuerzo de cedencia y luego al esfuerzo último del material, así se puede desprender esta pequeña cantidad de material en el tiempo deseado [II.11].



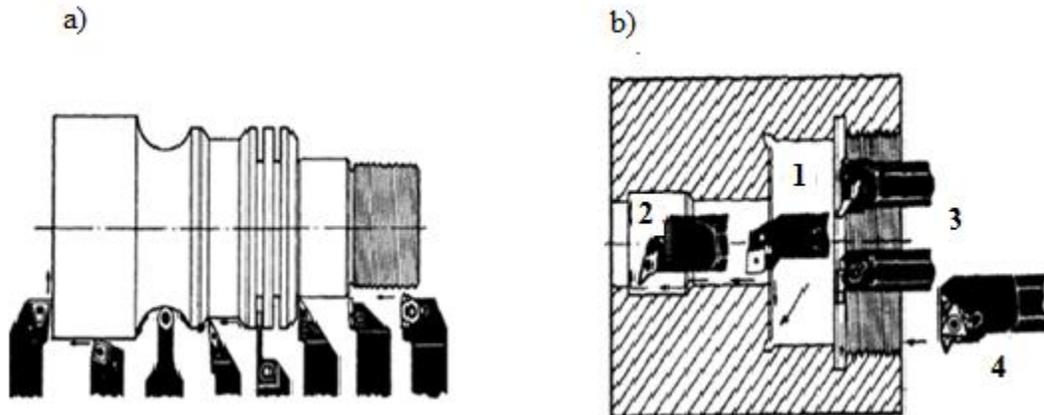
**Figura II.4.-** Torneado. a) Movimientos de corte, b) Fuerzas involucradas.

La acción de corte se lleva a cabo en el plano de corte, que es la línea imaginaria que se genera entre la viruta deformada y la no deformada, así, el ángulo que se forma es llamado *ángulo del plano de corte*. A la derecha de este plano se encuentra la viruta deformada y a la izquierda se encuentra la no deformada [II.12]. Para formar la viruta se requiere vencer la fuerza de corte y la fuerza de fricción, causante de la compresión. En el torneado, la pieza gira alrededor de su eje de revolución (movimiento de corte) y la herramienta con un único filo arranca material por cada vuelta de la pieza, desplazar la herramienta (movimiento de avance) produce un arranque de material continuo, obteniendo una superficie de revolución interior o exterior [II. 12].

Los tornos más utilizados son los de bancada horizontal donde se le imprime a la pieza, por lo general un sólido de revolución, un movimiento de rotación según su eje horizontal, constituyendo éste el movimiento principal de corte, al mismo tiempo, la herramienta de corte, sujeta por el carro porta herramienta, efectúa un movimiento longitudinal y transversal, que constituye el avance y la penetración. En el torno se pueden ejecutar una gran variedad de trabajos, siendo los principales los siguientes [II.13]:

- a) Obtención de superficies cilíndricas, tanto exteriores como interiores.
- b) Obtención de superficies planas, mediante la operación denominada.
- c) Frentado. En la cual la herramienta únicamente penetra en forma normal al eje de la pieza sin avanzar longitudinalmente.
- d) Obtención de superficies esféricas.
- e) Obtención de superficies cónicas.

- f) Obtención de superficies de sólidos de revolución de perfiles variables.
- g) Obtención de roscas de paso variable.



**Figura II.5.-** Obtención de diferentes superficies. a) Torneado exterior, b) Torneado interior.

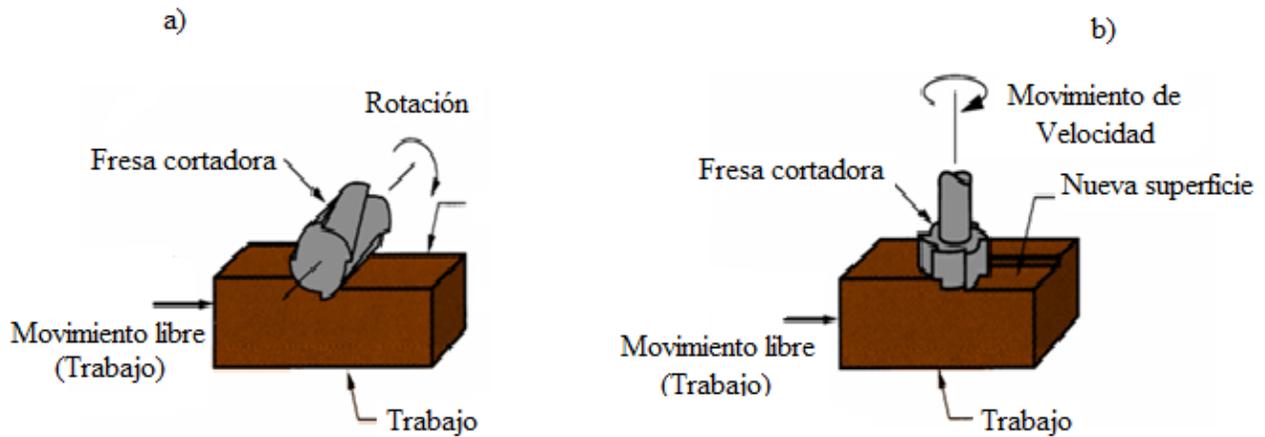
Los materiales más usados en la construcción de herramientas de corte son el acero al *Carbón*, acero rápido, que es una aleación con *Wolframio*, *Cromo* y *Vanadio* [II.14], metales que le confieren mayor resistencia al calentamiento y al desgaste, acero extrarápido o metales duros, aceros aleados con los metales ya mencionados más *Molibdeno* y *Cobalto*. Aleaciones duras, como las denominadas estelitas, carburos metálicos, conocidos con el nombre comercial de *Widia*, aleaciones no ferrosas, cerámicos y diamante [II.14].

Según sea el tipo de material de la herramienta será su ángulo de filo de corte; las herramientas de acero al *Carbón* y de acero rápido tienen los ángulos de filo de corte casi de un mismo valor ya que son de materiales similares, pero como las primeras tienen menor poder de absorción de calor, pierden el filo de corte con mayor rapidez. En general se exige en las herramientas un mínimo empleo de fuerza y una máxima velocidad de corte, lo cual se admiten en trabajos que se carezca de vibraciones [II.15].

### II.3.2.- Fresado

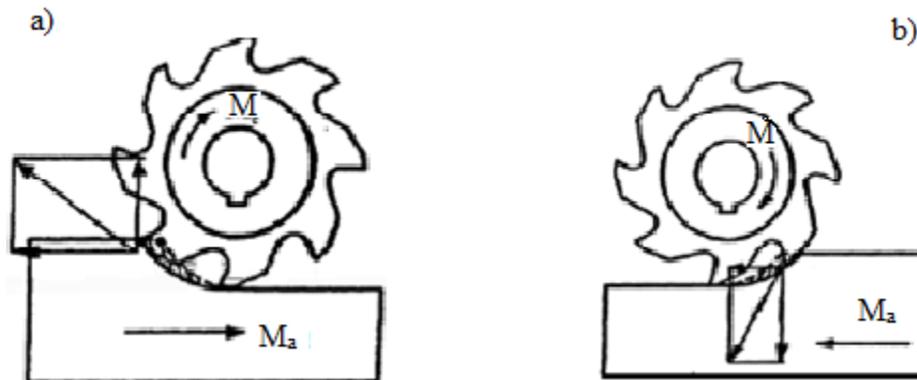
El fresado es un proceso contrario al torneado, en cuanto a movimiento se refiere, ahora la herramienta es de filos múltiples y también es la que gira (movimiento de corte), la pieza se desplaza (movimiento de avance), obteniendo una superficie de generatriz plana, aunque combinando movimiento de avance en distintos ejes, se puede conseguir casi cualquier superficie.

El fresado es una de las operaciones más utilizadas en los talleres e industria debido a la multiplicidad de trabajos que con él se pueden realizar, además de la precisión que se logra en este tipo de mecanizado [II.16]. Entre otras se puede obtener piezas de superficie planas, curvas ranuradas, dentadas, estriadas, roscadas, etc. Según la posición del husillo las máquinas fresadoras pueden ser horizontales o verticales, existiendo las denominadas universales que permiten la inclinación del carro porta pieza hasta 45° [II.17].



**Figura II.6.-** Operaciones de Fresado. a) Periférico, b) Frontal.

También existen fresadoras especiales, que son utilizadas cuando se construyen piezas en serie, las que pueden realizar, entre otras operaciones, el tallado de engranajes, fabricación de tornillos, escariados, etc. La fresa es una herramienta de ángulos de filos múltiples, dispuestos simétricamente alrededor de un eje. Es de corte intermitente ya que el corte del material se efectúa cuando actúa un diente sobre la pieza la cual disminuye cuanto mayor cantidad de dientes tenga la fresa, pero nunca puede eliminarse [II.17].

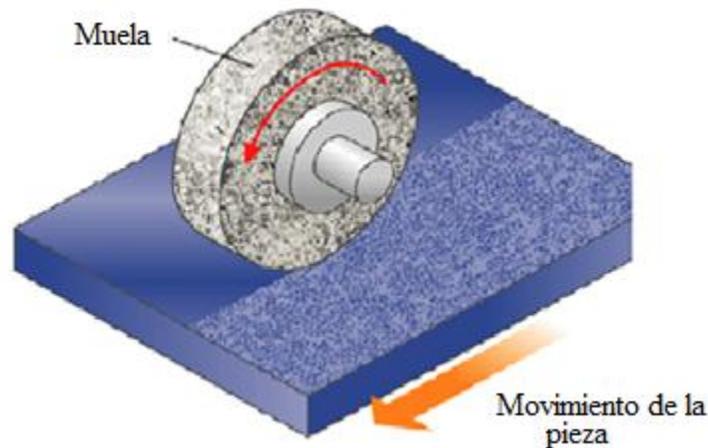


**Figura II.7.-** Tipos de fresado. a) En oposición (o hacia arriba), b) En concordancia (o hacia abajo).

El trabajo de corte en el fresado es realizado por una fuerza periférica  $P$  tangencial a la fresa, la cual deberá vencer la resistencia ofrecida por el material sobre el diente. Además aparece una fuerza  $S$  radial, soportada por el árbol porta fresa. Como resultante de  $P$  y de  $S$  actúa la fuerza  $R$  sobre el árbol porta fresa, provocando un esfuerzo de flexión compuesto [II.18].

### II.3.3.-Rectificado

El rectificado es una operación que se efectúa en general con piezas ya trabajadas anteriormente por otras máquinas-herramienta hasta dejar un pequeño exceso de metal respecto a la dimensión definitiva [II.19]. El rectificado tiene por objeto alcanzar en las dimensiones, tolerancias muy estrictas y una elevada calidad de acabado superficial; se hace indispensable en el trabajo de los materiales duros o de las superficies endurecidas por tratamientos térmicos [II.19]. Las herramientas empleadas son muelas giratorias. Las muelas están compuestas por granos abrasivos aglomerados en dispersión en un cemento que define la forma de la herramienta. Los granos representan infinitos filos que, al actuar con elevada velocidad sobre la pieza en elaboración, arrancan minúsculas partículas de material [II.20]. Este modo de trabajar indica también los requisitos que deben poseer los abrasivos, tales como la dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la rotura.



**Figura II.8.-** Herramienta muela de la rectificadora

La dimensión de los granos está vinculada a la utilización de la muela: para muelas desbastadoras se emplea grano grueso; para operaciones de rectificado se pasa de los granos medianos a los finos, hasta llegar a los polvos utilizados para el pulido.

El número índice del grosor de los granos expresa el número de hilos por pulgada contenido en el último cedazo separador atravesado (los granos más finos llegan hasta 240 hilos) [II.20]. Los aglomerantes de las muelas pueden ser cerámicos, de silicato sódico y arcilla, o elásticos. Los datos característicos de una muela son el tipo de abrasivo, su granulación (gruesa, mediana, fina o muy fina), su tenacidad (muy blanda, blanda, mediana, dura o muy dura), su estructura (cerrada, mediana o abierta) y el tipo de cemento aglomerante [II.20].

El rectificado como ya se ha mencionado, es un proceso para corregir las dimensiones y alisar las superficies de materiales duros como metales, vidrio o gemas preciosas y semipreciosas [II.21]. En el pulimentado se emplean sustancias abrasivas muy finas como colcótar, trípoli, tiza (gis), masilla pulverizada o polvo de esmeril para lustrar la superficie del material y darle un acabado liso y brillante. Para ello se utilizan discos de tela, fieltro o cuero recubiertos del material de pulimentado. Un tipo especial de disco pulimentado se fabrica con goma blanda mezclada con granos abrasivos [II.21].



**Figura II.9.-** Rectificadora de metales.

Existen muchos tipos de rectificadoras, por mencionar algunas, rectificadora cilíndrica universal, rectificadora cilíndrica de exteriores, rectificadora cilíndrica sin centros, rectificadora plana horizontal, rectificadora plana vertical y rectificadoras especiales [II.22]. La operación que se realiza con la rectificadora se llama rectificado y como se ha mencionado, tiene por finalidad corregir con precisión las irregularidades de las superficies que se han producido en las operaciones anteriores por las máquinas herramienta o tratamientos térmicos, dejándolas a la medida precisa. El movimiento de corte durante el rectificado es un movimiento rotatorio. Este es realizado por la herramienta. Durante el rectificado se trabaja con altas velocidades y el movimiento de avance

durante el rectificado es realizado por la pieza o por la herramienta; éste es un movimiento rectilíneo o rotatorio [II.23].

- *Es un movimiento rectilíneo.* Siempre que la mesa de rectificado se mueva con la pieza, como por ejemplo, en el rectificado plano horizontal o vertical.
- *Es un movimiento de rotación.* Siempre que la pieza gire durante el rectificado, como es el rectificado cilíndrico interior y exterior.
- *Es un movimiento curvilíneo.* Por ejemplo, en el rectificado de flancos de dientes en rectificadoras apropiadas para ello.

#### **II.4.- Sistemas de sujeción en máquinas-herramienta**

Una de las ramas de la manufactura que se ha visto afectada por la evolución tecnológica de las máquinas-herramienta ha sido el desarrollo de utillaje de sujeción automáticos [II.24]. Estos equipos de utillajes han gozado de una gran popularidad en las últimas décadas entre los involucrados en la optimización de las máquinas-herramienta, debido a que estos equipos permiten disminuir significativamente los tiempos de montaje y desmontaje de un proceso de fabricación, por lo que, los sistemas de sujeción específicos, mediante componentes normalizados son muy utilizados frecuentemente [II.24].

Estos dispositivos deben permitir el mecanizado completo sin operaciones de montaje/desmontaje. La descripción de los dispositivos se aplica al torno, a la fresadora y a la rectificadora, al ser estas máquinas las de mayor difusión en las empresas y talleres de mecanizado [II.25]. Los sistemas o dispositivos de sujeción son herramientas de propósitos especiales que se utilizan para producir en gran escala y que proveen los medios para sujetar rápidamente los componentes sin ningún montaje adicional. Existen dos categorías de sistemas de sujeción dentro del trabajo a realizar por las máquinas-herramienta [II.26]:

1. *Sistemas de sujeción de operación manual.* Se clasifican a su vez en diferentes grupos, como son, sujetadores de placa, sujetadores de tornillo, sujetadores de balancín, sujetadores de placa, sujetador tipo C, sujetador para borde y sujetador excéntrico. La mayoría de los dispositivos de sujeción manual son muy conocidos en las máquinas-herramienta por su gran utilización.

La función de los sujetadores se puede identificar por su uso o por su tipo. También se pueden clasificar como herramientas básicas. Así, aunque una herramienta pueda llamarse simplemente un sujetador mecánico, podría también ser definido adicionalmente como sujetador para fresar, o como sujetador mecánico tipo plato. Además, un sujetador de torno podría también ser definido como un sujetador de radio giratorio, o como un sujetador de ángulo.

2. *Sistemas de sujeción de potencia.* Son los que requieren de una fuente de alimentación, tal como los sistemas hidráulicos, neumáticos, magnéticos o por torque.

Un sistema de sujeción de potencia es un sistema que trabaja mediante un fluido, energía eléctrica o alguna fuente de energía, que posee las propiedades que lo hacen especialmente útil en la transmisión de potencia [II.26]. Actualmente los sistemas de potencia hidráulicos y neumáticos han adquirido una gran importancia en la industria de la manufactura. La rapidez de producción es una de las grandes razones para que tales herramientas tecnológicas se desarrollen, y hoy existen en una gran variedad de opciones y capacidades [II.27].

Un sistema hidráulico o neumático, puede combinar los diversos componentes, tales como, el depósito, la bomba, la válvula y el motor entre sí con la tubería, tubos y acoplamientos necesarios para lograr un grado de posición, positividad y flexibilidad de control, junto con la capacidad de transmitir un máximo de movimientos en un volumen y masa mínimos [II.27]. Por lo tanto los sistemas hidráulicos y neumáticos son considerados más eficientes que los sistemas manuales.

Para el mecanizado de metales, existen varios tipos de sujeción para tal operación, incluyendo prensas hidráulicas y dispositivos neumáticos. De éstos dos, los más utilizados son las prensas hidráulicas en sus diferentes estilos, todas ellas diseñadas para posicionar y sujetar piezas de trabajo con firmeza mientras que son mecanizadas bajo diferentes especificaciones, dimensiones y tolerancias [II.27].

La sujeción magnética es otra de técnicas que recientemente ha adquirido un gran auge, asegurando una mayor flexibilidad en el mecanizado dando como resultado que los costos de preparación sean reducidos drásticamente [II.28].

Su funcionamiento es especialmente por la innovación tecnológica de la imantación permanente electrónica, la cual requiere únicamente energía eléctrica para la activación o desactivación del campo magnético. La geometría cuadrada de los polos (imanes) permite un desarrollo uniforme de las fuerzas. La sujeción está asegurada, también en trabajos de desbaste, mediante la elevada capacidad de sujeción de los imanes. La técnica de sujeción magnética ofrece la ventaja, que con una gran fuerza de sujeción sin perturbaciones de los elementos de fijación, se consigue un eficiente mecanizado en las caras [II.28].

Mediante la prolongación de los polos, los cuales se utilizan como soporte para la pieza, estos permiten la realización de una colocación rápida y precisa de varias piezas [II.29]. Lo que permite incrementar la productividad de la máquina. Para la realización de este trabajo, se considera el uso extensivo de los dispositivos de potencia, particularmente los sistemas de sujeción hidráulicos.

#### **II.4.1.- Sujeción en el torno**

Las piezas de partida pueden tener cualquier forma, normalmente son cilíndricas y las distancias entre cabezal y guías para el diámetro máximo y distancia entre apoyos para la longitud del mecanizado son diferentes [II.29].

Las poligonales de tres o cuatro lados son fáciles de sujetar en platos de tres o cuatro garras, el resto precisan sustituir el plato por placas de apoyo y bridas, las posibilidades de sujeción de las piezas son las siguientes [II.30]:

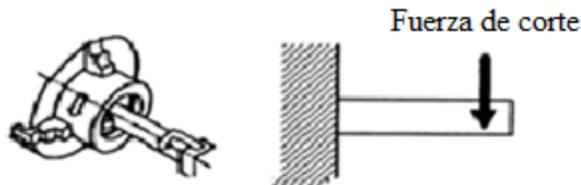
- Sujeción por mecanizado al aire, sujeta un plato a un extremo y el otro extremo al aire.
- Sujeción por mecanizado entre plato y punto.
- Sujeción por mecanizado entre puntos y sistema de arrastre.
- Sujeción por mecanizado con luneta fija o luneta móvil.

A continuación se describen brevemente los dispositivos de sujeción más comunes utilizados en la industria y talleres [II.31].

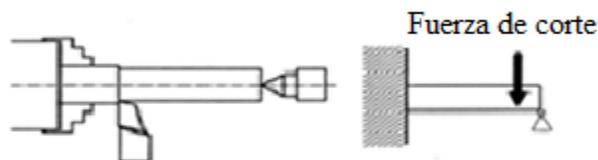
- *Plato universal de tres mordazas.*- Este plato de tres mordazas se utiliza para sujetar piezas redondas y hexagonales.- Agarra el trabajo rápidamente con una precisión de hasta unas cuantas centésimas o milésimas de pulgada.

- *El plato de cuatro mordazas independiente.*- Se pueden ajustar sus mordazas en forma independiente por medio de una llave para plato de extremo cuadrado. Se emplea para sujetar piezas que no sean redondas debido a su manejabilidad.
- *Plato de boquilla.*- Es uno de mordazas convergente; simplemente es una boquilla que se ajusta al husillo del cabezal.
- *Luneta móvil.*- Se sujeta a la base del carro y se mueve junto con él mismo. Se usa para evitar que la pieza de trabajo se flexione y se aleje de la punta de la herramienta de corte durante la operación de torneado. También se puede emplear cuando se cortan filetes de rosca sobre una pieza de material larga y delgada. Esta luneta tiene dos mordazas o un punto de soporte que sigue a la herramienta de corte.
- *Mandriles.*- Se usan para mantener entre las puntas una pieza maquinada internamente, de modo que las demás operaciones de maquinado queden concéntricas con el taladrado. El mandril al introducirse a presión en un agujero, hace posible que la pieza se monte entre los puntos.

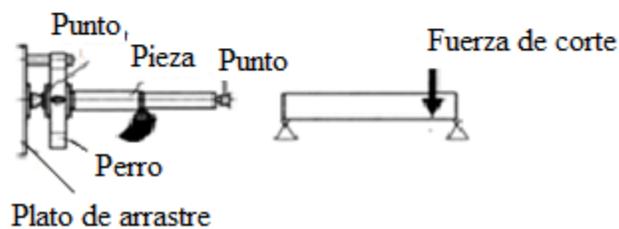
Modo I: Sujeción al aire



Modo II: Sujeción entre plato y disco



Modo III: Sujeción entre puntos



**Figura II.10.-** Modo de sujeción de las piezas en el torneado

Para las máquinas de torneado de control numérico se puede contar con variedad de dispositivos, existiendo diferentes mecanismos para la sujeción de la pieza. A continuación se mencionan algunos de ellos [II.32].

- Platos universales de dos, tres o cuatro garras autocentrables.
- Mandriles autocentrables.
- Pinzas para la sujeción de piezas cilíndricas pequeñas.
- Puntos y contrapuntos con arrastre para piezas esbeltas.



**Figura II.11.-** Mecanismos de sujeción para torno de control numérico. a) Chucks hidráulico, b) Cilindro neumático.

#### II.4.2.- Sujeción en la fresadora

Las piezas mecanizadas en la fresadora son generalmente superficies con una generatriz plana, aunque con sistemas de control numérico y herramientas de punta esférica, se pueden conseguir superficies esféricas con escalones al realizar pasadas a distancias tan pequeñas como se desee [II.33].

La sujeción de las piezas depende de la forma del material de partida y dimensiones, habiendo dos tipos de sujeción [II.34]:

- Directamente sobre la mesa, con sistemas de bridas o gatos.
- Mediante un útil realizado a medida o mediante algún accesorio:
  - Mordazas para piezas de caras paralelas.
  - Mesas magnéticas para piezas de pequeño espesor y una cara plana.
  - Platos de garra para piezas cilíndricas.

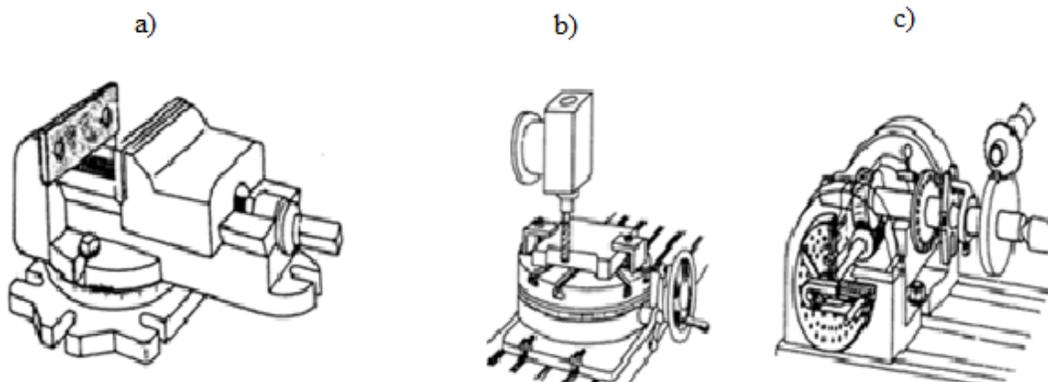
- Mesas divisoras, para añadir un movimiento de giro a la pieza.



**Figura II.12.-** Mecanismos de sujeción en la fresadora directamente sobre la mesa. a) Prensa. b) Juego de bridas.

A continuación se describe brevemente algunos de los dispositivos de sujeción más comunes [II.34].

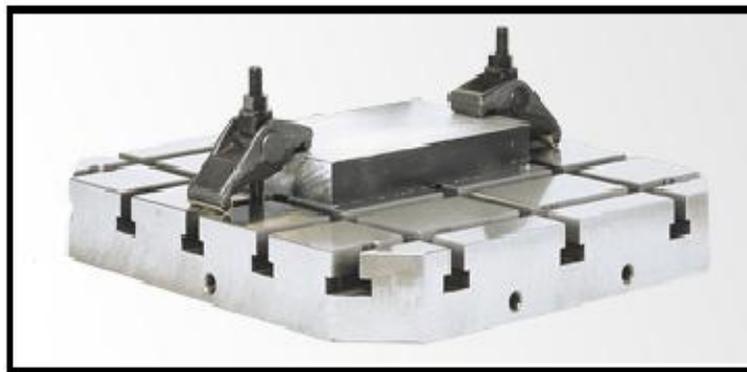
- *Bridas.*- Son piezas de acero, forjadas o mecanizadas, de forma plana o acotada y con una ranura central para introducir el tornillo de fijación. En uno de sus extremos puede tener un tornillo para regular la altura de fijación.
- *Gatos.*- Son elementos de apoyo, generalmente compuestos de un cuerpo, de un tornillo, y de una contra tuerca para bloquear el tornillo. La parte superior puede ser articulada o fija y se usan para apoyar piezas muy largas y que pueden flexionarse.
- *Calzos.*- Son elementos de apoyo. Pueden ser planos, escalonados, en “V” y regulables.
- *Escuadras.* Las caras de éstos accesorios son planas y mecanizadas. Forman un ángulo de 90°. Hay escuadras de diversos tamaños y con muchos orificios para introducir los tornillos de fijación.



**Figura II.13.-** Sujeción en la fresadora con dispositivos comunes. a) Mordazas, b) Plato vertical y c) Plato horizontal.

Las fresadoras de control numérico cuentan también con una variedad de dispositivos de sujeción, tal como los mencionados a continuación [II.35]:

- Palancas de apriete.- Mordazas mecánicas autocentrables.
- Palancas angulares de apoyo.
- Platos o mesas magnéticas.
- Mesas y dispositivos modulares de uso universal.
- Sargentos y apoyos con formas escalonadas, ajustables en altura o bloque con varias facetas de contacto, con pernos y resortes de apriete de montaje-desmontaje rápido.



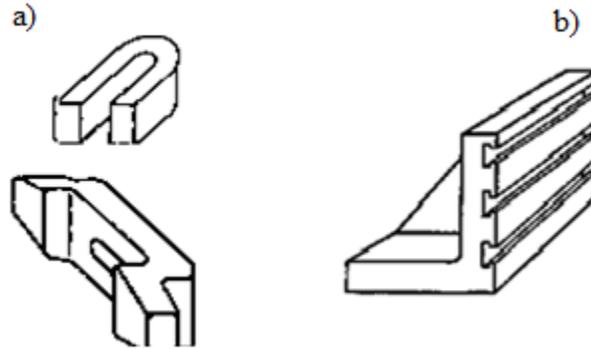
**Figura II.14.-** Mordazas mecánicas para fresadora de control numérico

#### II.4.3.- Sujeción en la rectificadora

El rectificado es en la mayoría de los casos un maquinado fino. Las piezas se rectifican para que las superficies adquieran una alta calidad y permanezcan lisas y además las dimensiones exigidas solamente tengan desviaciones mínimas (tolerancias). Las piezas se deben sujetar de tal forma que no se deformen, pero igualmente no cambien su posición [II.36]. Esto es válido en especial para piezas delgadas las cuales se flexionan fácilmente. Algunos de los dispositivos de sujeción en la rectificadora son los siguientes [II.36].

- *Mordazas de rosca.*- Se utilizan en conjunto con los tornillos de tensión. Transmiten las fuerzas de los tornillos de tensión a las piezas apretándolas contra la mesa. La condición es que la pieza tenga los correspondientes aditamentos y formas para posar las mordazas de rosca. Además no deben obstruir los tornillos de tensión ni tampoco las mordazas a la herramienta. Para poder trabajar convenientemente existen diversas clases de mordazas roscadas.

- *Ángulo de tensión.*- Se utilizan cuando la superficie a rectificar no es paralela a la mesa. Existen ángulos de tensión fijos y graduables como se observa en la figura.
- *Dispositivos de tensión.* Para piezas las cuales no se permite fijarse con otros elementos de sujeción y para aquellas piezas que se deban de rectificar en grandes cantidades.



**Figura II.15.-** Sujeción en la rectificadora con mordazas. a) Roscas, b) Ángulo de tensión.

#### II.4.4.- Sujeción con prensas hidráulicas

Las prensas hidráulicas son mecanismos simples, relativamente sencillos y rápidos de operar. Son elementos básicos para las operaciones de mecanizado y lo han sido por muchos años [II.37]. Muchos refinamientos se han aplicado al concepto básico, particularmente en los últimos 50 años para mejorar la precisión de la repetitividad, para aumentar la densidad de la pieza en el sistema de sujeción, y la automatización de operaciones por medio de la hidráulica. El objetivo de la gran mayoría de los montajes de mecanizado que requieren de sujeción por medio de prensas hidráulicas es la productividad máxima [II.38].

Lo que se traduce en cortar las piezas con el mínimo de interrupciones. Los sistemas de prensas hidráulicas ofrecen dos grandes ventajas sobre los neumáticos; primeramente los fluidos utilizados no son compresibles en forma significativa, lo cual brinda una mayor seguridad y una mayor capacidad de respuesta en cuanto a fuerza [II.39]. Por otra parte los sistemas hidráulicos son más fáciles de controlar en cuanto a su velocidad de respuesta [II.40].

Actualmente el tener sujetadores de este tipo nos provee de una gran diversidad de beneficios que a continuación se mencionan algunos de los más importantes [II.41].

1. *Rápida respuesta al sujetar.* El incremento de la velocidad de sujeción es una de las más importantes ventajas, ya que la inversión de tiempo al sujetar manualmente un producto reduce el tiempo productivo en cada proceso.
2. *Maquinado rápido.* Además de la reducción del tiempo de sujeción se pueden reducir los ciclos de maquinado o de proceso ya que la fuerza de sujeción puede ser modificada de acuerdo al proceso, obteniendo así un proceso más rápido.
3. *Mejora la calidad del producto.* La mejora es obtenida por la alta eficiencia de sujeción (automatizable, fuerza y ajuste) ya que la repetitividad en la sujeción es casi garantizada, disminuyéndose así el riesgo de un defecto que ocasionaría un rechazo y por lo tanto un costo adicional a la producción.
4. *Otras ventajas.* La operación remota de estos dispositivos es otra ventaja, ya que se puede adaptar en procesos dónde la sujeción sea en condiciones inseguras para el ser humano. La reducción de la fatiga en el operador también es un valor agregado en circunstancias dónde el operador realice actividades desgastantes físicamente.



**Figura II.16.-** Prensas hidráulicas. a) Estación sencilla, b) Torreta clúster de cuatro lados.

#### II.4.5.- Sujeción con dispositivos neumáticos

La aplicación generalizada de la neumática en la industria es relativamente reciente, ya que, al igual que otras formas de transmisión de energía, fue implantándose poco a poco hasta lograr el nivel de utilización alcanzado hoy en día [II.42]. Los Sujetadores neumáticos tienen la característica principal de ser súper compactos para aplicaciones en las que se cuenta con poco espacio [II.43]. Similar a la prensa de sujeción con fijación de manija vertical, excepto que es operado por un cilindro de aire en lugar de ser operada en forma manual.

Una conexión articulada proporciona una alta capacidad de sujeción y asegura el bloqueo mecánico positivo aunque falle la presión de aire [II.44]. Se encuentran disponibles en diferentes capacidades de retención. Los dispositivos con garras giratorias y verticales neumáticas resultan ideales en situaciones en las que se requiere de una baja fuerza de sujeción y en la inserción de piezas, a las que deben tener fácilmente acceso desde arriba.



**Figura II.17.-** Dispositivos neumáticos. a) Con garras giratorias, b) Brazo lineal.

#### II.4.6.- Sujeción con platos magnéticos

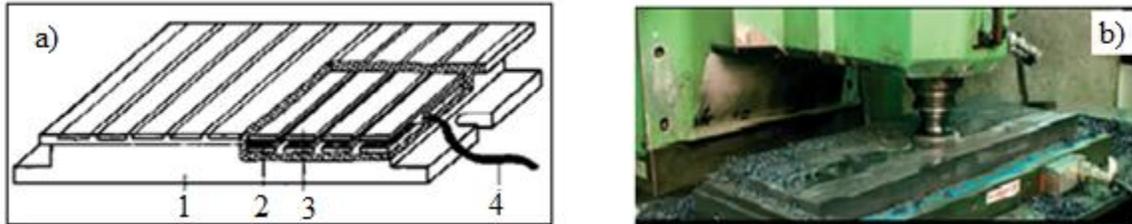
La placa de sujeción electromagnética utilizada en las rectificadoras de planear utiliza frecuentemente éste tipo de sujeción [II.45]. En éstas se utiliza la fuerza magnética para retener a las piezas de acero. En el interior de la placa electromagnética se encuentran bobinas. Al fluir una corriente eléctrica por las bobinas se genera en el núcleo de la bobina un campo magnético el cual retiene a la pieza [II.46].

Los platos magnéticos son los más utilizados para la mecanización de metales, aunque hay diferentes variedades y capacidades. Son especialmente diseñados para la sujeción magnética en las operaciones de fresado [II.47]. Permiten efectuar fresados ligeros y pesados en una gran variedad de tipos de piezas. Mejoran la productividad en el planeado y escuadrado. Es posible mecanizar las cinco caras accesibles de la pieza en un único amarre. El circuito electropermanente de estos platos permite combinar la potencia de un electroimán con la seguridad del imán permanente, representando las siguientes ventajas [II.48]:

- Mínimo consumo de energía. Solo consume durante el proceso de imantado y desimantado.

- Ausencia de deformaciones del plato por calentamiento.
- El riesgo de accidente por corte de corriente es nulo.

La estructura en monobloque les confiere una gran solidez y resistencia a las deformaciones, permitiendo un posicionamiento preciso de la pieza utilizando cualquier sistema de apoyo [II.49].



**Figura II.18.-** Platos magnéticos. a) Estructura interna, b) montados para mecanizar.

## II.5.-Sumario

En éste capítulo se presentó la teoría del mecanizado por arranque de viruta y además se aborda los sistemas de sujeción de la pieza a trabajar en los diferentes procesos de maquinado. El maquinado es la operación por excelencia para la remoción de metal de la pieza de trabajo para producir la forma requerida. Los procesos de mecanizado por arranque de viruta son una familia de procesos que se destacan por su importancia, los tres más comunes en la industria, que son, el torneado, el fresado y el rectificado. Para la forma final de la pieza, se requiere de dos elementos importantes que son; la herramienta y los movimientos de ésta y la pieza a trabajar. Para el estudio de la formación de la viruta se considera el corte ortogonal que es el más sencillo por presentar un estado de deformación plana y viene definido por tres ángulos que son de gran influencia y por su profundidad de pasada.

Uno de los más importantes sistemas para lograr la obtención de acabado con un alta precisión y calidad son los llamados sistemas de sujeción que tiene cada una de las máquinas-herramienta utilizadas para el mecanizado de metales. Estos sistemas de sujeción son de una gran variedad y tamaño y los hay tanto de operación manual como sistemas de potencia (hidráulicos, neumáticos, magnéticos y de torque). Los sistemas de operación manual son los tradicionales, como las mordazas mecánicas, platos o mesas giratorias, gatos, escuadras, pinzas, mandriles autocentrables y puntos entre otro. Por otro lado, los sistemas de sujeción de potencia en dónde han adquirido un gran auge en las tres últimas décadas por sus características, tanto por el fluido de trabajo cómo de sus

ventajas ante los sistemas de sujeción manual y que les permite ser competitivo ante un mercado globalizado.

Entre estos sistemas se tiene como dispositivo principal a las presas hidráulicas, disponibles en diferentes tamaños y capacidades para tales procesos de mecanizado y en segundo lugar se tiene a los dispositivos neumáticos y magnéticos que tienen cierta desventaja en cuanto a los hidráulicos por el fluido de trabajo, pero no dejan de ser de gran eficacia, existiendo también en gran variedad de opciones y capacidades.

## II.6. – Referencias

- 1.- Davim, J. P., *Machining Fundamental and Recent Advances*, Ed. Springer-Verlag, pp 35-37, 2008.
- 2.- Shaw, M., *Metal Cutting Principles*, Ed. Oxford University Press, pp 15-17, 1984.
- 3.- Kalpakjian, S., *Manufacturing Engineering and Technology*, Ed. Prentice Hall, pp 246-247, 2000.
- 4.- Boothroyd, G. y Knight, W., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Ed. Marcel Dekker, pp 148-150, 1989.
- 5.- Oxley, P. L., *Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*, Ed. Ellis Horwood, pp 45, 1989.
- 6.- Flinn, A. R. y Trojan, P., *Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones*, Ed. McGraw-Hill, pp 11-13, 1979.
- 7.- Krar, S., Stephen, F. y Gill, A., *Exploring Advanced Manufacturing Technologies*, Ed. Industrial Press, pp 76-77, 2003.
- 8.- Chevalier, A. y Bohan, J., *Tecnología del Diseño y Fabricación de Piezas Metálicas*, Ed. Limusa, pp 56, 1998.
- 9.- Edwards, L. y Endean, M., *Manufacturing With Materials*, ISBN 0 340 731621, pp 37-40, 1990.
- 10.- Rodríguez, M. J., *Procesos de Mecanizado de Metales*, Ed. Visión net, pp 117-119, 2003.
- 11.- Arraz, F., *Ingeniería de Fabricación: Mecanizado por Arranque de Viruta*, Ed. Visión net, pp 70- 72, 2005.
- 12.- Jawahir I. S., y Van, L., *Recent Developments in Chip Control Research Application*, Annals of the CIRP, Vol. 42, pp 659-665, 1993.

- 13.- Budinsky, K. y Budinsky M., *Engineering Materials*, Ed. Prentice- Hall, pp 225-226, 1999.
- 14.- Cruz, T. F., *Sistemas de Fabricación de Maquinas Automatizadas*. Ed. Visión net, pp 115- 116, 2005.
- 15.- Askeland, D. R., *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Ed. Thompson, pp 121-122, 1998.
- 16.- Anderson, J. C., Keith D. L. y Leaver, R. D., *Ciencia de los Materiales*, Ed. Limusa, pp 286-287, 1998.
- 17.- Rossi, M., *Maquinas Herramientas Modernas I y II*, Ed. Científico Médica, pp 88-90, 1998.
- 18.- Stabler, G. V., The Fundamental Geometry of Cutting Tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 165, pp 60- 61, 1951.
- 19.- Trent, E. M., *Metal Cutting*, Ed. Butterworths-Heinemann, pp 19- 21, 1984.
- 20.- Faura, F. y López, J., *Fundamentos de Fabricación*, Ed. ICE- Universidad de Murcia, pp 22-24, 1998.
- 21.- Jonhson, K. L., *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, pp 103-104, 1999.
- 22.- Strenkowski, J. y Carroll, J., *Finite Element Method in Machining Processes*, Springer, England, pp 105, 1985.
- 23.- Ernst, H., *Physics of Metal Cutting*, Symposium of Machining of Metals, Trans. American Society of Metals, pp 130, 1938.
- 24.- Cheriguene, R., *Estudio Numérico de los Fenómenos de Contacto en el Mecanizado*, Tesis Doctoral, Leganés, pp 45-47, 2009.
- 25.- Mayron L. B., *Procesos de Fabricación*, Ed. CECSA, pp 10-12, 1996.
- 26.- Mompin, P. J., *Sistema CAD/CAM/CAE Diseño y Fabricación por Computadora*, Ed. Marcombo, pp 18-20, 1993.
- 27.- Tien-Chien C. y Richard, A. W., *Computer Aided Manufacturing*, Ed. Prentice Hall, pp 123-125, 1984.
- 28.- Baumgartner, H. y Knischewski, K., *Automatización de la Producción*, Ed. Marcombo, pp 21-22, 1993.
- 29.- Bediaga, I., Hernández, J., Muñoa, J., Memorias del XV Congreso Sobre Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación, *Maquinado de Alta Velocidad*, Palacio de Miramar de San Sebastián, España, pp 45, 2003.

- 
- 
- 30.- Pérez, G., *Implementación y Estudio del Desempeño de Pastillas Intercambiables de Acero Rápido Sinterizado en la Industria Metalmeccánica Nacional*, Trabajo de Grado. Bogotá. Universidad de los Andes, pp 53-55, 2004.
- 31.- Astakhov, V. P., *Metal Cutting Mechanics*, Ed. CRC Press, pp 297-299, 1998.
- 32.- Figliola, R. y Beasley J., *Mediciones Mecánicas, Teoría y Diseño*, Ed. Alfaomega, pp 604-605, ISBN 970-15-0852-1, 2003.
- 33.- Toni, L. y Tonchia, S., *Manufacturing Flexibility: A Literature Review*, *International Journal of Production Research*, Vol.36, pp 43-45, 1998.
- 34.- Oxley, P. L., *The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*, Ed. Ellis Horwood, pp 105-107, 1989.
- 35.- Saavedra S. y Juan, G., *Desarrollo de una Metodología Para Realizar Ensayos Sistemáticos de Mecanizado en Colombia*, Trabajo de grado. Bogotá. Universidad de los Andes, pp 104-106, 2006.
- 36.- Pugh, H. L., *Mechanics of Cutting Process in: Proceedings*, Conference on Technology of Engineering Manufacture, The Institute of Mechanical Engineers, pp 224–225, 1958.
- 37.- Cruz, F. T., *Sistemas de Fabricación de Máquinas Automatizadas*, Ed. Marcombo, México, pp 225, 2006.
- 38.- Waganoff, P. N., *Prensas Hidráulicas*, Ed. Alsina, México, pp 72-75, 1990.
- 39.- Groover P. M., *Fundamentos de Manufactura Moderna*, Ed. Prentice Hall, México, pp 789-790, 1997.
- 40.- Soundararajan V. y Llango, S., *Introduction to Hydraulics and Pneumatics*, Ed. Asoke, New Delhi, pp 7-9, 2011.
- 41.- Harry, L. S., *Hydraulic and Pneumatic Power for Production*, Ed. Industrial Press, New York, pp 3-4, 1977.
- 42.- Alkire, S. D., *Quick Die Change*, Society of Manufacturing Engineers, United States of America, pp 55-57, 2004.
- 43.- Adithan, M. y Gupta, A. B., *Manufacturing Technology*, New Age International Publisher, pp 161-162, 2008.
- 44.- Barber, A., *Pneumatic Handbook*, Elsevier Science Inc., New York, pp 502, 1997.
- 45.- Majumdar, S. R., *Pneumatic Systems: Principles and Maintenance*, Ed. Tata McGraw-Hill, pp 180-181, 2006.

- 
- 
- 46.- Hoffman, G. E., *Setup Reduction Through Effective Workholding*, Ed. Industrial Press, pp 227, 2005.
- 47.- Hoffman, J. P., Hopewell S. E., Janes B. y Sharp, M. K., *Precision Machining Technology*, Ed. Nims, New York, pp 550, 2011.
- 48.- Meyers, R. A. y Slattery, J. T., *Basic Machining Reference Handbook*, Ed. Industrial Press, pp 188, 2001.
- 49.- Moltrecht, H. K., *Machine Shop Practice*, Ed. Industrial Press, pp 382-383, 1981.
- 50.-Hoffman, G. E., *Jig and Fixture Design*, Ed. Thomson, New Yo

# CAPÍTULO III

## METODOLOGÍA

## EXPERIMENTAL

### III.1.- Desarrollo de la evaluación experimental

Para la fabricación de piezas metálicas en la industria se tiene una gran diversidad de problemas geométricos y dimensionales, que repercuten en costos elevados de la manufactura en las mismas piezas [III.1]. La sujeción de piezas a mecanizar requiere de una gran cantidad de procesos de manufactura que permita la contención de la misma [III.2]. Sin embargo, estos procesos deben minimizarse, así como los errores de los operadores, programación y herramientas. Lo anterior se debe a que en diversas ocasiones se emplean materiales complejos, que originan el cuidado en el dispendio de recursos por procesos largos y se deben de emplear varias estaciones de trabajo para la obtención de un solo componente [III.3].



**Figura III.1.-** Sistema de sujeción

La metodología que se presenta en este trabajo, se realizó con el fin de observar y determinar los desplazamientos y esfuerzos que soporta el sistema en sujeción. Así como, poder determinar las cargas de maquinado que se ejercen sobre la pieza. Asimismo, el desgaste y rendimiento de la totalidad de componentes que integran el sistema con dos propósitos; el primero, identificar los tiempos de mecanizado que se mejoran mediante el empleo de esta tecnología (a fin de reducir el tiempo de fabricación de la pieza en comparación con metodologías tradicionales de manufactura) y el segundo, para incrementar la calidad y precisión de las piezas manufacturadas (ya que reduce los errores y variación gracias a la eliminación de múltiples sujeciones de la pieza fabricada mediante

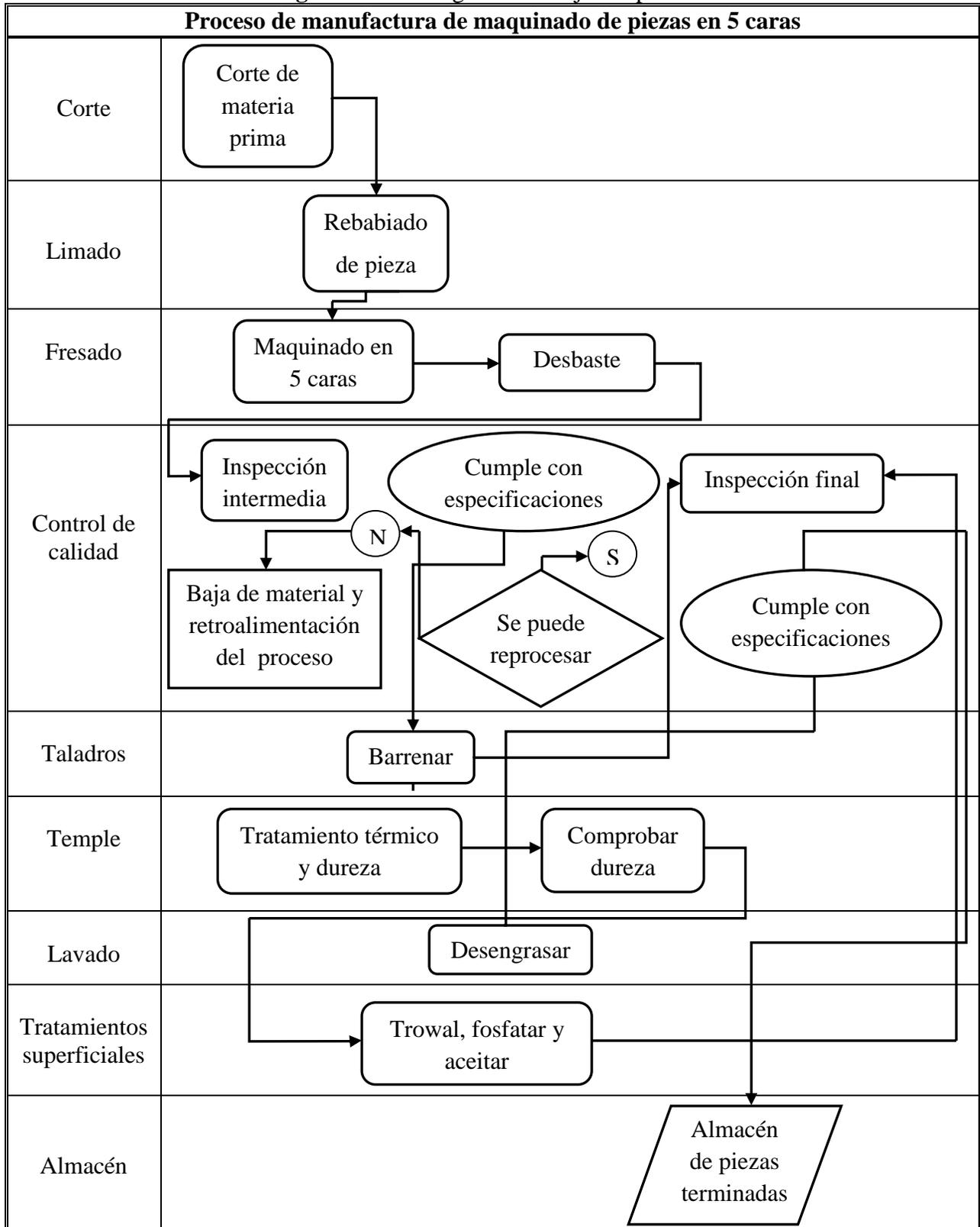
procesos convencionales de sujeción mecánica y manufactura por estaciones de trabajo secuenciales). La metodología que se desarrolló para llevar a cabo las pruebas físicas de mecanizado en tiempo real se sustenta en obtener resultados experimentales y puesta en marcha del proyecto con el fin de determinar ventajas y aplicaciones, como son:

1. Evaluación de piezas, máquina y utillaje.
2. Diseño del concepto de mecanizado.
3. Integración del utillaje seleccionado y materiales a emplear.
4. Herramental de máquina.
5. Programación unitaria del proceso en códigos EIA/ISO.
6. Experimentación de condiciones de corte de herramientas y trayectorias de mecanizado.
7. Primera optimización del proceso.
8. Integración global del proceso y segunda optimización de maquinado.
9. Fabricación en serie de piezas y seguimiento de capacidad de proceso.

### **III.2.- Diagrama de flujo del proceso de manufactura**

El diagrama de flujo es la representación gráfica del algoritmo o proceso [III.4]. Se utiliza en disciplinas como la programación, la economía y en procesos industriales. Estos diagramas utilizan símbolos con significados bien definidos que representan los pasos del algoritmo y representan el flujo de ejecución mediante flechas que conectan los puntos de inicio y de fin de proceso [III.5]. Las ventajas de los diagramas de flujo, favorecen la comprensión del proceso al mostrarlo como un dibujo [III.6]. El cerebro humano reconoce muy fácilmente los dibujos, un buen diagrama de flujo reemplaza varias páginas de texto. También permiten identificar los problemas y las oportunidades de mejora del proceso. Se identifican los pasos, los flujos de los reprocesos, los conflictos de autoridad, las responsabilidades, los cuellos de botella y los puntos de decisión. Muestran las interfaces cliente-proveedor y las transacciones que en ellas se realizan, facilitando a los empleados el análisis de las mismas. Son una excelente herramienta para capacitar a los nuevos empleados y también a los que desarrollan la tarea, cuando se realizan mejoras en el proceso [III.7]. En la Figura III.2 se muestra el diagrama de flujo del proceso de manufactura propuesto para la fabricación de la pieza, en el que se indica la secuencia de los talleres que intervienen en la fabricación de la pieza.

**Figura III.2.-** Diagrama de flujo del proceso



### III.3.- Material y geometría de los especímenes

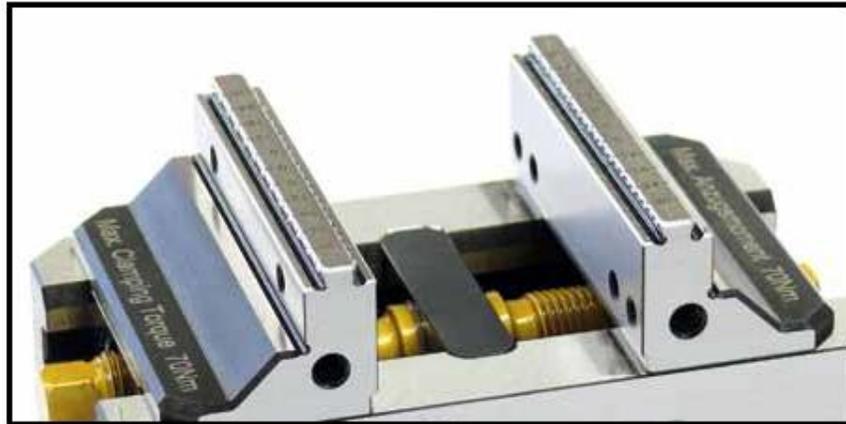
En la realización de las pruebas físicas se encuentran dos especímenes involucrados. El primero, el sistema de sujeción (en el cual se avocará al interés del investigador) y el segundo, el espécimen en dónde se aplicará la carga para el mecanizado. El sistema de sujeción de bajo perfil a analizar consta de dos mordazas que sujetan al material a trabajar con una fuerza de 30 N y un área de agarre de 3 mm x 40 mm cada una de estas mordazas.

El material con que está fabricado el sistema de sujeción es de un acero H-13. El acero está considerado como de ultra alta resistencia, debido a que su esfuerzo a la cedencia es de 1380 MPa. Este acero tiene amplias aplicaciones en herramientas sometidas a grandes exigencias, especialmente a altas temperaturas y es el material de excelencia para la fabricación de componentes mecánicos, tales como; punzones, matrices para prensar, dados de extrusión, herramientas de extrusión por impacto en caliente, herramientas para la fabricación de tornillos, tuercas, remaches y machuelos, matrices para fundición centrifuga, herramientas para prensas de piezas perfiladas, cuchillas para corte en caliente, entre otras [III.8].

**Tabla III.1.-** Composición química del acero H-13

<b>Elemento</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Porcentaje %</b>
Carbón	C	0.39
Magnesio	Mn	0.39
Silicio	Si	0.947
Cromo	Cr	4.98
Molibdeno	Mo	1.29
Fosforo	P	0.006
Vanadio	V	0.963

Por lo general, los sistemas de sujeción de bajo perfil son utilizados en máquinas fresadoras para contener a los materiales que se desean maquinar. El sistema que se va a analizar permite sujetar al componente mecánico con tal sólo 3 mm de agarre, dónde se evaluará si el sistema es capaz de soportar las cargas ejercidas por las herramientas de corte durante el trabajo de maquinado.



**Figura III.3.-** Mordazas del sistema de sujeción

Para realizar las pruebas, se requiere del montaje de los sistemas de sujeción a la máquina que realizará el maquinado. Dichas pruebas se llevan a cabo en una fresadora de *CNC* que son comunes en las fábricas de la industria metalmecánica. Se decidió, emplear una máquina de control numérico de 5 ejes simultáneos con sujeción hidráulica para el montaje de piezas a mecanizar de un material de acero AISI 8620. El cual tiene buena maquinabilidad, por lo que es ideal para muchas aplicaciones (en especial para piezas pequeñas y medianas). Este tipo de acero, es para cementación ya que mantiene excelente combinación con sus elementos de aleación, llegando a tener gran tenacidad en el núcleo, alta dureza superficial y resistencia al desgaste [III.9 y III.10].



**Figura III.4.-** Sujeción del acero AISI 8620

La presentación del material AISI 8620 es rectangular de 1 plg x 1¾ plg (25.4 x 44.45 mm) y tiene la siguiente composición química [III.11]:

**Tabla III.2.-** Composición química del acero AISI 8620

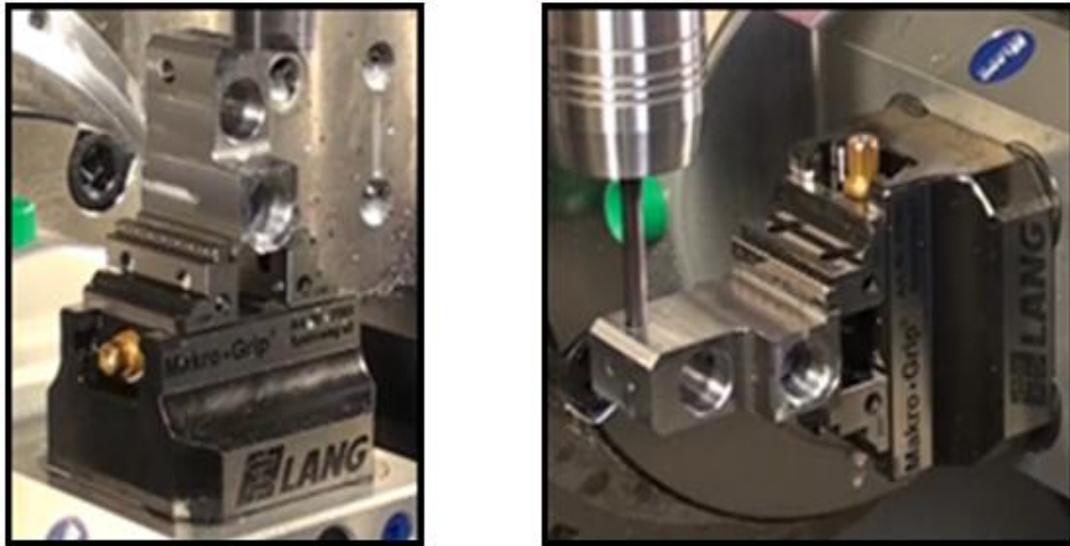
Elemento	Símbolo	Porcentaje %
Carbón	C	0.18 / 0.23
Magnesio	Mn	0.70 / 0.90
Silicio	Si	0.20 / 0.35
Níquel	Ni	0.40 / 0.70
Cromo	Cr	0.40 / 0.60
Molibdeno	Mo	0.15 / 0.25

Las características mecánicas del acero son de gran importancia para el diseño y análisis de cualquier elemento mecánico, a continuación se presentan las propiedades del acero AISI 8620 utilizado en estas pruebas.

**Tabla III.3.-** Propiedades mecánicas del acero AISI 8620 [III.12]

Propiedad	Caliente y maquinado			Estirado en frío			Templado y revenido		
	MPa	kgf/mm <sub>2</sub>	ksi	MPa	kgf/mm <sub>2</sub>	ksi	MPa	kgf/mm <sub>2</sub>	ksi
Resistencia a la tensión	669	68	97	703	72	102	903	92	131
Límite fluencia	393	40	57	586	60	85	683	70	99
Alargamiento en 2%	25			22			21		
Dureza Brinell	195			212			255		
Maquinabilidad 1212EF = 100%							65		
Reducción de área %	63			58			52		

Mediante el montaje de los dispositivos para la operación de fresado y barrenado, se emplean las herramientas, dispositivos y la programación desarrollada en donde se generan diversos resultados. Donde las más importantes son los esfuerzos y deformaciones unitarias que sufre el sistema de sujeción, que es motivo específico de éste trabajo.



**Figura III.5.-** Sujeción de la pieza con 3 mm de agarre

También se generan otros resultados importantes, tales como los tiempos y proceso de maquinado, calidad y tiempos optimizados de fabricación [III.12]. Que son los que finalmente harán confiable y extensiva la aplicación de esta técnica dentro de la industria metalmecánica del país y que repercutirá en hacer más eficientes las metodologías de maquinados convencionales, logrando optimizar los sistemas de manufactura de control numérico.

#### **III.4.- Herramental y mecanizado**

Para la elaboración y construcción del proceso de maquinado fue necesaria la integración de los dispositivos de referencia rápida y prensas de sujeción de perfiles, acoplando tecnología de programación de máquinas *CNC* mediante variables asignadas por el usuario [III.13].

El control dimensional y secuencial de cada mecanizado de la pieza, permite incrementar la calidad y reducir los tiempos de fabricación. Además se capacito al personal de operarios de máquina. Para las pruebas realizadas se emplearon los siguientes tipos de programación [III.14 y III.15]:

1. Programación *EIA/ISO*.
2. Asignación de variables *R*.
3. Se empleó el control *Siemens Sinumerik 840D*.

Durante la puesta en marcha del sistema de optimización, se presentaron problemas de distancias y áreas de trabajo que obligaron a fabricar platos adaptadores en la base de sujeción a fin de que las herramientas de corte logaran mecanizar la pieza. También se realizaron diversas estrategias de programación de máquina, hasta llegar a una asociada con variables que permiten cambios fáciles y que aplican para todas las posiciones de maquinado [III.16]. Con lo que se simplificó el proceso de manufactura en serie. Para el maquinado se emplearon las siguientes herramientas y dispositivos auxiliares, considerando que para la fabricación del lote de producción se requieren las siguientes cantidades de cada una.

**Tabla III.4.-Dispositivos auxiliares para el mecanizado**

<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
1	Prensa hidráulica para perfilar materia prima. Incluye unidad hidráulica, 2 piezas mordazas de refacción código ET-FDA-TDG-DS-001 marca LANG.
9	Prensa makro grip 46 código ET-FDA-TDG-DS -002 marca LANG.
1	Torre de sujeción tri-top código ET-FDA-TDG-DS -003 marca LANG.
2	Placa de sujeción quick-point código ET-FDA-TDG-DS -004 marca LANG.
4	Porta herramienta nikken multilock hsk-a50 ø20 código ET-FDA-TDG -PH-001 marca NIKKEN.
12	Porta herramienta gewefa hidráulico ø20 código ET-FDA-TDG-PH-002 marca GEWEFA.
10	Porta herramienta gewefa hidráulico ø12 código ET-FDA-TDG-PH-003 marca GEWEFA.
1	Porta herramienta gewefa hsk-a50 er16 código ET-FDA-TDG-PH-003 marca GEWEFA.
4	Porta herramienta nikken hsk-a50 sk10 código ET-FDA-TDG-PH-004 marca GEWEFA.
2	Porta herramienta nikken hsk-a50 sk25 código ET-FDA-TDG-

	PH-005 marca GEWEFA.
4	Porta herramienta nikken multilock hsk-a50 ø20 código ET-FDA-TDG-PH-006 marca NIKKEN.
3	Porta herramienta para fresa de perfil código ET-FDA-TDG-PH-007 marca GEWEFA.
3	Buje de reducción ø30-25 código ET-FDA-TDG-ACC-PH-001 marca NIKKEN.
6	Buje de reducción ø20-16 código ET-FDA-TDG-ACC-PH-A-002 marca GEWEFA.
4	Buje de reducción ø20-10 código ET-FDA-TDG-PH-A-003 marca GEWEFA.
4	Buje de reducción ø20-6 código ET-FDA-TDG-PH-A-004 marca GEW/NIKK.
4	Boquilla nikken sk10 ø3 mm código ET-FDA-TDG-PH-A-005 marca GEWEFA.
3	Boquilla nikken km12 ø3 mm marca NIKKEN.
2	Boquilla nikken sk25 ø10 mm código ET-FDA-TDG-PH-A-006 marca NIKKEN.
2	Boquilla er16 ø10 mm código ET-FDA-TDG-PH-A-007 marca GEWEFA.
2	Boquilla er16 ø8 mm código ET-FDA-TDG-PH-A-008.
27	Fresa de carburo TiAIN ø25 mm código ET-FDA-TDG-HTA -001 marca HAM.
11	Fresa de carburo TiAIN ø20 mm código ET-FDA-TDG-HTA-002 marca HAM.
17	Fresa radio de carburo TiAIN ø20 mm código-ET-FDA-TDG-HTA-003 marca HAM.
4	Fresa de carburo TiAIN 10.5 mm código ET-FDA-TDG-HTA-004 marca GLOOR.
27	Broca escalonada TiAIN ø11.7 mm código ET-FDA-TDG-HTA-003 marca HAM.

Análisis de esfuerzos aplicados a sistemas de sujeción (de bajo perfil) para mecanizado por arranque de viruta a aceros aleados (AISI 8620)

17	Escariador escalonado de carburo TiAIN $\phi$ 16.2 mm código ET-FDA-TDG-HTA-004 marca HAM.
5	Avellanador de carburo $\phi$ 20.5 mm x 90° código ET-FDA-TDG-HTA-005.
11	Broca de carburo TiAIN $\phi$ 10 mm código ET-FDA-TDG-HTA-007 marca HAM.
27	Avellanador escalonado de carburo TiAIN $\phi$ 14.5 mm código ET-FDA-TDG-HTA-008 marca HAM.
4	Avellanador 12.4 mm x 90° código art. 476 marca GUHRING.
13	Broca de carburo TiAIN $\phi$ 1.75 mm código ET-FDA-TDG-HTA-009 marca HAM.
27	Broca de carburo TiAIN $\phi$ 2.55 mm código ET-FDA-TDG-HTA-010 marca HAM.
27	Broca de carburo TiAIN $\phi$ 2.5 mm código ET-FDA-TDG-HTA-011 marca HAM.
13	Broca de carburo TiAIN $\phi$ 5.5 mm código ET-FDA-TDG-HTA-012 marca HAM.
11	Broca de carburo TiAIN $\phi$ 6 mm código ET-FDA-TDG-HTA-013 marca HAM.
19	Avellanador de carburo $\phi$ 8.3 mm código ET-FDA-TDG-HTA-014 marca HAM.
3	Porta fresa de roscar m16x1.5 código ET-FDA-TDG-HTA-015 marca MIMATIC.
27	Insertos de roscar paso 1.5 código ET-FDA-TDG-HTA-015 marca MIMATIC.
2	Varitorque 3/8 10-60 mm código ET-FDA-TDG-HTA-016 marca HEYCO.
2	Torquefix 0.6 mm código ET-FDA-TDG-HTA-017 marca WIHA.
2	Varilla para torquefix t7 código ET-FDA-TDG-HTA-018 marca WIHA.

Análisis de esfuerzos aplicados a sistemas de sujeción (de bajo perfil) para mecanizado por arranque de viruta a aceros aleados (AISI 8620)

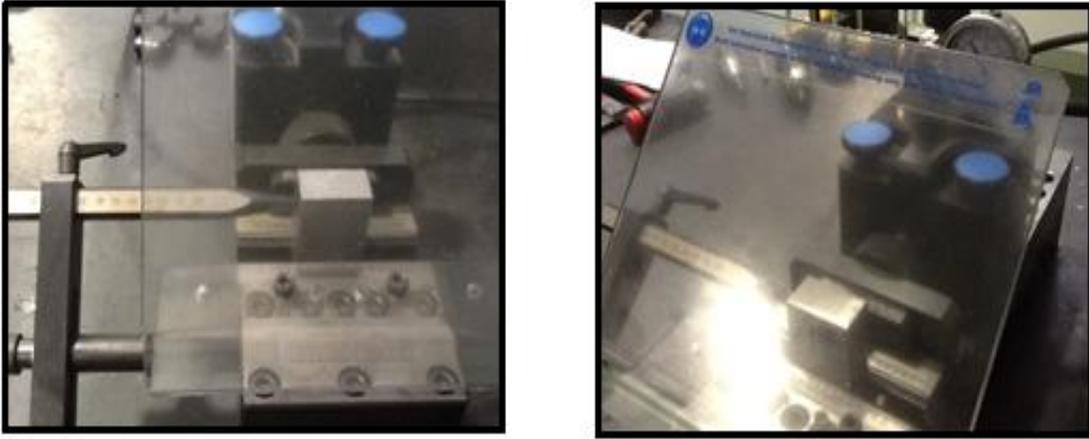
1	Dispositivo marco de centro código ET-FDA-TDG-HTA-019 marca LANG.
20	Protector husillo makro-grip código ET-FDA-TDG-HTA-020 marca LANG.
3	Porta hidráulico hsk-a50 $\phi$ 12 código ET-FDA-TDG-HTA-021 marca GEWEFA.
4	Buje de reducción $\phi$ 12-3 código ET-FDA-TDG-HTA-022 marca GEWEFA.
4	Buje de reducción $\phi$ 20-16 código ET-FDA-TDG-HTA-023 marca GEWEFA.
4	Buje de reducción $\phi$ 20-6 código ET-FDA-TDG-HTA-024 marca GEWEFA.
35	Tubo refrigeración hsk-a50 código ET-FDA-TDG-HTA-026.
11	Fresa para chaflán $\phi$ 7.8 código ET-FDA-TDG-HTA-027 marca HAM.
3	Llave para tubo de refrigeración código ET-FDA-TDG-HTA-028 marca GEWEFA.

### III.5.- Montaje de piezas

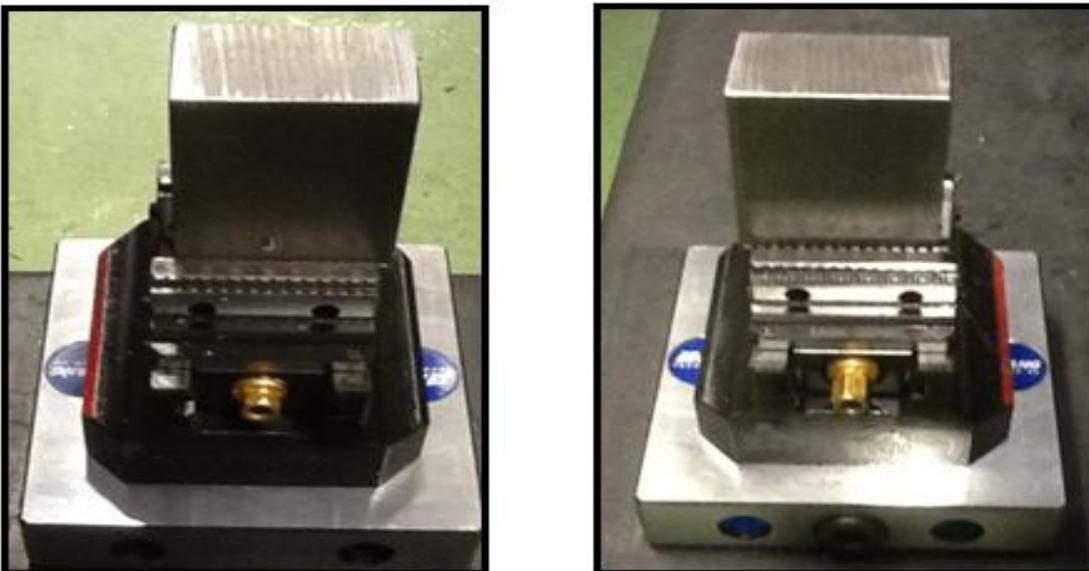
Los operadores de máquinas portaron el equipo de seguridad industrial correspondiente y se apegaron a las normas de seguridad establecidas. Para el montaje de las piezas dentro del sistema de sujeción en la máquina es necesario marcar y preformar la zona de sujeción de la materia prima, empleando una máquina perfiladora que identa el material con marcas alternadas con profundidades controladas a fin de optimizar el agarre y sujeción de la materia prima, debiendo emplear una fuerza hidráulica de 1200 psi a fin de deformar el material.

Con los datos obtenidos durante el montaje de la operación de fresado y barrenado, se generaron diversos resultados en tiempos y proceso de maquinado, calidad y tiempos optimizados de fabricación. Con los resultados obtenidos se pretende visualizar el desempeño, ventajas y posibles aplicaciones que se pueden dar al desarrollo de la investigación.

Posteriormente se coloca la pieza ya preparada en los sistemas modulares de sujeción, debiendo aplicar una fuerza de sujeción de 30 N, a fin de garantizar un buen agarre que soporte las fuerzas de corte de las herramientas que maquinarán la pieza.



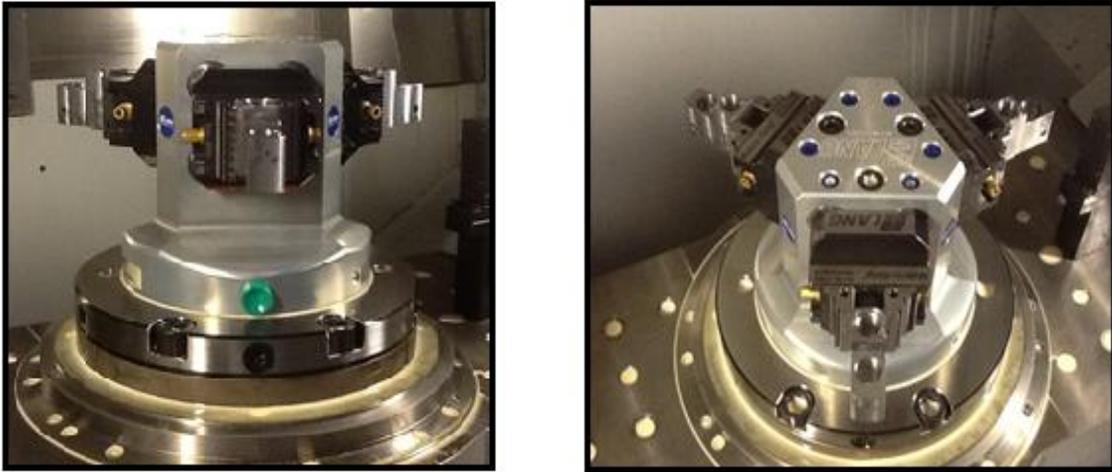
**Figura III.6.-** Montaje de pieza para conformado de sujeción



**Figura III.7.-** Montaje de pieza en sistemas modulares de sujeción *Profile gripping* (mordazas)

Una vez colocada la materia prima en los sistemas de sujeción, estos son montados a la máquina y para cada maquinado de diferente pieza se realizarán los mismos pasos anteriores. El sistema de sujeción de bajo perfil utilizado para el mecanizado de piezas en 5 caras funciona empleando programación *EIA/ISO* con variables asignadas por el usuario que permiten controlar simultáneamente 3 piezas en cada montaje dentro de la máquina de 5 ejes.

Lo anterior permite que el operador precargue los dispositivos fuera de la máquina y una vez terminado el ciclo de maquinado inicie de forma rápida evitando tiempos muertos en la máquina. Se contó con el sistema *Profile gripping* que son las mordazas propiamente, que, junto con el sistema de sujeción forman en conjunto un sistema modular de sujeción y que harán la tarea de optimizar los tiempos de mecanizado. Obteniendo un valor adicional de calidad al producto por su repetitividad durante grandes producciones en serie de las piezas a mecanizar.



**Figura III.8.-** Sujeción *Profile gripping* en sistema *Quick point reference*

### III.6.- Pruebas realizadas

Para la realización de las pruebas se requirió de un centro de maquinado vertical de cinco ejes con sujeción hidráulica marca *FZ 12K* para el maquinado del espécimen de acero AISI 8620. Este centro de mecanizado tiene una gran rapidez y su construcción es compacta. Además de tener gran diversidad de aplicación, pertenecen a las mejores máquinas herramienta de su clase. Diversas posibilidades de configuración y opciones de equipamiento posibilitan la opción ideal para cada tarea. Su ventaja es el mecanizado de piezas a costos favorables por unidad, con tolerancias mínimas y excelente calidad de superficies [III.15]. Las pruebas que se llevaron a cabo en el espécimen de acero AISI 8620 para la realización del *block toma de gases* para un fusil de asalto. Se realizaron 5 corridas de 3 especímenes cada una. Por lo que fueron un total de 15 pruebas, con un tiempo de fresado de aproximadamente de 10 minutos por pieza, teniendo los mismos parámetros de trabajo y observando las mismas características de maquinado. Así las pruebas principales de maquinado para el acero mencionado son de dos tipos:

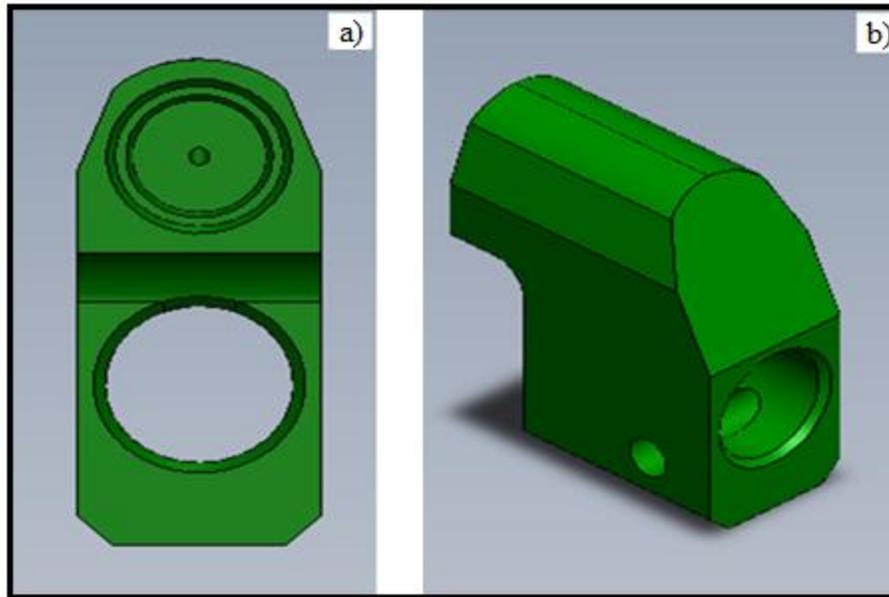
- Fresado.
- Barrenado.

Estas pruebas son de gran utilización dentro de los maquinados de metales. Sin embargo, la diferencia entre un maquinado convencional y uno en máquinas de *CNC* es la rapidez y la calidad, reflejándose como se ha mencionado en una disminución de capital requerido para la elaboración de casi cualquier trabajo dentro de la industria metalmecánica.

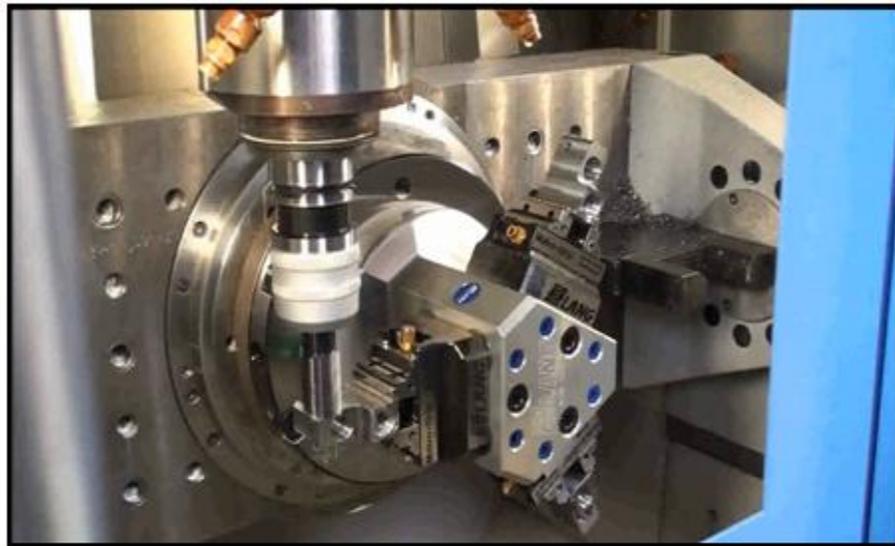


**Figura III.9.-** Centro de mecanizado de 5 ejes

La pieza terminada es de suma importancia como elemento principal en los fusiles de asalto, ya que su función es la conducción de los gases. Para la prueba de fresado del material se tomó los siguientes parámetros, la fuerza de maquinado por la herramienta de corte es de 1480 N, con una velocidad del husillo de 5600 rpm. El fresado lateral del materia es realizado sin ningún problema, no se observa deflexión en el material maquinado ni tampoco hay deformaciones permanentes, lo que indica que tanto el espécimen de acero AISI 8620 y el material del sistema de sujeción que es de acero H-13 no sufren ningún cambio plástico, es decir permanecen en la zona elástica y las deformaciones no son permanentes.



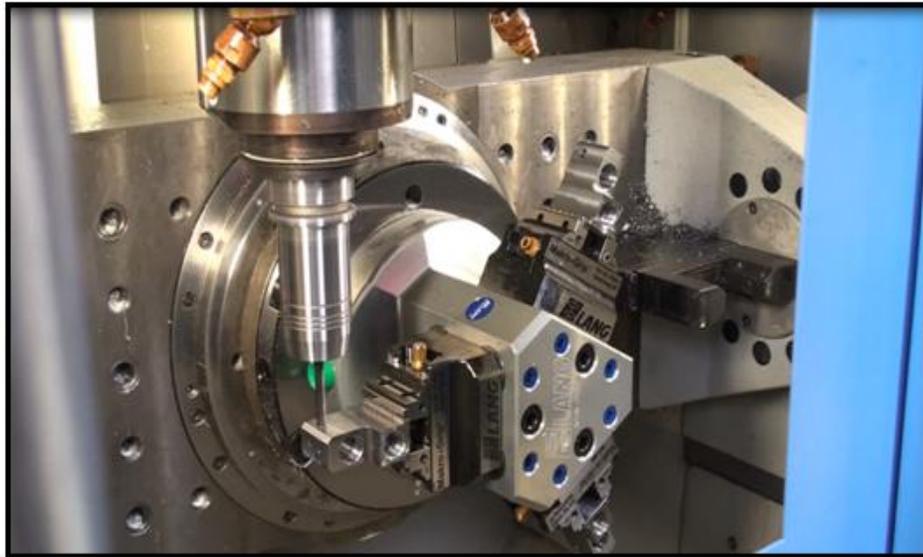
**Figura III.10.-** Block toma de gases. a) Vista frontal. b) Vista lateral derecha.



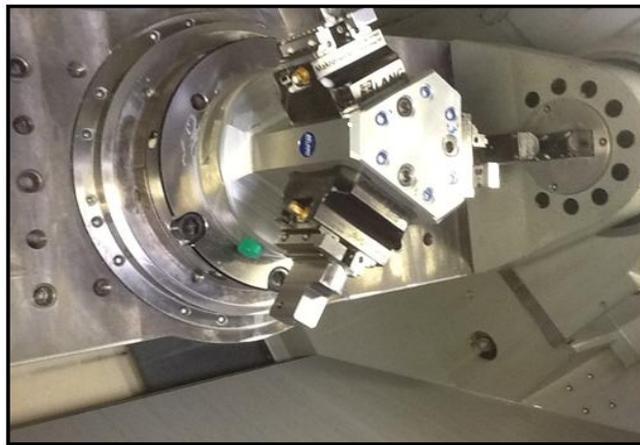
**Figura III.11.-** Fresado del espécimen de acero AISI 8620

Para la prueba de barrenado se tiene que los parámetros de trabajo son, la fuerza de maquinado de 1300 N con una velocidad del husillo de 5600 rpm. El barrenado se hace sin ningún problema, no hay deformaciones permanentes en los especímenes de acero AISI 8620 y acero H-13, nuevamente estando ambos especímenes en la zona elástica. Para los maquinados que se realizaron a las piezas

de prueba, se encuentra el barreando de diámetros pequeños y desbarbado de la pieza. Los resultados de las mediciones de la calidad de los mecanizados para cada una de las piezas fabricadas fueron verificados por el órgano interino de calidad de la fábrica de acuerdo con las normas establecidas [III.17 y III.18], verificando que las 5 caras laterales de la pieza fueran aceptables.



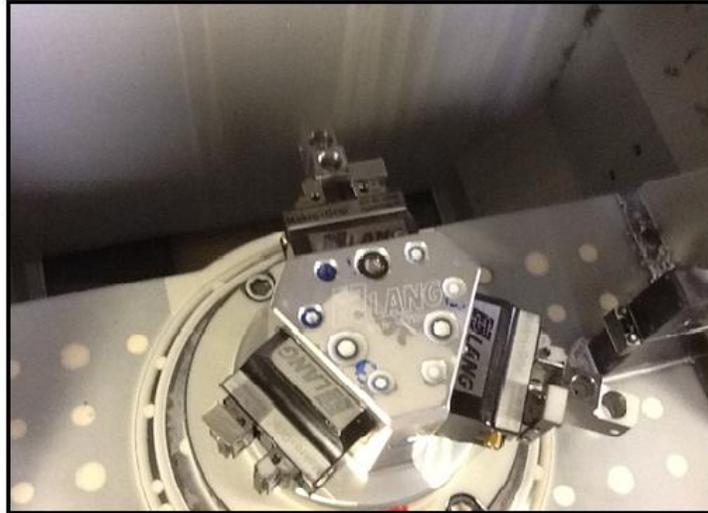
**Figura III.12.-**Barrenado del espécimen de acero AISI 8620



**Figura III.13.-** Calidad del maquinado

Por otro lado, se verificó la circularidad de los barrenos rimados de la pieza [III.19], lográndose obtener resultados satisfactorios, después de haber maquinado el lote inicial de pruebas. Se pretenderá una producción en serie del componente.

Otro de los parámetros medidos durante la prueba, fueron las posiciones absolutas y relativas de todos los barrenos que tiene la pieza [III.20]. Generando el reporte de variabilidad y estabilidad del proceso entre cada una de las posiciones del dispositivo de sujeción rápida, logrando obtener variaciones no mayores a 0.01 mm en desplazamientos y posicionamientos de barrenos.



**Figura III.14.-** Calidad de posicionamiento de los barrenos

El posicionamiento de los barrenos fue verificado e inspeccionado con una máquina de medición óptica, marca *OGP*, modelo *Smart Scope MVP*, la cual se encuentra en la sala de metrología de la fábrica.



**Figura III.15.-** Equipo de medición óptico para la verificación de posiciones y diámetros

### III.7.-Costos de tiempos y proceso de maquinado

Con el proceso de fabricación desarrollado y la programación mostrada en los anexos del presente trabajo, se pretende proyectar una producción en serie de 10,000 componentes, lotificados en 100 lotes de 100 piezas cada uno. En la Tabla III.4 se muestra el cálculo efectuado para la determinación del costo unitario de producción de la pieza a maquinar [III.21]. En el que se consideró el tiempo ciclo para cada operación del proceso. Así como, el costo por minuto de operador y de maquinaria. Lo que genera un costo de manufactura unitario. Además del costo de la materia prima a utilizarse en cada operación. Misma que sumada al costo de manufactura unitario de las operaciones producen un costo total unitario por operación que genera el costo total de manufactura [III.22]. Estimándose en \$172.03 M.N. por pieza a producirse, considerando amortizar las herramientas fijas y dispositivos en el lote inicial de 10,000 piezas.

**Tabla III.5.-** Cálculo de costo unitario de la fabricación de la pieza en las 5 caras

Taller	T. ciclo unitario (min)	Costo operador (min)	Costo maquinaria (min)	Materia prima	Costo manufactura unitaria	Costo total unitario
Corte		\$0.91	\$0.49	\$0.98	\$4.20	\$5.18
Limado	2	\$0.91	\$0.05	\$1.86	\$1.92	\$3.78
Fresas CNC	10	\$0.91	\$0.29	\$60.87	\$12.00	\$72.87
Fresas	3	\$0.91	\$0.05	\$29.72	\$2.88	\$32.60
Control	3	\$0.91	\$0.05	0	\$2.88	\$2.88
Taladros	2	\$0.91	\$0.05	\$12.42	\$1.92	\$14.34
Fresas	3	\$0.91	\$0.05	\$19.25	\$2.88	\$22.13
Limado	2	\$0.91	\$0.05	\$1.86	\$1.92	\$3.78
Lavado	0.02	\$0.91	\$0.02	0.05	\$0.02	\$0.07
Control	3	\$0.91	\$0.05	0	\$2.88	\$2.88
Temple	0.4	\$0.91	\$0.58	0.5	\$0.60	\$1.10
Dureza	0.2	\$0.91	\$0.04	0.12	\$0.19	\$0.31
Trowal	0.3	\$0.91	\$0.29	0.5	\$0.36	\$0.86
Fosfato	0.35	\$0.91	\$0.49	0.5	\$0.49	\$0.99

Taladros	2	\$0.91	\$0.05	\$6.16	\$1.92	\$8.08
Control	0.2	\$0.91	\$0.05	0	\$0.19	\$0.19
Almacén	0	\$0.91		0	\$0.00	\$0.00
Total	34.47			\$134.79	\$37.25	\$172.03

Una vez calculados los costos de fabricación, los tiempos de maquinado de la pieza durante todo su procesamiento, se procedió a calcular la ocupación anual de la máquina. Dónde se desarrolló la aplicación y optimización de los sistemas modulares de sujeción *Profile gripping* (mordazas) y *Quick point reference* (Torre de sujeción) para mecanizados en 5 caras. Resultando una ocupación anual de máquina del 98.53% Así como, se considera con ello que la optimización resultaría positiva y rentable para la fabricación de piezas metalmecánicas.

Ya que cubre la cantidad de producción solicitada en pocas operaciones y montajes que garantizan la confiabilidad del proceso, calidad del producto, rendimientos de herramientas y tiempos de fabricación.

**Tabla III.6.-** Cálculo de tiempos de la máquina

Referencia	Operación	Herramienta	Tiempo de montaje (s)	Tiempo ciclo (s)	Tiempo de inspección (s)	Tiempo total (s)
Centro de maquinado CNC	Sujeción	Sistemas modulares de sujeción Prensa hidráulica para perfilar Torre de sujeción Placa de sujeción Prensa	30	0	0	30
	Corte y limado		300	0	10	310
	Maquinado completo en las 5 caras	Fresa de carburo TiAIN ø20 mm Fresa de carburo TiAIN ø25 mm Fresa radio de carburo TiAIN ø20 mm Broca escalonada TiAIN ø11.7 mm				

Análisis de esfuerzos aplicados a sistemas de sujeción (de bajo perfil) para mecanizado por arranque de viruta a aceros aleados (AISI 8620)

		Escariador escalonado de carburo TiAIN $\phi$ 16.2 mm Broca de carburo TiAIN $\phi$ 10 mm Avellanador escalonado de carburo TiAIN $\phi$ 14.5 mm Broca de carburo TiAIN $\phi$ 1.75 mm Broca de carburo TiAIN $\phi$ 2.55 mm Broca de carburo TiAIN $\phi$ 2.5 mm Broca de carburo TiAIN $\phi$ 6 mm Insertos de roscar paso 1.5 Fresa para chaflán $\phi$ 7.8 mm	0	600	90	690
	Fresado					
	Control Taladros Limado Lavado Control Temple Dureza Trowal Fosfato Taladros Control Almacén		0	1008.2	90	1090.2
Tiempo Neto (s)						2128.2

Con la ocupación de máquina calculada, se estima la reducción del empleo de operadores y maquinaria convencional en un 65%. En comparación con modelos de fabricación convencionales que emplean una estación de trabajo para cada maquinado que requiere la pieza, eliminando muchos dispositivos de sujeción que se requerirían en caso de que el maquinado fuera secuencial y manual [III.22].

Por lo tanto, se tendría una producción mayor que la requerida de 10,000 piezas por año, que es lo que se requiere para este tipo de fábrica.

**Tabla III.7.- Ocupación de la máquina**

<b>Producción</b>	
Piezas por hora	2
Horas por turno	8
Turnos por día	3
Días por año	250
Capacidad de producción anual	12000
Número de cabezales	1
Ocupación de la máquina (por cabezal)	98.53%

### **III.8.- Sumario**

En este capítulo se presenta la metodología llevada a cabo para observar las deformaciones unitarias y esfuerzos que soporta el sistema de sujeción. Se muestra el diagrama de flujo del proceso de manufactura propuesto para la fabricación de la pieza, en el que se indica la secuencia de los talleres que intervienen en la fabricación de la pieza. Así como el montaje y uso de los diferentes dispositivos para el maquinado del espécimen de acero AISI 8620. También se presenta el rendimiento de la totalidad de componentes que integran el sistema identificando los tiempos de mecanizado para la mejora del proceso mediante el empleo de ésta tecnología, el incremento de la calidad y precisión de las piezas manufacturadas. Lo cual reduce errores y variaciones debido a la eliminación de múltiples sujeciones de la pieza fabricada mediante procesos convencionales de sujeción mecánica y manufactura por estaciones de trabajo secuenciales.

Finalmente se calcula la ocupación de la máquina estimándose una reducción en el empleo de operadores y maquinaria en comparación con modelos de fabricación convencionales que emplean una estación de trabajo para cada maquinado que requiere la pieza. Asimismo, se eliminan muchos dispositivos de sujeción que se requerirían en caso de que el maquinado fuera secuencial y manual.

**III.9.- Referencias**

- 1.- Astakhov, V. P. y Shvets, S., The assessment of plastic deformation in metal cutting, *Journal of Mater Process Technol*, Vol. 146, pp 193, 2004.
- 2.- Armarego, E., A keynote paper at the 13th symposium on engineering applications of mechanics, *Journal of Predictive Modeling of Machining Operations*, Vol. 185, pp 202, 1995.
- 3.- Liu, C. R. y Barash, M. M., Variables governing patterns of mechanical residual stress in a machined surface, *Journal of Engineering for Industry*, Vol.116, pp 140, 1994.
- 4.- Degarmo, E., Black, J. y Kohser, R., *Materials and Processes in Manufacturing*, Ed. Wiley, pp 373, 2003.
- 5.- Groover, M., *Fundamentos de Manufactura Moderna*, Ed. Prentice-Hall Hispanoamericana, pp 543, 1997.
- 6.- Davim, J. P., *Machining Fundamentals and Recent Advances*, Ed. Springer-Verlag, pp 86, 2008.
- 7.- Klocke, F., *Manufacturing Processes 1: Lathing, Milling, Drilling*, Ed. Springer-Verlag, pp 283, 2011.
- 8.- Rendler, N. J. y Vigness., *Experimental Mechanics*, pp 517–518,1966.
- 9.- Oberg, E., Jones, F., Horton, H. y Ryffel, H., *Machinery's Handbook*, Ed. Industrial Press, pp 3028, 2008.
- 10.- Askeland, D. y Phule, P., *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Ed. Thomson, pp 169, 2006.
- 11.- Rodríguez, J. y Castro, L., *Procesos Industriales Para Materiales Metálicos*, Editorial Visión Libros, pp 4, 2006.
- 12.- Kronenberg M., *Machining Science and Application. Theory and Practice for Operation and Development of Machining Processes*, Ed. London, pp 138, 1966.
- 13.- Kronenberg M., *Machining Science and Application. Theory and Practice for Operation and Development of Machining Processes*, London, pp 121, 1966.
- 14.- Tien-Chien C. y Richard, A. W., *Computer Aided Manufacturing*, Ed. Prentice Hall, pp 156, 1984.
- 15.- Mompin, P. J., *Sistema CAD/CAM/CAE Diseño y Fabricación por Computadora*, México, Ed. Marcombo, pp 145, 1993.
- 16.- Tien-Chien, C. y Richard, A. W., *Computer Aided Manufacturing*, Ed. Prentice Hall, pp 245, 1984.

- 
- 
- 17.- Ertigungsverfahren Begriffe Einteilung, Deutsches Institut fr Normung, DIN 8580, Beuth, Berlin, 2003.
  - 18.- FFertigungsverfahren Spanen, Deutsches Institut fr Normung, DIN 8589, Beuth, Berlin, 2003.
  - 19.- Fertigungsverfahren Spanen, Teil 1: Drehen Einordnung Unterteilung Begriffe, Deutsches Institut fr Normung, DIN8589a, DIN 8589-1, Beuth, Berlin, 2003.
  - 20.- Baumgartner, H. y Knischewski, K., *Automatización de la Producción*, España, Ed. Marcombo, pp 228, 1993.
  - 21.- Kim, J., *Monetarism Is Not Enough*, Center for policy studies, Margaret Thatcher Foundation, pp 105-107, 1976.
  - 22.- Davim, J. P., *Machining Fundamentals and Recent Advances*, Ed. Springer-Verlag, pp 197, 2008.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS  
NUMÉRICO ELÁSTICO DE  
LOS ESPECÍMENES DE  
ACERO

### IV.1.- Método de Elementos Finitos (*MEF*)

El análisis del Método de Elementos Finitos *MEF*, originalmente introducido por *Turner* en 1956 [IV.1]. Es una poderosa técnica computacional para soluciones aproximadas a una variedad de problemas de Ingeniería complejos del *mundo real*. *MEF* se ha convertido en un paso esencial en el diseño o modelado de un fenómeno físico en diferentes disciplinas de la Ingeniería. Un fenómeno físico por lo general, se produce en un continuo de la materia (sólido, líquido, o gas) que implica varias variables de campo. Las variables de campo varían de un punto a otro, por lo que posee un infinito número de soluciones en el dominio.

El Método de Elementos Finitos se ha convertido en un elemento básico para predecir y simular el comportamiento físico de los sistemas complejos de Ingeniería. El programa comercial del análisis del Método de Elementos Finitos ha ganado común aceptación entre los Ingenieros en la industria y los investigadores en las universidades y laboratorios gubernamentales [IV.2].

El *MEF* es un método numérico basado en ecuaciones diferenciales para la resolución de problemas de Ingeniería. En el Método de Elementos Finitos se consideran las siguientes cuestiones; una función continua se aproxima a una serie de funciones finitas y mediante ese número finito de funciones se puede llegar a una solución equivalente de la función continua. La transformación de un problema real a una representación matemática se logra a través de elementos que a su vez éstos están conectados por nodos. El nodo especifica una coordenada en el espacio con grados de libertad, los movimientos de los nodos constituyen las incógnitas fundamentales del problema. Las variables nodales asignadas a un elemento son llamados grados de libertad [IV.2].

La construcción de soluciones a los problemas de Ingeniería requiere del Método de Elementos Finitos o bien el desarrollo de un programa informático basado en la formulación del *MEF*. Tal programa comercial de propósito general debe ser una potente y polivalente herramienta de análisis que se pueda utilizar en una amplia variedad de disciplinas de Ingeniería. Antes de utilizar cualquier programa basado en la formulación del *MEF* para generar un modelo de elementos finitos de un sistema real, las siguientes preguntas deben ser contestadas basadas en criterios técnicos y observaciones [IV.3]:

- ¿Cuáles son los objetivos de éste análisis?

- ¿Si el sistema físico se debe considerar entero como modelo, o sólo una parte?
- ¿Cuánto detalle se debe incluir en el modelo?
- ¿Cómo debería de ser refinado la malla de elementos finitos?

Para responder a estas preguntas, el gasto computacional debe ser equilibrado en contra de la exactitud de los resultados. Por lo tanto, el programa formulado por *MEF* se puede emplear de una manera correcta y eficiente después de considerar lo siguiente:

- Tipo de problema.
- Tiempo de dependencia.
- No linealidad.
- Modelado de idealizaciones / simplificaciones.

El programa de uso general debe ser capaz de simular problemas en una amplia gama de disciplinas de la Ingeniería, tal como en la siguiente disciplina [IV.4]:

Análisis estructural:

- Campos de deformación,
- Tensión.
- Fuerzas de reacción en un cuerpo sólido.

Este tipo de análisis aborda varios problemas estructurales diferentes, por ejemplo:

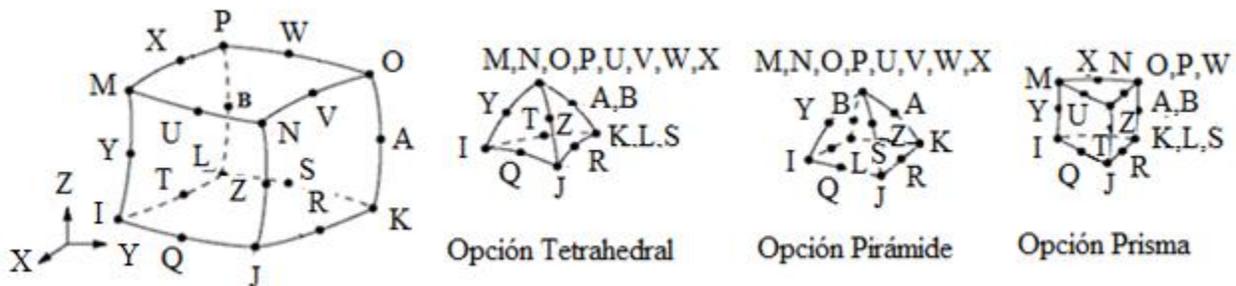
- Análisis estático.- Las cargas aplicadas y las condiciones de apoyo del cuerpo sólido no cambian con el tiempo. Los materiales no lineales y propiedades geométricas tales como plasticidad, contacto, fluencia, etc., son disponibles.
- Análisis Modal.- Esta opción se refiere a las frecuencias naturales y modos de formas de una estructura.
- Análisis armónico.- La respuesta de una estructura sometida a cargas sólo exhibiendo un comportamiento sinusoidal en el tiempo.
- Dinámico transitorio.- La respuesta de una estructura sometida a cargas con comportamiento arbitrario en el tiempo.

- Valores propios de pandeo.- Esta opción se refiere a las cargas de pandeo y modos de pandeo de una estructura.

Para el problema estructural en cuestión se utilizará el análisis estático para la determinación de los parámetros mencionados.

**IV.2.- Evaluación de desplazamientos y esfuerzos en el sistema de sujeción para el fresado**

El primer paso dentro del desarrollo del análisis que se desea elaborar es estipular que es una evaluación estructural. Mientras que para el cálculo de esfuerzos y deformaciones unitarias se utilizó el programa de comandos basado en el Método de Elementos Finitos, cuyos pasos generales se describen a continuación. Así obteniéndose el modelo parametrizado del sistema de sujeción y del espécimen a maquinar [IV.5]. Para el discretizado del sistema se requiere generar de manera automática los elementos finitos, de tal manera que se adapten a la geometría de las mordazas. Esto implica que las partes de volumen que son irregulares se tengan elementos pequeños y en las partes de volumen grandes se tengan elementos de mayor tamaño [IV.3].



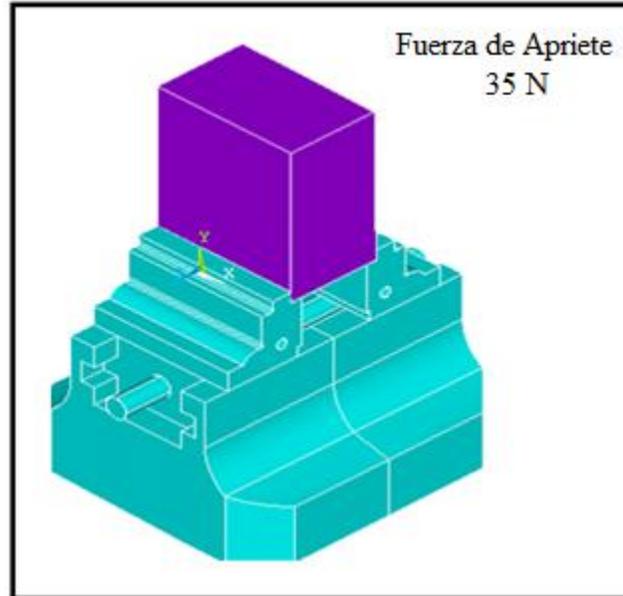
**Figura IV.1.-** Elemento utilizado para el mallado del sistema

Para el discretizado de las mordazas (*Profile gripping*) del sistema y del espécimen a maquinar se utilizaron elementos tipo *SOLID186*. El elemento *SOLID186* es de un orden superior en 3D, que presenta un comportamiento de desplazamiento cuadrático. El elemento se define por 20 nodos con tres grados de libertad por nodo; traslación en las direcciones X, Y y Z. El elemento soporta plasticidad, hiperelasticidad y gran capacidad de esfuerzo y deformación [III.3]. Cabe mencionar que el mallado de los modelos es el mismo para ambas pruebas realizadas, tanto para el análisis del fresado como para el barrenado de material.

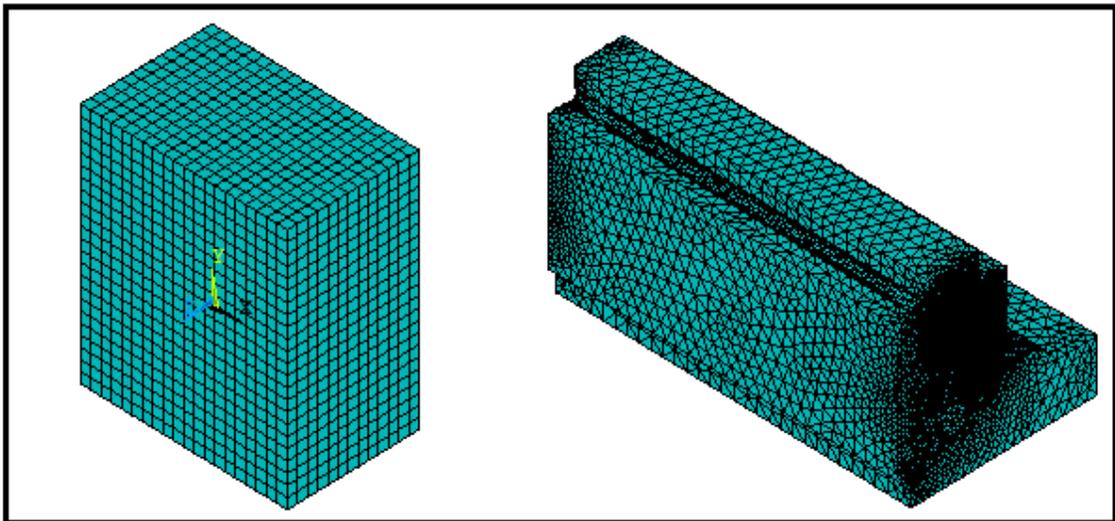
Los modelos a analizar son considerados con propiedades isotrópicas, homogéneas, continuas y lineales. También se utilizará el criterio de *Von Mises* para el análisis de los esfuerzos generados en ambos especímenes debido a que es el criterio de falla para los materiales dúctiles, tal es el caso para los aceros a analizar en esta investigación.

**SEQV:** Representa el esfuerzo equivalente de *Von Mises*.

**S1, S2, S3:** Representan los esfuerzos principales.



**Figura IV.2.-** Modelo parametrizado del sistema



**Figura IV.3.-** Geometría y mallado de los especímenes de estudio

El discretizado y geometrías, tanto para los especímenes que se analizaran (acero AISI 8620), como para la mordaza del sistema de sujeción (acero H-13) se muestran en la Figura IV.3 El análisis que se realiza es elaborado básicamente para observar los desplazamientos y esfuerzos en cada uno de los dos especímenes y poder tener de manera general una visualización de los efectos de la aplicación del agente externo. Por simplificación del problema, el análisis solamente se hará discretizando a una sola mordaza, donde la fineza de la malla que se requiere para tal análisis se realiza únicamente en las zonas críticas, como en la parte de sujeción de las mordazas y donde la geometría de ésta es extrema. Mientras que la asignación de las restricciones de frontera (desplazamiento) se consideró el área posterior de cada una de las mordazas. Para los seis grados de libertad posibles, es decir para cada uno de los ejes,  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ . Así como las rotaciones del mismo. Se define al módulo de *Young* ( $E$ ) con un valor de 200 GPa y la relación de *Poisson* ( $\nu$ ) como de 0.28 para ambos tipos de acero [IV.6].

Inicialmente, para la prueba del fresado y por el método de la flexión [IV.7] donde se le aplica la presión debido al maquinado en el área lateral. Para el análisis se aplica la carga al espécimen como una presión en el área a maquinar. Así obteniendo el desplazamiento y esfuerzo generado del acero AISI 8620 como primer paso. Posteriormente, por efecto de transmisión de carga, se obtiene el esfuerzo que existe en la zona posterior inferior del espécimen y éste esfuerzo es el que se aplica a la zona de sujeción de la mordaza del sistema. De acuerdo con la ecuación de esfuerzo se tiene que [IV.8]:

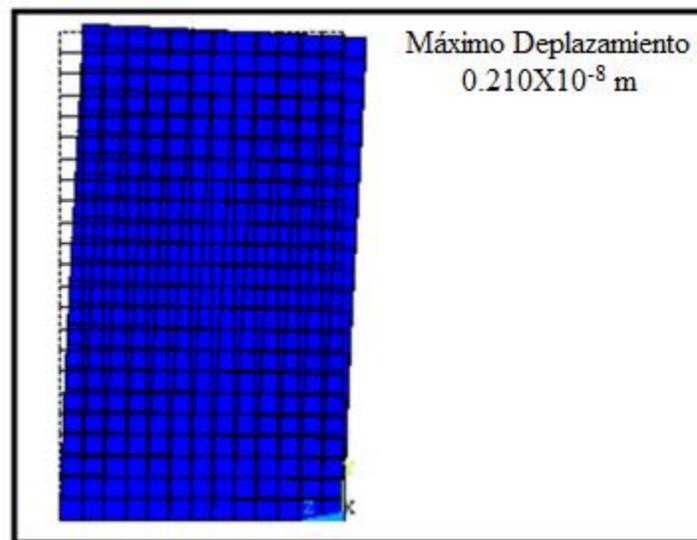
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{IV.1}$$

Para una carga de 1500 N y un área de  $0.0017 \text{ m}^2$  se tiene un esfuerzo de:

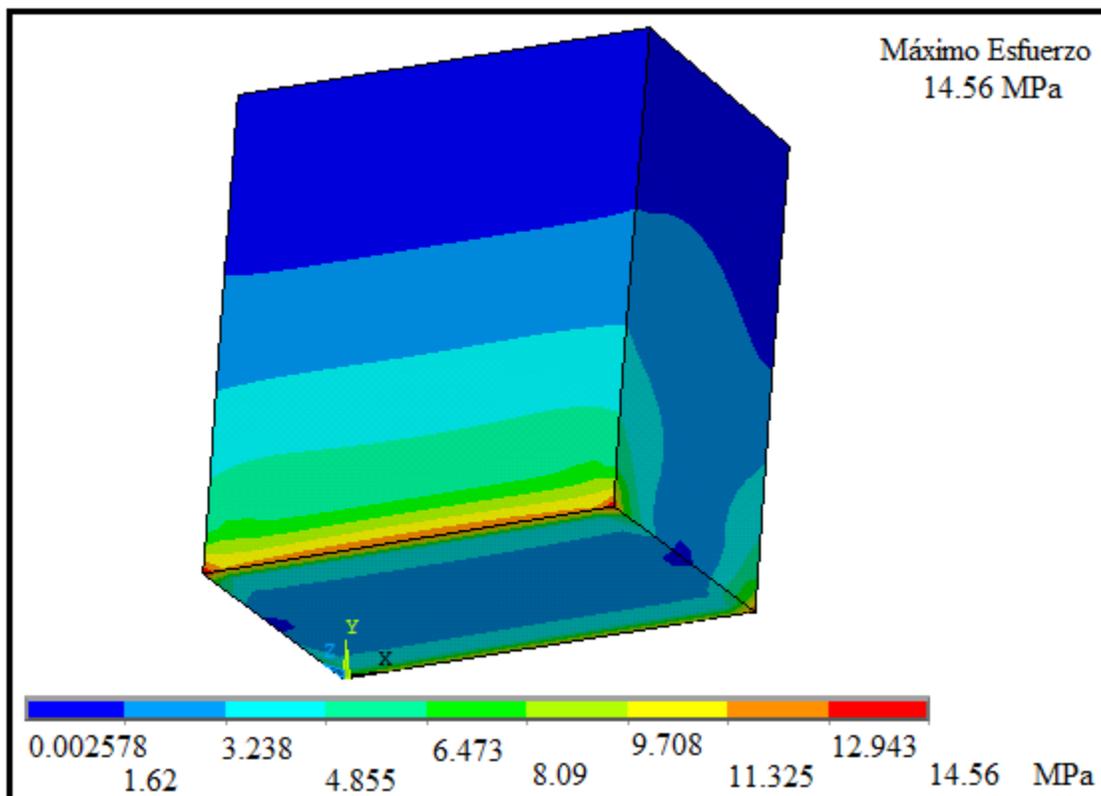
$$\sigma = \frac{1500N}{0.0017m^2} = 0.84MPa \quad \text{IV.1}^a$$

Se toma en cuenta los parámetros y restricciones anteriores y se realiza el análisis estático con la presión establecida. Así aplicando el Método de Elementos Finitos se obtienen valores de

desplazamientos y esfuerzos generados en el espécimen a maquinarse del acero AISI 8620, y posteriormente del acero H-13 del sistema de sujeción (Figura IV.4 y IV.5).

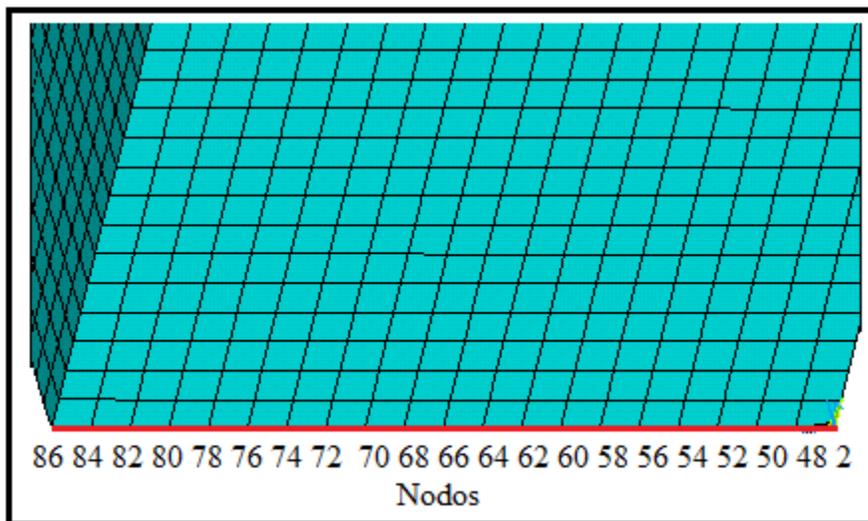


**Figura IV.4.-** Desplazamiento del cero AISI 8620 para el fresado



**Figura IV.5.-** Campo de esfuerzos equivalentes de *Von Mises* para el acero AISI 8620 para el fresado

Aplicando nuevamente el Método de Elementos Finitos para conocer los esfuerzos realizados por la presión sobre el área (Figura IV.5). El máximo esfuerzo equivalente de *Von Mises* (MPa) es en la parte frontal inferior del espécimen de acero AISI 8620 con valor de 14.56 MPa (Figura IV.5). Tal esfuerzo está muy por debajo de su límite de cedencia que es de 393 MPa para un acero conformado en caliente y luego maquinado. Por lo tanto, el material permanece en la zona elástica cuando se le aplica una carga de 1500 N. Para determinar el esfuerzo transmitido que existe en la zona de sujeción del sistema, se seleccionan los nodos de la parte posterior inferior del espécimen de acero AISI 8620 (Figura IV.6).



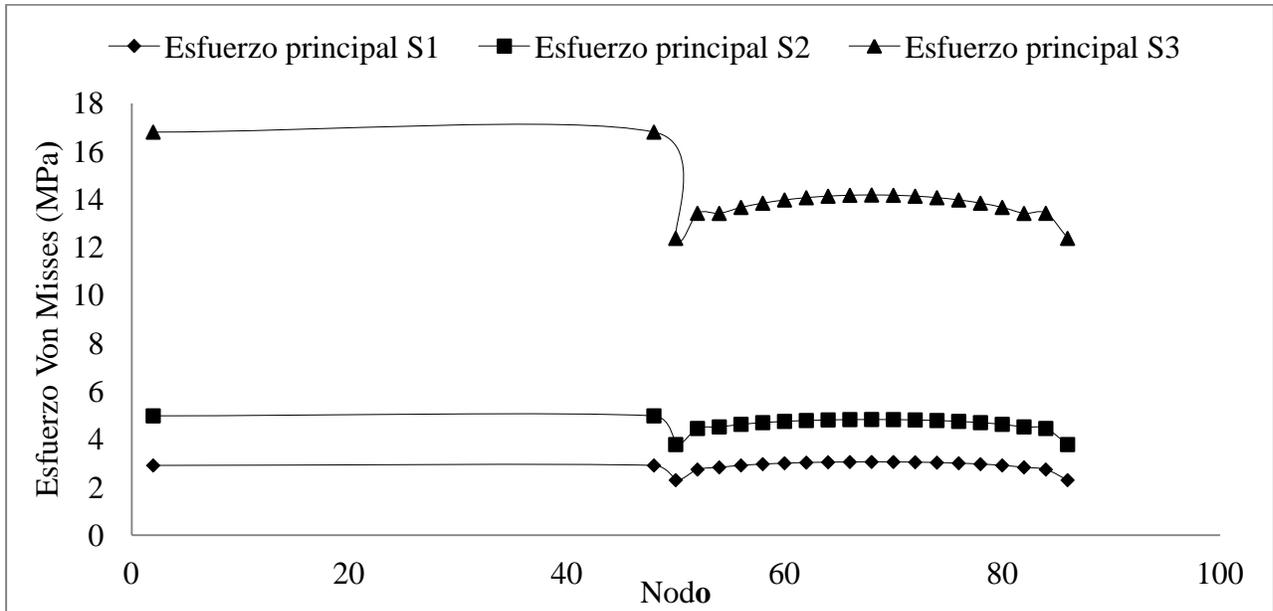
**Figura IV.6.-** Selección de nodos del espécimen de acero AISI 8620 para el fresado

Así los esfuerzos en general que se generan en cada uno de los nodos de la parte posterior inferior del espécimen se presentan en la Tabla IV.1.

Los esfuerzos equivalentes de *Von Mises* desarrollados en cada uno de los nodos del espécimen de acero AISI 8620 son los que se transmiten a la zona de sujeción de la mordaza del sistema (Figura IV.7). Ahora, el siguiente paso, es aplicar el esfuerzo generado de la parte posterior inferior del espécimen de acero AISI 8620 a la zona de sujeción de la mordaza. El valor equivalente máximo de *Von Mises* obtenido es de 12.985 MPa, este valor se aplica en la zona de agarre del sistema como presión en toda el área de  $0.00012 \text{ m}^2$  (Figura IV.8).

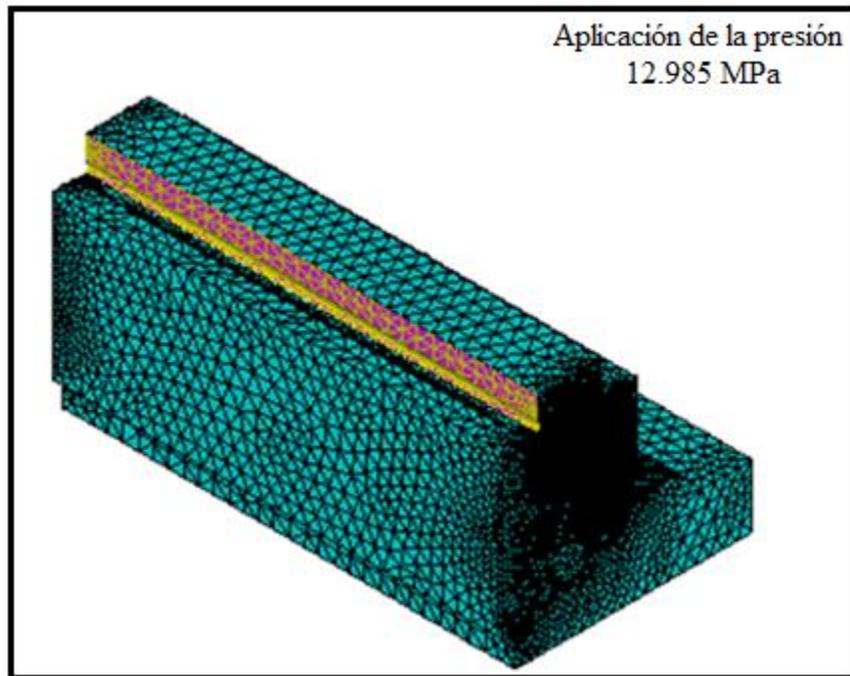
**Tabla IV.1.-** Valores de esfuerzos de *Von Misses* que se transmiten a la zona de agarre de la mordaza para el fresado

<b>Nodo</b>	<b>Esfuerzo Principal S1</b>	<b>Esfuerzo Principal S2</b>	<b>Esfuerzo Principal S3</b>	<b>Esfuerzo Equivalente Von Misses SEQV</b>
2	2.9051	4.9736	16.8	12.985
48	2.9051	4.9736	16.8	12.985
50	2.2943	3.7773	12.37	9.4221
52	2.7356	4.4485	13.416	9.738
54	2.8261	4.5136	13.412	9.8516
56	2.9074	4.6206	13.66	10.006
58	2.9607	4.6913	13.837	10.123
60	2.998	4.7436	13.971	10.212
62	3.0236	4.7801	14.066	10.277
64	3.0401	4.8041	14.129	10.321
66	3.0495	4.8178	14.166	10.346
68	3.0525	4.8222	14.178	10.354
70	3.0495	4.8178	14.166	10.346
72	3.0401	4.8041	14.129	10.321
74	3.0236	4.7801	14.066	10.277
76	2.998	4.7436	13.971	10.212
78	2.9607	4.6913	13.837	10.123
80	2.9074	4.6206	13.66	10.006
82	2.8261	4.5136	13.412	9.8516
84	2.7356	4.4485	13.416	9.738
86	2.2943	3.7773	12.37	9.4221
<b>Valores mínimos</b>				
<b>Nodo</b>	68	2	2	50
<b>Valor</b>	3.0525	4.9736	16.8	9.4221
<b>Valores máximos</b>				
<b>Nodo</b>	50	50	50	2
<b>Valor</b>	2.2943	3.7773	12.37	12.985

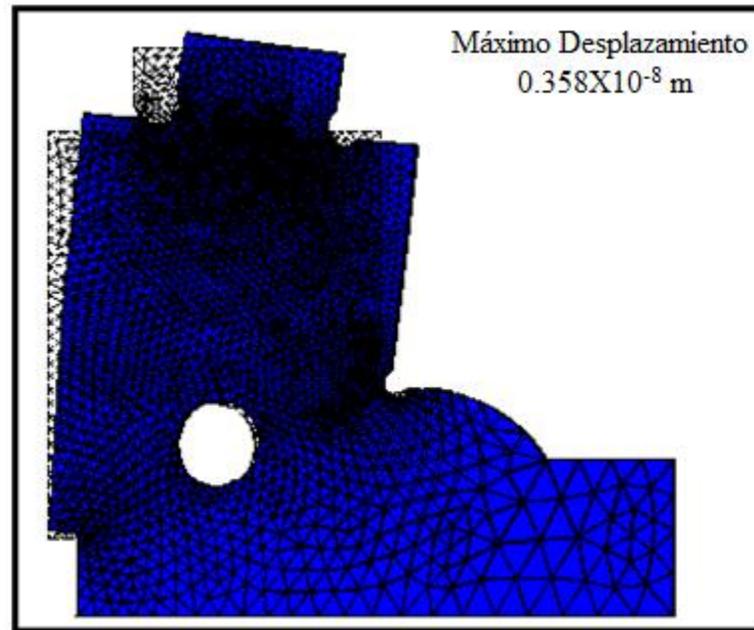


**Figura IV.7.-** Gráfica de esfuerzos equivalentes de *Von Mises* en cada nodo de transmisión del acero AISI 8620 para el fresado

El desplazamiento que sufre la mordaza del sistema cuando se le aplica una presión sobre el área de sujeción se observa en la Figura IV.9.

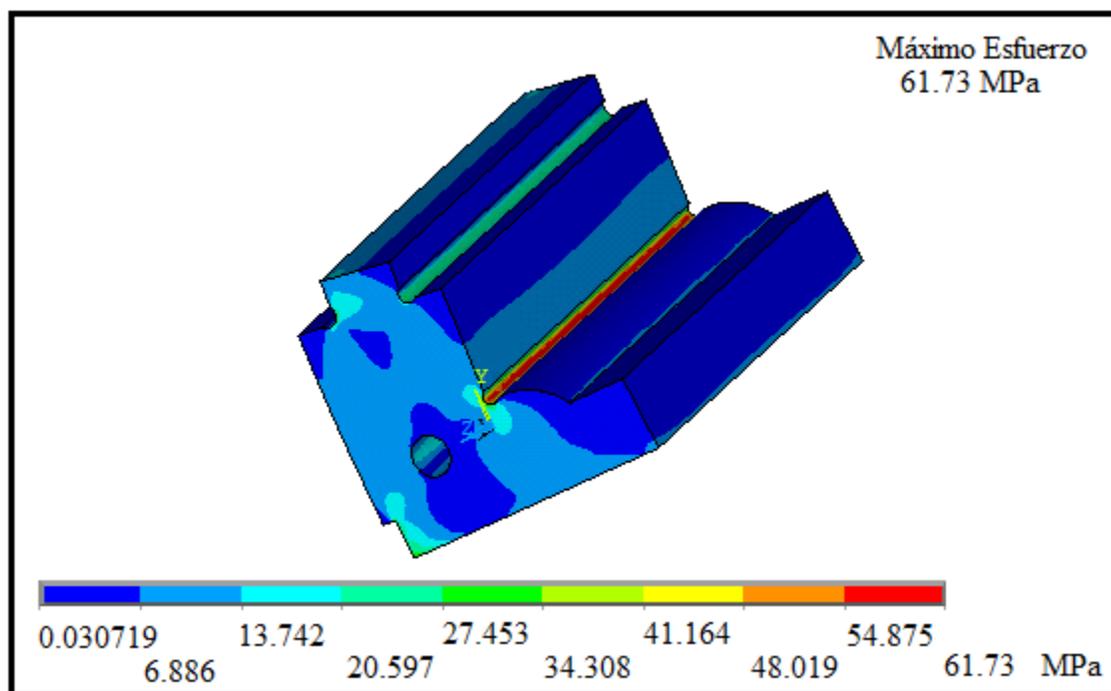


**Figura IV.8.-** Zona de sujeción del sistema



**Figura IV.9.-** Desplazamiento de la mordaza de sujeción en el fresado

Los esfuerzos equivalentes de *Von Mises* generados se encuentran en las zonas donde la geometría del modelo es crítica, es decir, la holgura es bastante pronunciada.



**Figura IV.10.-** Zona crítica de esfuerzos equivalentes de *Von Mises* en la mordaza para el fresado

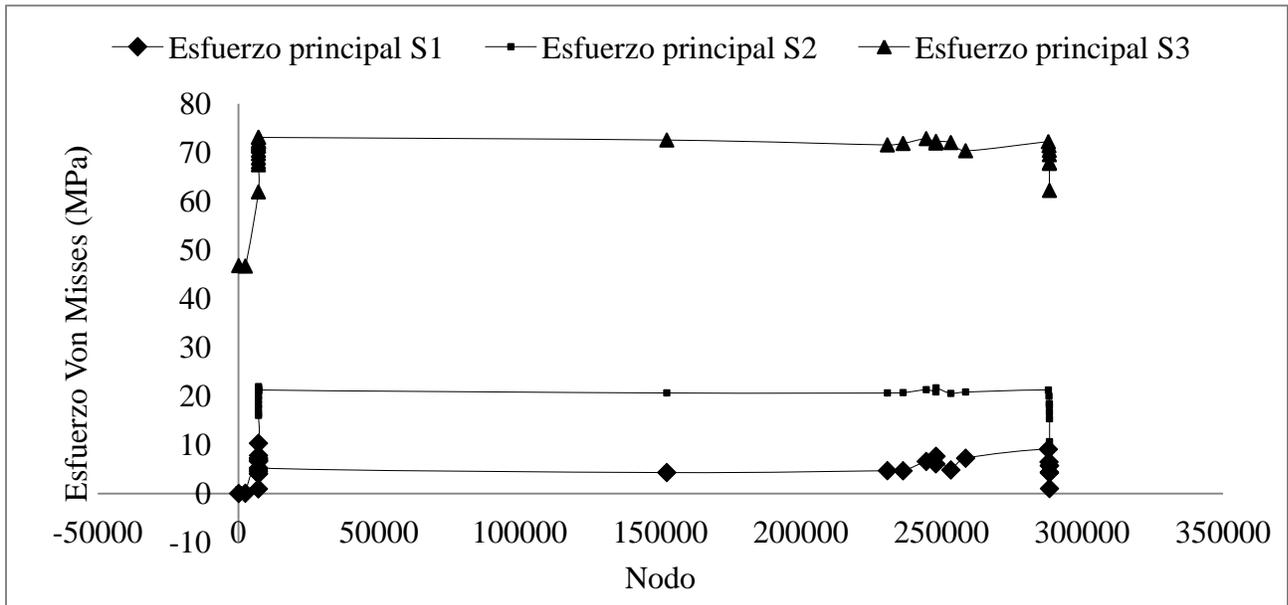
**Tabla IV.2.-** Valores de esfuerzos equivalentes de *Von Mises* en la zona crítica de la mordaza en el fresado

Nodo	Esfuerzo Principal S1	Esfuerzo Principal S2	Esfuerzo Principal S3	Esfuerzo Equivalente <i>Von Mises</i> SEQV
118	0.021557	0.78056	46.799	46.403
2492	0.066711	0.47449	46.703	46.434
7139	0.96888	10.583	61.935	56.773
7141	7.265	16.058	67.494	56.349
7143	4.4967	16.385	68.908	59.367
7145	4.024	17.47	68.074	59.498
7147	4.0842	18.283	69.789	59.882
7149	4.8422	19.232	71.408	60.665
7151	6.6239	20.097	70.445	58.265
7153	7.243	20.946	72.196	59.301
7155	10.328	21.678	71.829	56.685
7157	7.0226	21.16	71.334	58.537
7159	6.6945	21.195	72.361	59.751
7161	6.7345	21.537	72.254	59.515
7163	7.8126	21.962	73.131	59.519
7165	5.2668	21.295	73.126	61.434
152291	4.3201	20.673	72.58	61.73
230704	4.7034	20.664	71.575	60.492
236275	4.6834	20.733	71.874	60.777
244506	6.5953	21.335	72.868	60.27
247922	6.1015	20.876	71.953	59.848
247982	7.6491	21.703	72.304	58.899
253254	4.8475	20.561	72.058	60.894
258507	7.2665	20.86	70.378	57.532
287919	9.0944	21.266	72.233	58.019
288140	6.4937	20.007	71.422	59.337
288250	4.4143	18.479	70.467	60.264
288275	5.7222	18.065	69.568	58.657
288287	5.7387	16.724	67.775	57.339
288308	4.2536	15.372	67.905	58.884
288311	1.0353	10.657	62.231	56.997
<b>Valores mínimos</b>				
Nodo	7155	7163	7163	118
Valor	10.328	21.962	73.131	46.403
<b>Valores máximos</b>				

Análisis de esfuerzos aplicados a sistemas de sujeción (de bajo perfil) para mecanizado por arranque de viruta a aceros aleados (AISI 8620)

Nodo	118	2492	2492	152291
Valor	0.021557	0.47449	46.703	61.73

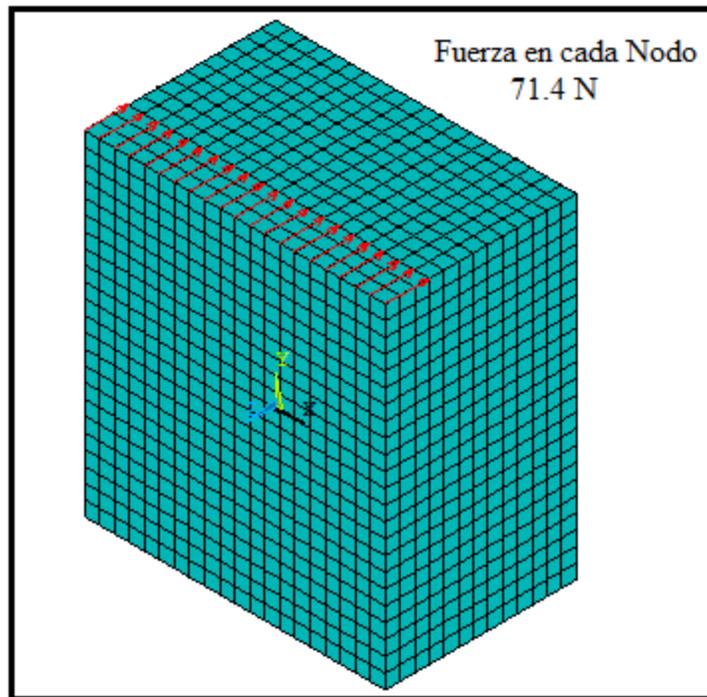
Obteniendo la gráfica que representa los esfuerzos equivalentes de *Von Mises* que hay en cada nodo en la zona crítica del sistema de sujeción, obteniendo el máximo esfuerzo equivalente de *Von Mises* en el nodo 152,291 con un valor de 61.73 MPa, estando muy por debajo de su esfuerzo de cedencia (de 1380 MPa) del el acero AISI H-13.



**Figura IV.11.-** Gráfica de esfuerzos equivalentes de *Von Mises* en cada nodo en la zona crítica de la mordaza para el fresado

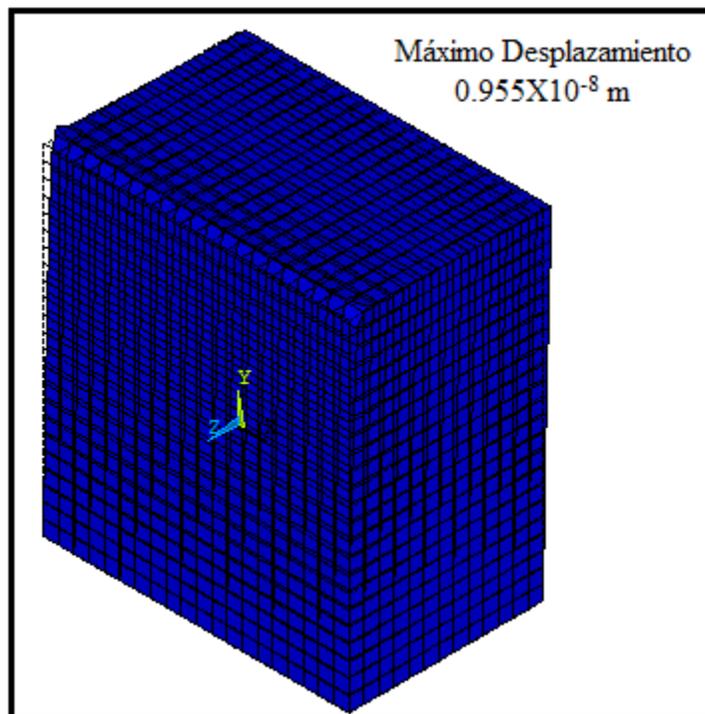
**IV.3.- Evaluación de desplazamientos y esfuerzos en el sistema de sujeción para barrenado**

Para la realización del análisis de barrenado se toman las mismas consideraciones que para el fresado. Es decir, se seleccionó el mismo elemento para la evaluación (*SOLID 186*). Asimismo, se aplican las mismas restricciones de desplazamiento que se aplican en el desarrollo del método para flexión. Para este caso de barrenado, se utiliza una carga puntual de 1300 N. Sin embargo, se tomará la máxima carga de ambas pruebas, lo cual es de 1500 N. La carga se aplica a la máxima distancia de la viga, que es de 0.04445 m repartida en 21 nodos, que le corresponde un valor de 71.4 N (Figura IV.12).



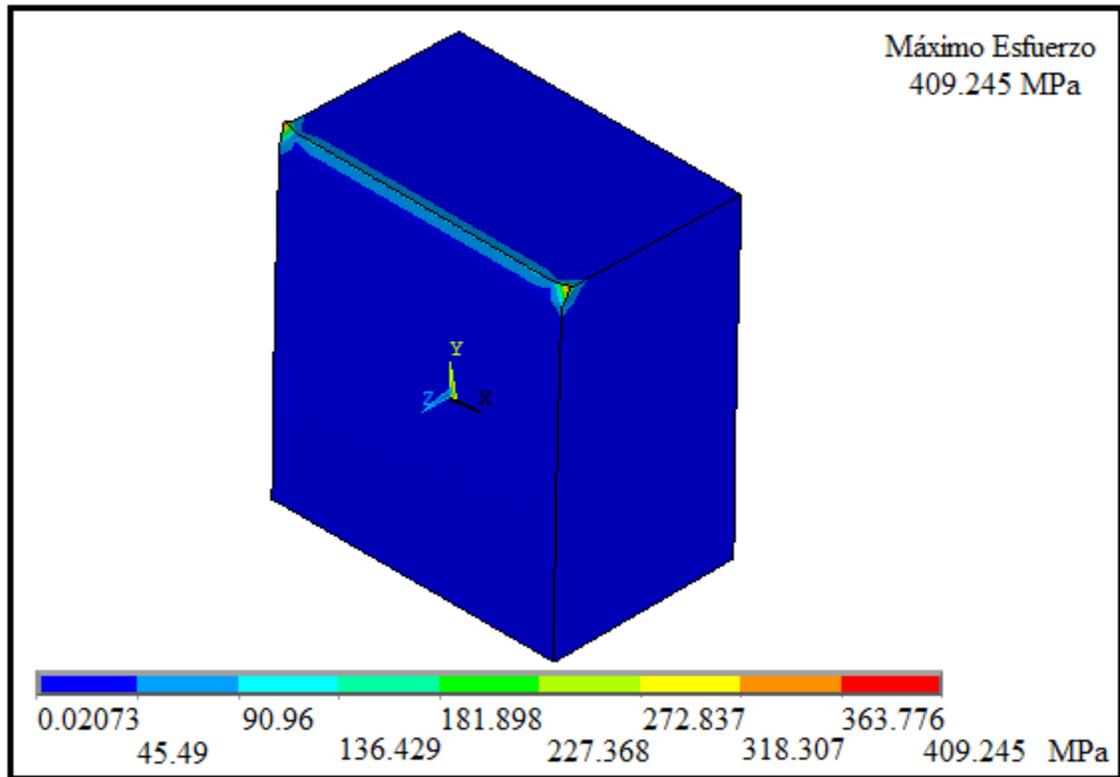
**Figura IV.12.-** Colocación de la carga sobre el espécimen de acero AISI 8620

Se procede de la misma forma que para el fresado, se aplica la carga al espécimen de acero AISI 8620 y se analizan los puntos posteriores inferiores de este espécimen.



**Figura IV.13.-** Desplazamiento del acero AISI 8620 para el barrenado

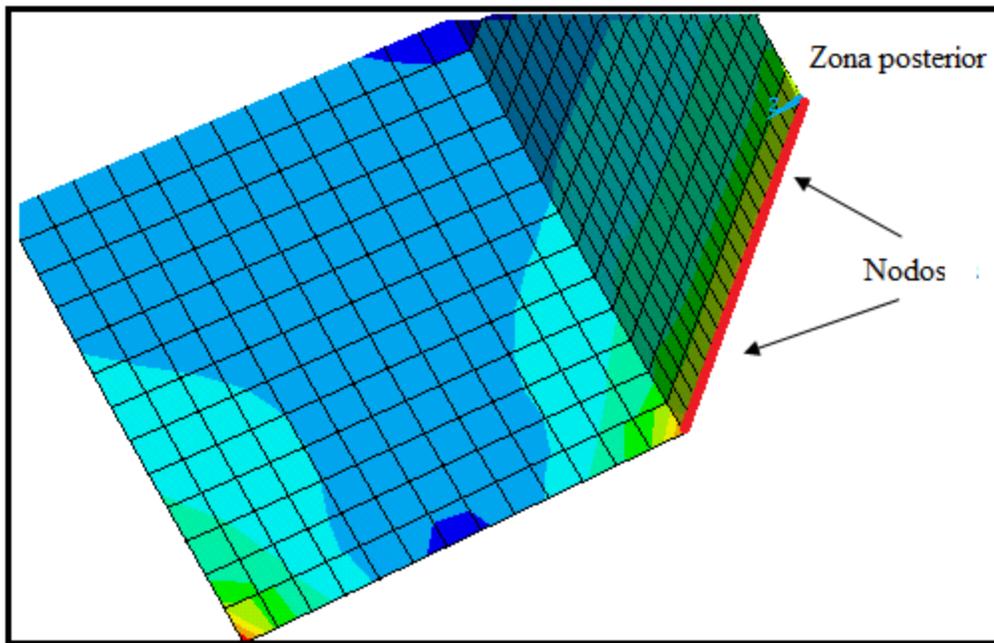
En el cuál, el máximo esfuerzo equivalente de *Von Mises* es transmitido a la zona de sujeción de la mordaza (*Profile gripping*), por lo que tiene un valor de 409.245 MPa.



**Figura IV.14.-** Campo de esfuerzos equivalentes de *Von Mises* del acero AISI 8620 para el barrenado

Así que, para un acero AISI 8620 conformado en caliente y maquinado ya rebasa su límite de cedencia que es de 393 MPa y el material se deformaría permanentemente por efecto de la carga. Sin embargo, para un mismo acero pero estirado en frío, aun está dentro de la zona elástica, ya que su límite de fluencia es de 586 MPa

La selección de los nodos es la misma que para el fresado, se seleccionan los nodos de la parte posterior inferior del espécimen y su valor máximo de esfuerzo equivalente de *Von Mises* es el que se transmite a la zona de agarre de la mordaza tal y como se observa en la Figura IV.15.



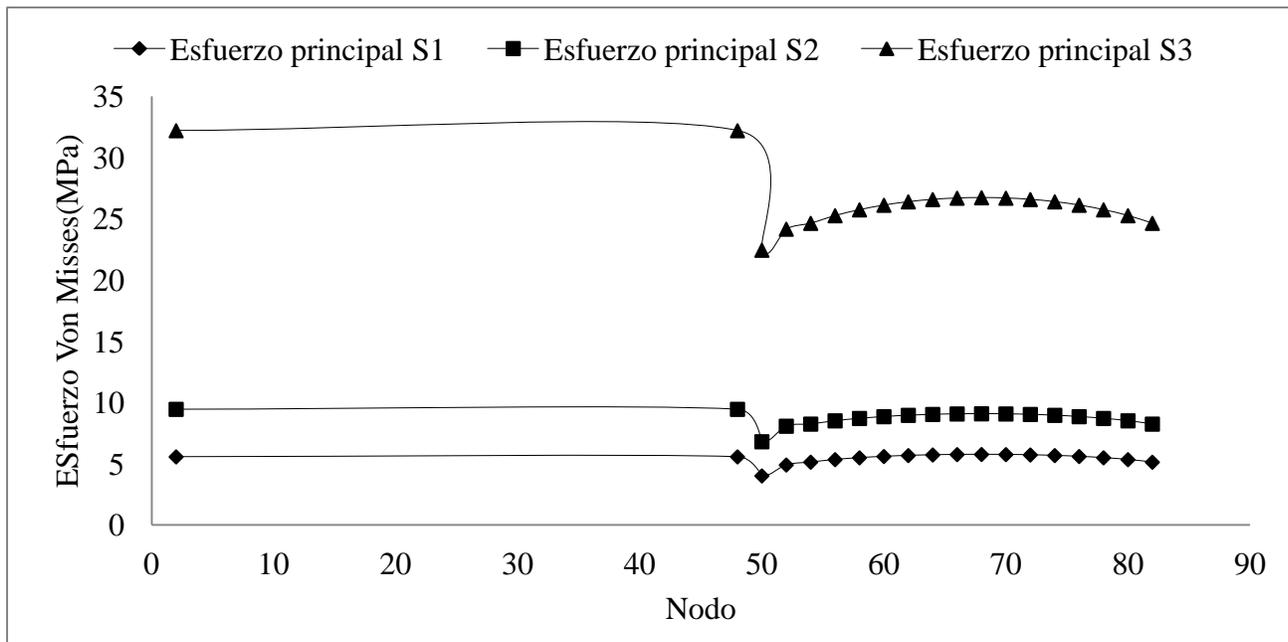
**Figura IV.15.-** Selección de nodos del espécimen de acero AISI 8620 para el barrenado

**Tabla IV.3.-** Valores de esfuerzos de *Von Mises* que se transmiten a la zona de agarre de la mordaza para el barrenado

Nodo	Esfuerzo Principal S1	Esfuerzo Principal S2	Esfuerzo Principal S3	Esfuerzo Equivalente <i>Von Mises</i> SEQV
2	5.5762	9.4588	32.209	24.92
48	5.5762	9.4588	32.209	24.92
50	4.0201	6.8134	22.451	17.206
52	4.9142	8.0818	24.169	17.882
54	5.1406	8.253	24.645	18.149
56	5.3506	8.5199	25.267	18.536
58	5.4985	8.7124	25.746	18.847
60	5.6062	8.8607	26.122	19.097
62	5.6825	8.9678	26.399	19.285
64	5.7331	9.0401	26.588	19.414
66	5.762	9.0818	26.698	19.49
68	5.7714	9.0954	26.734	19.514

70	5.762	9.0818	26.698	19.49
72	5.7331	9.0401	26.588	19.414
74	5.6825	8.9678	26.399	19.285
76	5.6062	8.8607	26.122	19.097
78	5.4985	8.7124	25.746	18.847
80	5.3506	8.5199	25.267	18.536
82	5.1406	8.253	24.645	18.149
84	4.9142	8.0818	24.169	17.882
<b>Valores mínimos</b>				
<b>Nodo</b>	68	2	2	50
<b>Valor</b>	5.7714	9.4588	32.209	17.206
<b>Valores máximos</b>				
<b>Nodo</b>	50	50	50	2
<b>Valor</b>	4.0201	6.8134	22.451	29.92

Los esfuerzos que se generan en cada uno de los puntos críticos en la zona de agarre del espécimen de acero AISI 8620 son como se muestra en la Figura IV.16.



**Figura IV.16.-** Gráfica de esfuerzos equivalentes de *Von Mises* en cada nodo de transmisión del acero AISI 8620 para el barrenado

Nuevamente el siguiente paso es aplicar el máximo esfuerzo equivalente de *Von Mises* generado en la parte posterior inferior del espécimen de acero AISI 8620 a la zona de sujeción de la mordaza, teniendo un valor de 29.92 MPa, este valor lo aplicamos en la zona de agarre del sistema.

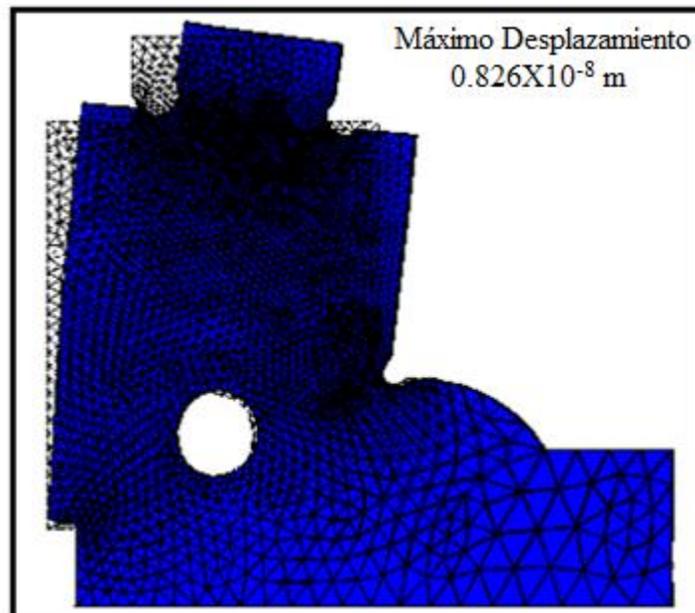


Figura IV.17.- Desplazamiento de la mordaza de sujeción en el barrenado

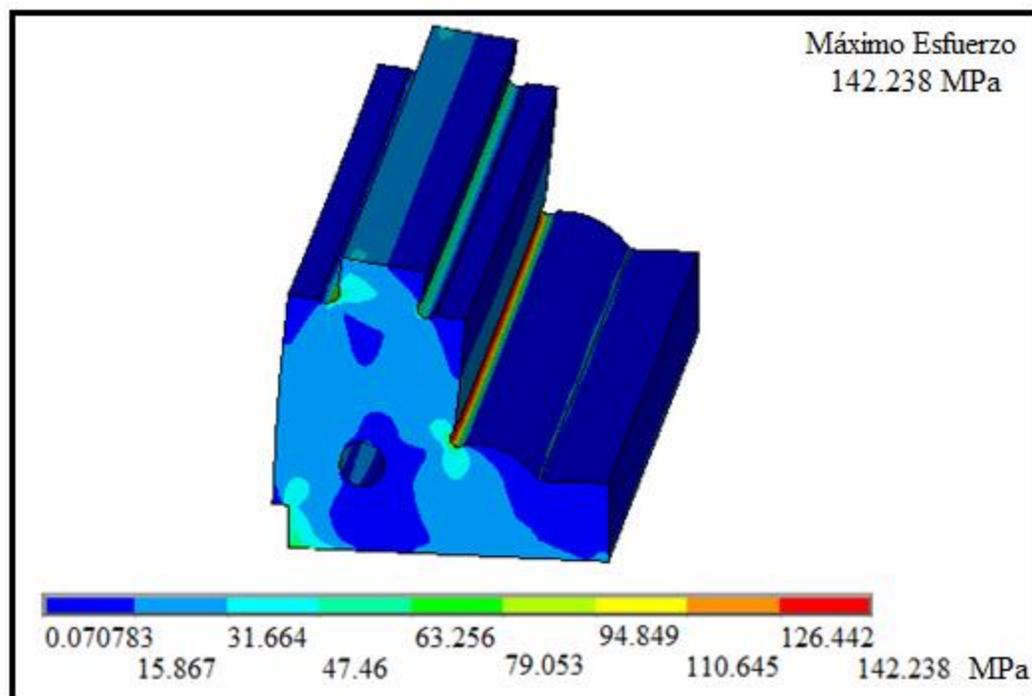


Figura IV.18.- Zona crítica de esfuerzos equivalentes de *Von Mises* en la mordaza para el barrenado

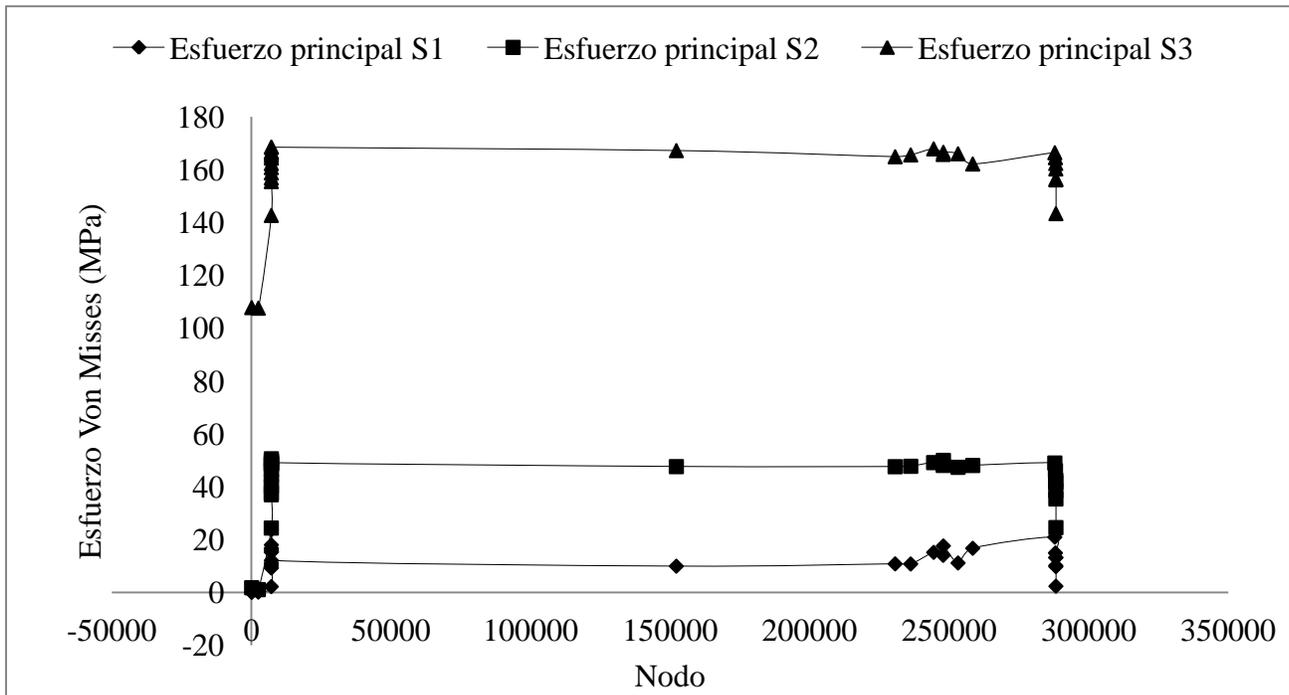
Los esfuerzos equivalentes de *Von Misses* que se generan en la mordaza de sujeción, son por lo tanto, en las holguras más pronunciadas de la geometría de la mordaza. Por lo tanto y nuevamente los valores de cada nodo en la zona crítica del sistema de sujeción son los siguientes:

**Tabla IV.4.-** Valores de esfuerzos de *Von Misses* en la zona crítica de la mordaza para el barrenado

<b>Nodo</b>	<b>Esfuerzo Principal S1</b>	<b>Esfuerzo Principal S2</b>	<b>Esfuerzo Principal S3</b>	<b>Esfuerzo Equivalente Von Misses SEQV</b>
118	0.049672	1.7986	107.83	106.92
2492	0.15371	1.0933	107.61	106.99
7139	2.2325	24.385	142.71	130.82
7141	16.74	37	155.52	129.84
7143	10.361	37.755	158.78	136.79
7145	9.2722	40.254	156.86	134.79
7147	9.4108	42.129	160.81	137.98
7149	11.157	44.314	164.54	139.78
7151	15.263	46.307	162.32	134.25
7153	16.689	48.264	166.35	136.64
7155	23.799	49.95	165.51	130.61
7157	16.181	48.758	164.37	134.88
7159	15.425	48.838	166.73	137.68
7161	15.518	49.625	166.49	137.13
7163	18.002	50.605	168.51	137.14
7165	12.136	49.067	168.5	141.56
152291	9.9544	47.635	167.24	142.24
230704	10.838	47.613	164.92	139.38
236275	10.791	47.772	165.61	140.04
244506	15.197	49.159	167.9	138.87
247922	14.059	48.102	165.79	137.9
247982	17.625	50.009	166.6	135.71
253254	11.17	47.376	166.04	140.31
258507	16.744	48.067	162.17	132.57
287919	20.955	49.002	166.44	133.69
288140	14.963	46.101	164.57	136.72
288250	10.171	42.578	162.37	138.86
288275	13.185	41.625	160.3	135.16
288287	13.223	38.536	156.17	132.12
288308	9.8011	35.421	156.47	135.68

288311	2.3855	24.557	143.39	131.33
<b>Valores mínimos</b>				
Nodo	7155	7163	7163	118
Valor	23.799	50.605	168.51	106.92
<b>Valores máximos</b>				
Nodo	118	2492	2492	152291
Valor	0.049672	1.0933	107.61	142.24

La Figura IV.19 indica que el material con el cual está hecho el sistema de sujeción soporta la carga transmitida del espécimen de acero AISI 8620 cuando se somete al barrenado.



**Figura IV.19.-** Gráfica de esfuerzos equivalentes de *Von Mises* en cada nodo en la zona crítica de la mordaza para el barrenado

Debido a que las mordazas están hechas del material acero H-13 con un límite de cedencia de 1380 MPa [IV.6]. Por lo que soportan los esfuerzos equivalentes de *Von Mises* transmitidos sin ninguna deformación permanente. Sin embargo, los cálculos arrojados por el Método de Elementos Finitos indican que para el maquinado de la pieza en el conformado del *block toma de gas* se requiere un material de acero AISI 8620 conformado por estirado en frío o conformado por temple y revenido, ya que sus límites de cedencia son 586 MPa y 683 MPa respectivamente [IV.10], lo que, soportará

muy bien las cargas de trabajo sin ningún problema para la realización de este tipo de maquinado.

#### IV.4.- Sumario

En este capítulo se presentó el seguimiento del análisis numérico desde una pequeña introducción al Método de Elementos Finitos. Se realizaron dos pruebas para el análisis, que son fundamentales para maquinar la pieza de acero AISI 8620. Las pruebas son el fresado y el barrenado de material. Se inicio dicho análisis numérico, determinando los parámetros principales de trabajo. Se realizó el mallado de cada uno de los especímenes de acero y se procedió a colocar las cargas que se tienen para el maquinado del material. Se obtuvieron como resultado los desplazamientos y los esfuerzos equivalentes de *Von Misses* generados de cada uno de los especímenes a analizar. Es importante mencionar que el sistema de sujeción de bajo perfil soporta las cargas de maquinado de estas dos pruebas, sin embargo, el material a trabajar para el conformado del *block toma de gas* tiene que ser de un acero AISI 8620 que esté por encima de los 500 MPa, tal es el caso de los conformados estirados en frio o templados y revenidos o algún otro que esté por encima de los mencionados.

#### IV.5.- Referencias

- 1.- Erdogan, M. e Ibrahim, G., *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using Ansys*, Ed. Springer Science-n Business Media, pp 2, 2006.
- 2.- Ceretti, E., Lazzaroni, C., Menegardo, L. y Altan, T., *Turning Simulations Using a Three-Dimensional FEM Code*, pp 93, 2000.
- 3.- Mackerle, J., *2D and 3D Finite Element Meshing and Remeshing*, Ed. Engineering Computations, pp 1112, 2001.
- 4.- Tien-Chien, C. y Richard, A. W., *Computer Aided Manufacturing*, Prentice Hall, pp 107, 1984.
- 5.- Klocke, F., *Manufacturing Processes 1: Lathing, Milling, Drilling*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 356, 2011.
- 6.- Degarmo, E., Black, J. y Kohser, R., *Materials and Processes in Manufacturing*, Ed. Wiley, pp 171, 2003.
- 7.- Davim, J. P., *Machining Fundamentals and Recent Advances*, Springer-Verlag London Limited, pp 13, 2008.
- 8.- Hibbeler, R. C., *Mecánica de Materiales*, Edición México, pp 314, 2005.

- 
- 
- 9.- Liu, C. R. y Barash, M. M., Variables governing patterns of mechanical residual stress in a machined surface, *Journal of Engineering for Industry*, Vol.116, pp 85, 1994.
- 10.- Askeland, R. D. y Phule, P., *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Ed. Thomson, pp 320, 2006.

CAPÍTULO V ANÁLISIS  
NUMÉRICO  
ELASTOPLÁSTICO DE LOS  
ESPECÍMENES DE ACERO

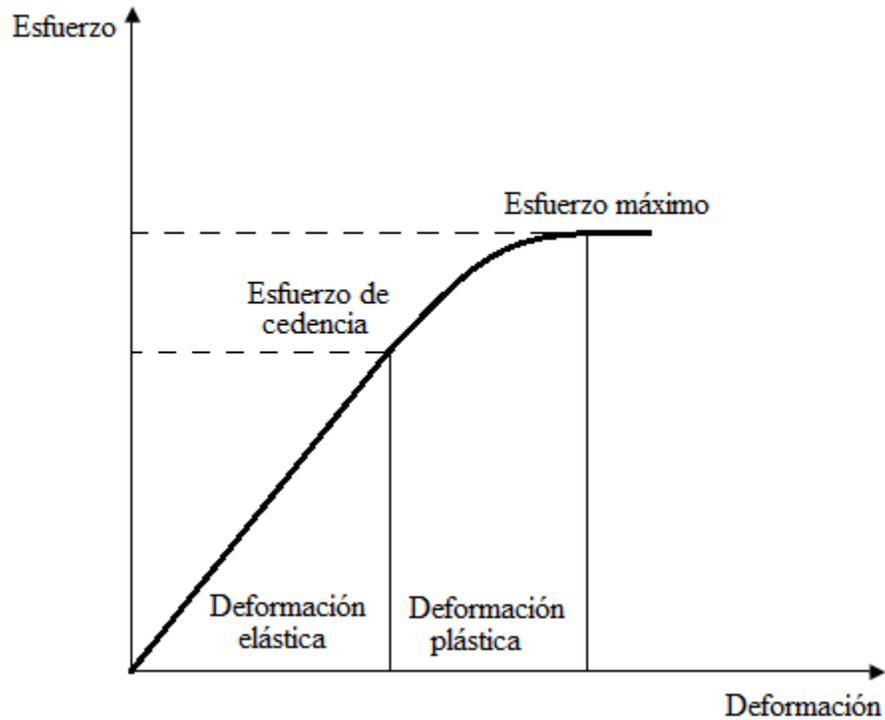
### V.1.- Generalidades

La principal característica del comportamiento plástico de los sólidos, es que la relación entre las tensiones y las deformaciones no es única, como lo es en el caso de la elasticidad lineal. Como una consecuencia de un estado elástico a un plástico se observan deformaciones remanentes en el material una vez retirada las cargas o disipados los esfuerzos. Para diferenciar el comportamiento entre dos materiales, uno con características elásticas no lineales y otro elastoplástico, debe analizarse el proceso de descarga, ya que el material elástico no lineal seguirá la misma curva de carga. Mientras que si el material se encuentra en la zona plástica, asegura una curva diferente que depende de la historia del material [V.1].

Para poder definir lo que es elastoplasticidad, o bien lo que es un comportamiento elastoplástico de un material, es importante señalar las propiedades elásticas y plásticas de un material. Sin embargo, como es el caso de la mayoría de los materiales en la Ingeniería, existen diferentes propiedades que caracterizan a cada uno de ellos. Por lo tanto se hace uso de una gráfica para caracterizar a cada material [V.2].

La curva en cuestión, por lo regular es obtenida de una prueba de tensión uniaxial-monotónica, dónde se indica los puntos más importantes. Es decir, se encuentran las propiedades del material ensayado. Específicamente en materiales que son muy rígidos, un esfuerzo de tensión pequeño lleva consigo un comportamiento elástico del material, esto significa que un pequeño incremento de tensión provoca pequeños incrementos de deformación, si la carga se devuelve a cero, el cuerpo recupera su forma original. Dicho de otra manera, la deformación que se presenta es completamente reversible [V.3].

Se ha comprobado que los materiales tienen un límite, llamado límite elástico o punto de cedencia. Tal que si bajo ciertas cargas homogéneas se supera dicho límite, existirán deformaciones remanentes y el cuerpo no recupera su forma original. Es decir, aparecen deformaciones no-reversibles. Este tipo de comportamiento se le conoce como elastoplástico y se presenta en la mayoría de los metales conocidos y también en los metales utilizados en la Ingeniería. En la Figura V.1 se observa una curva esfuerzo-deformación, mostrando las propiedades elastoplásticas de un material, éstas propiedades son obtenidas de un ensayo de tensión [V.4].



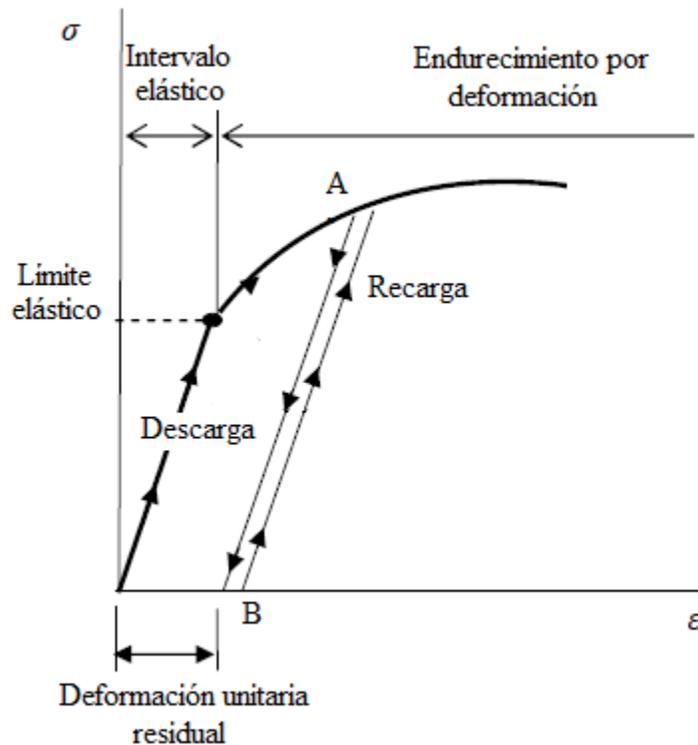
**Figura V.1.-** Comportamiento elastoplástico de un material

### **V.2.- Endurecimiento por deformación (reglas de endurecimiento)**

En los últimos años recientes, se ha generado un gran interés en la aplicación de la macroscopía de la plasticidad a los problemas de la Ingeniería asociados con diseños estructurales [V.1]. La teoría de plasticidad es una amplia rama de la Mecánica que trata del cálculo de los esfuerzos y deformaciones en un cuerpo hecho de un material dúctil, que se encuentra permanentemente deformado por un conjunto de fuerzas aplicadas [V.5].

Esta teoría se fundamenta en ciertas observaciones experimentales sobre la conducta macroscópica de metales en estado uniforme de esfuerzos combinados. A diferencia de los sólidos elásticos, en los cuales el estado de deformación depende solo del estado final de esfuerzos, la deformación que ocurre en un sólido plástico se determina por la historia completa de carga. El problema de plasticidad es por lo tanto específicamente de naturaleza incremental, la distorsión final del sólido se obtiene como la suma total de distorsión incremental siguiendo la trayectoria de deformación. Un material inicialmente isotrópico, consecuentemente llega a ser anisotrópico y sus propiedades mecánicas varían con la dirección de la carga [V.7]. Las reglas de endurecimiento es un concepto

fundamental que describe los cambios, los cuales toman lugar en el dominio o superficie (conocido como superficie de cedencia). Esto prescribe la condición para el inicio del flujo plástico como un resultado de la deformación plástica. En general, la superficie de cedencia puede cambiar en forma de distorsión de la superficie de cedencia, tamaño (endurecimiento isotrópico) y/o localización de centro (endurecimiento cinemática) como una consecuencia de deformación plástica. El concepto de endurecimiento por deformación implica que un material está esforzado en su región lineal-elástica, si el esfuerzo en él está dentro de la porción lineal inicial de su diagrama esfuerzo-deformación y por debajo de su límite elástico.



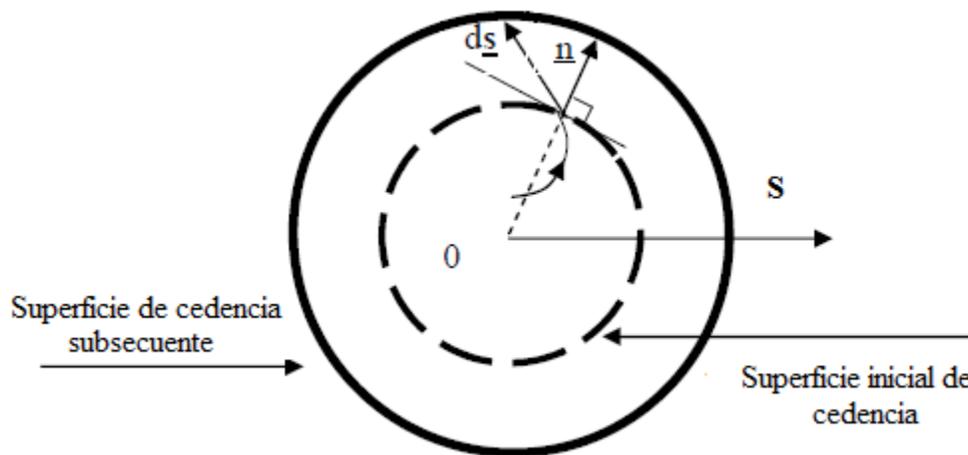
**Figura V.2.-** Gráfica esfuerzo-deformación unitaria en descarga y carga

El comportamiento de la descarga, y la posterior recarga de probetas metálicas para un ensayo uniaxial esforzadas mas allá de su límite elástico, son de gran importancia. Si una probeta se descarga en forma gradual desde un valor cualquiera de esfuerzo superior al límite elástico, desde el punto A, en la Figura V.2, la relación esfuerzo–deformación unitaria en la descarga sigue una línea recta paralela a la parte lineal de la curva esfuerzo-deformación unitaria, pero desplazada hacia la derecha. La intersección de esta línea de descarga con el eje de deformación unitaria (punto B, en la Figura V.2) representa la deformación unitaria residual permanente que queda en el material

después de retirar la carga. Si la probeta se descarga desde el punto A hasta el punto B y después de algún tiempo se recarga como si fuera un material virgen, su esfuerzo de fluencia estará cerca al punto A y será mayor que el original. Este proceso del esfuerzo de cedencia se conoce como endurecimiento por deformación [V.8].

### V.3.- Endurecimiento isotrópico

Una de las principales reglas básicas de endurecimiento utilizadas para describir cambios en la superficie de cedencia es el endurecimiento isotrópico. Esta regla postula que la superficie de cedencia se expande uniformemente sobre el origen del espacio de esfuerzos, mientras que la localización de su centro permanece sin cambios durante el flujo plástico, como se muestra en la Figura V.3. La regla provee respuesta elástica pura bajo carga cíclica uniaxial con algún valor de esfuerzos principales [V.5].

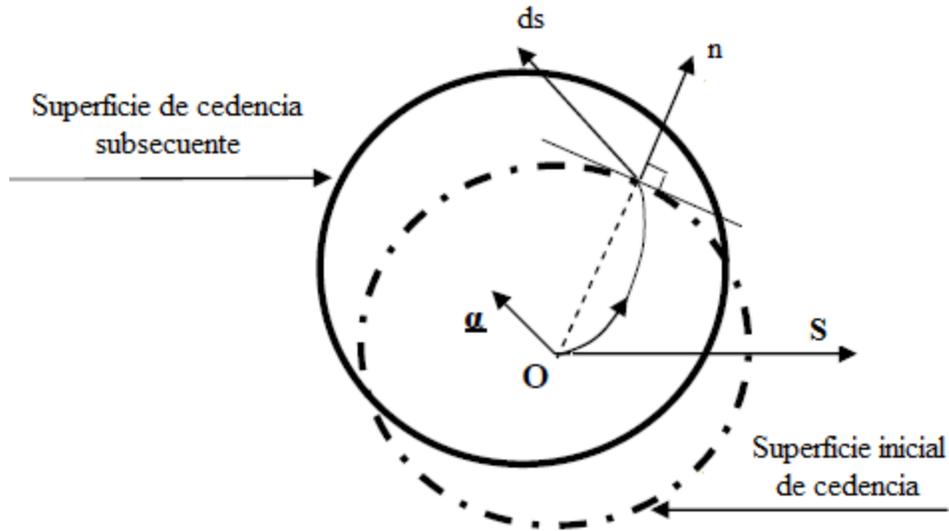


**Figura V.3.-** Superficie inicial y subsecuente en el endurecimiento isotrópico[V.6]

### V.4.- Endurecimiento cinemático

Esta regla dicta la evolución de la superficie de cedencia durante un incremento de carga plástica por la traslación en el espacio de esfuerzos solamente, en la siguiente Figura V.4 se observa lo dicho. Actualmente existen diferentes relaciones que han sido propuestas para la determinación de las reglas de endurecimiento para el análisis plástico de estructuras. En general, las reglas de endurecimiento cinemático pueden ser clasificadas en tres principales tipos; reglas de

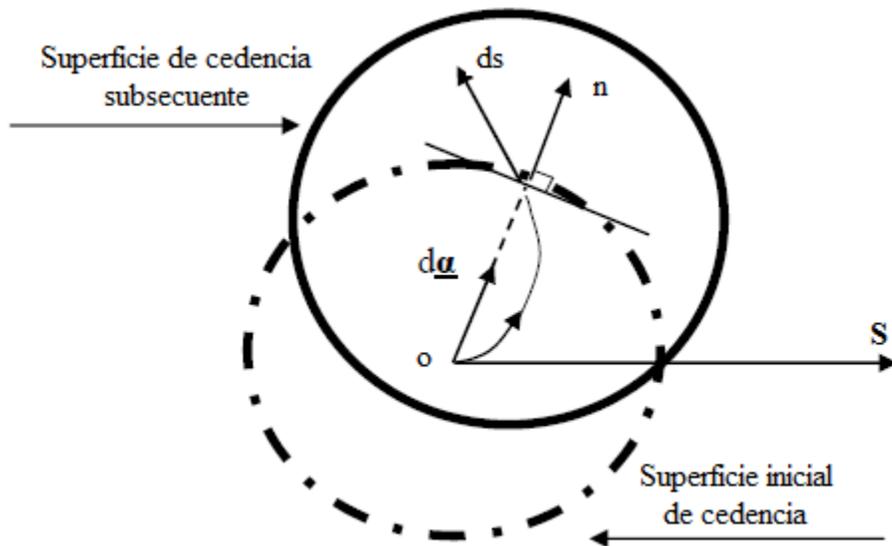
endurecimiento cinemático lineal, reglas de endurecimiento cinemático multilíneal y reglas de endurecimiento cinemático no-lineal [V.5].



**Figura V.4.-** Superficie inicial y subsecuente en el endurecimiento cinemático [V.6]

**V.5.- Endurecimiento lineal cinemático**

En 1956 *Prager* propuso la regla simple de endurecimiento cinemático para simular la respuesta plástica de materiales, en el cual la superficie de cedencia cambia linealmente en la dirección del índice de deformación plástica [V.9].

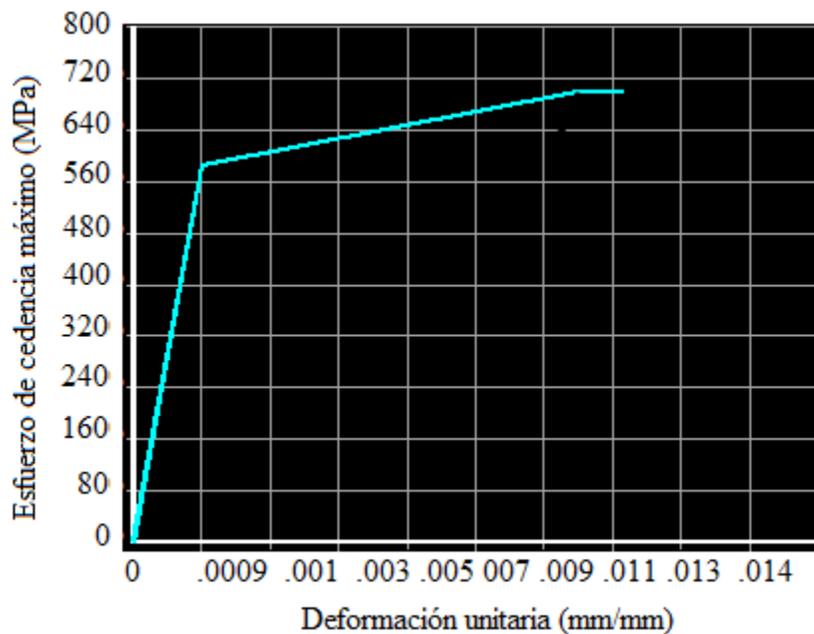


**Figura V.5.-** Regla lineal de endurecimiento cinemático de *Prager* [V.6]

Bajo cargas cíclicas uniaxiales con esfuerzos principales diferentes de cero, esta regla crea ciclos de histéresis cerrados de esfuerzos-deformación. Generalmente, bajo historias de carga multiaxial, la regla de *Prager* estabiliza después de la acumulación de alguna deformación plástica inicial.

### V.6.- Análisis elastoplástico de los especímenes con carga normal de trabajo

A través del análisis elastoplástico por medio de la aplicación del Método de Elementos Finitos a los especímenes de acero que se presentaron en el capítulo anterior. Donde se pretende determinar los estados de esfuerzos generados en el modelo bajo condiciones de trabajo de carga normal sobre el área efectiva del mismo como un primer paso. Posteriormente, el siguiente procedimiento y como segundo paso, es la descarga total del modelo en cuestión del análisis elastoplástico. Para realizar tal análisis se tomó únicamente el proceso de barrenado, ya que de los dos procesos de maquinado (fresado y barrenado) éste último es en donde se generan los mayores esfuerzos de maquinado sobre el sistema de sujeción.



**Figura V.6.-** Gráfica de las propiedades mecánicas bilineales del el acero AISI (8620)

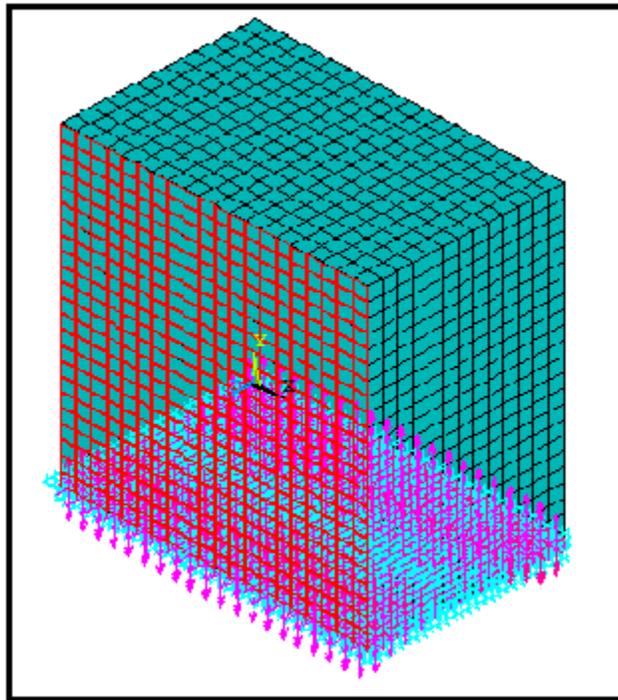
En la siguiente tabla se muestran los valores de los esfuerzos de cedencia correspondientes a las deformaciones unitarias de la Figura V.6.

**Tabla V.1.-** Valores del comportamiento elastoplástico del el acero AISI (8620)

<b>Esfuerzo de cedencia máximo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (mm/mm)</b>
586	0.002
755	0.01

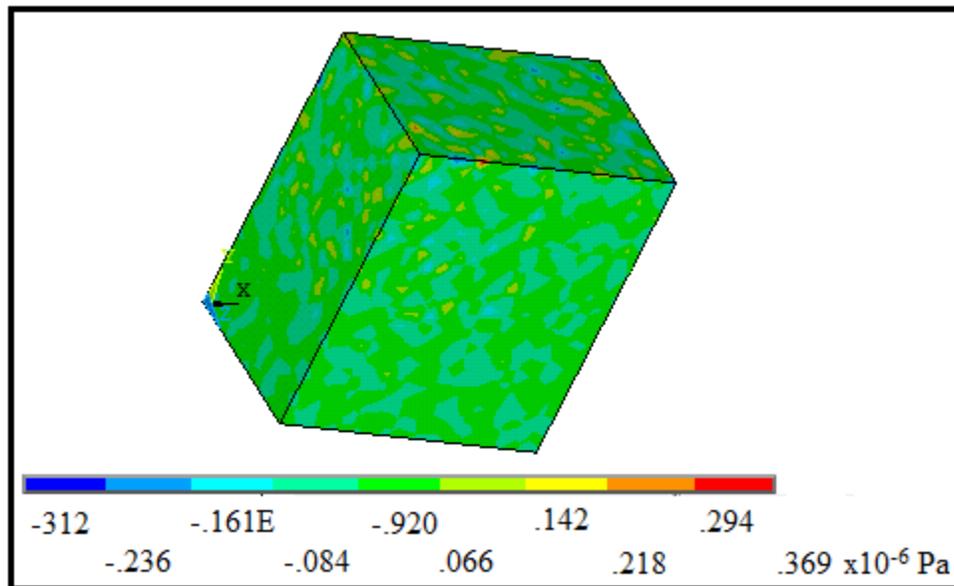
Por lo tanto, en el modelo, se utilizó el mismo mallado del espécimen de acero AISI 8620 y los mismos parámetros para la zona elástica teniendo como comportamiento:

- *Estructural, Lineal, Elástico e Isotrópico*, con un coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) de 0.28 y con módulo de *Young* ( $E$ ) de 200 GPa. Para el no lineal el comportamiento.
- *Estructural, No lineal, Inelástico, Independiente a la velocidad, Plasticidad con endurecimiento cinemático, Plasticidad de Misses, Multilineal (general)* y de acuerdo con las propiedades del material se tiene que posee un esfuerzo de cedencia de 580 MPa para el acero AISI 8620 conformado por estirado en frío.

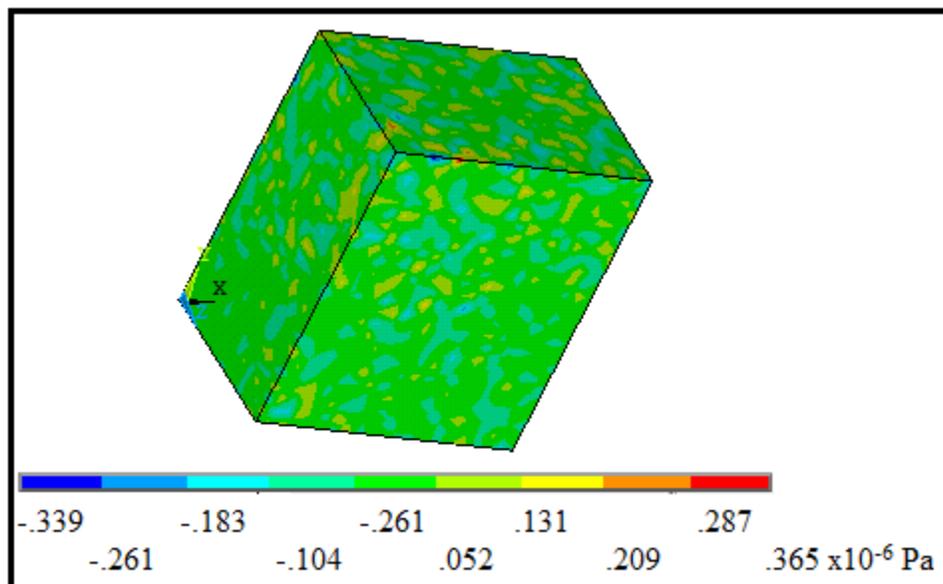
**Figura V.7.-** Aplicación de la carga sobre el espécimen a maquinar

Como primer paso del análisis, se aplicada la carga que es de 1500 N en una área de trabajo de  $0.0017 \text{ m}^2$  obteniéndose un esfuerzo de 0.84 MPa. Las restricciones son las mismas que para el

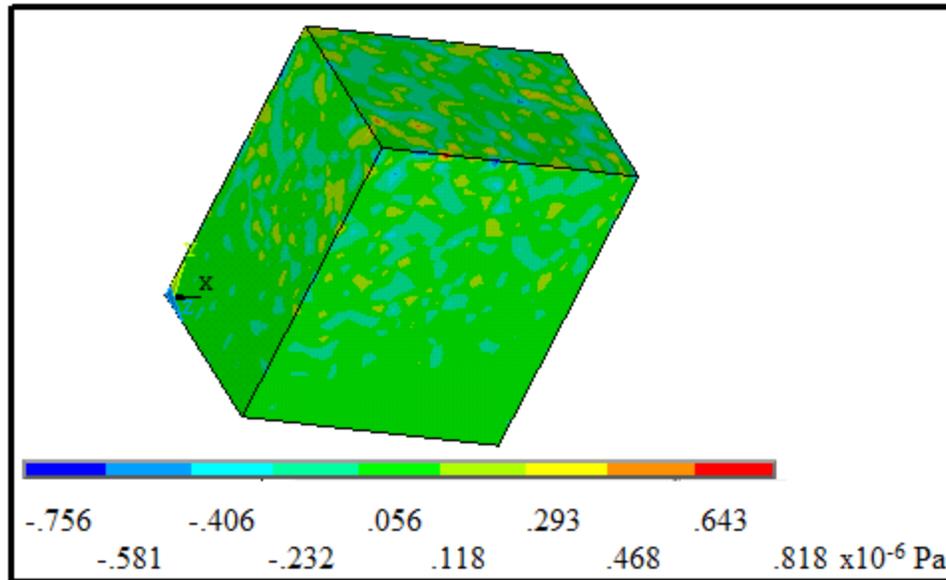
análisis elástico y como segundo paso, se realiza la descarga del espécimen. Es decir, que se retira la presión total aplicada sobre el área efectiva de trabajo. Así como, consecuencia del primer paso de carga se tiene que el material tiene una historia previa de carga y al descargarla se inducen los esfuerzos residuales dentro del elemento estructural. En la Figura V.7 se observa la forma de carga y las restricciones que se consideraron en el espécimen de acero AISI 8620. Los esfuerzos residuales generados por esta carga en cada uno de los ejes en el acero AISI 8620 son los siguientes.



**Figura V.8.-** Componente del esfuerzo residual en X del acero AISI 8620 con carga normal

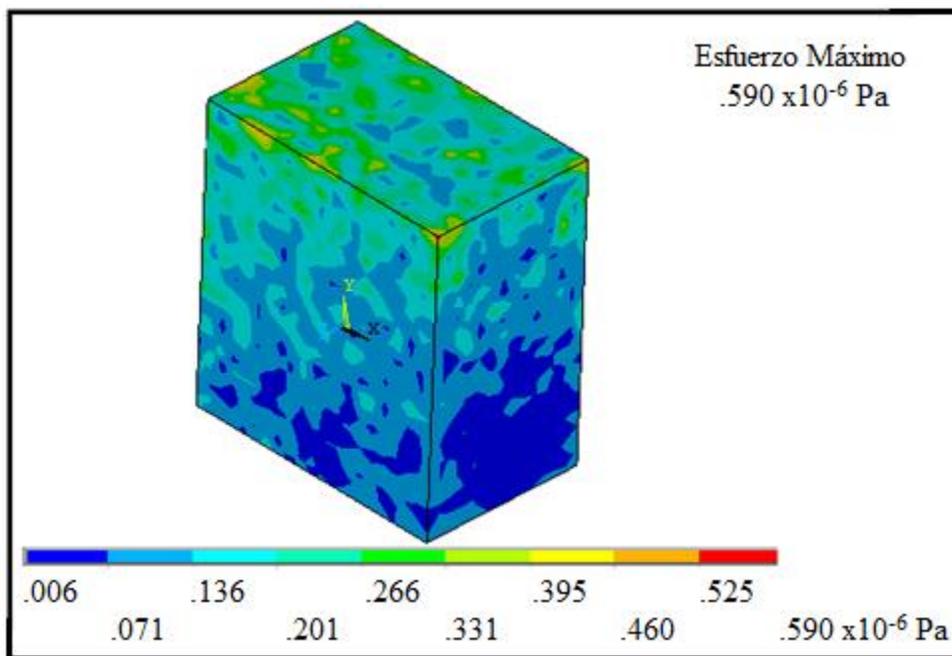


**Figura V.9.-** Componente del esfuerzo residual en Y del acero AISI 8620 con carga normal



**Figura V.10.-** Componente del esfuerzo residual en Z del acero AISI 8620 con carga normal

Para este caso de estudio con la carga establecida por la máquina-herramienta, que es con la que se maquina el espécimen de acero en cuestión y que está conformado en estirado en frío, como resultado, los esfuerzos de *Von Mises* residuales son bastante pequeños.

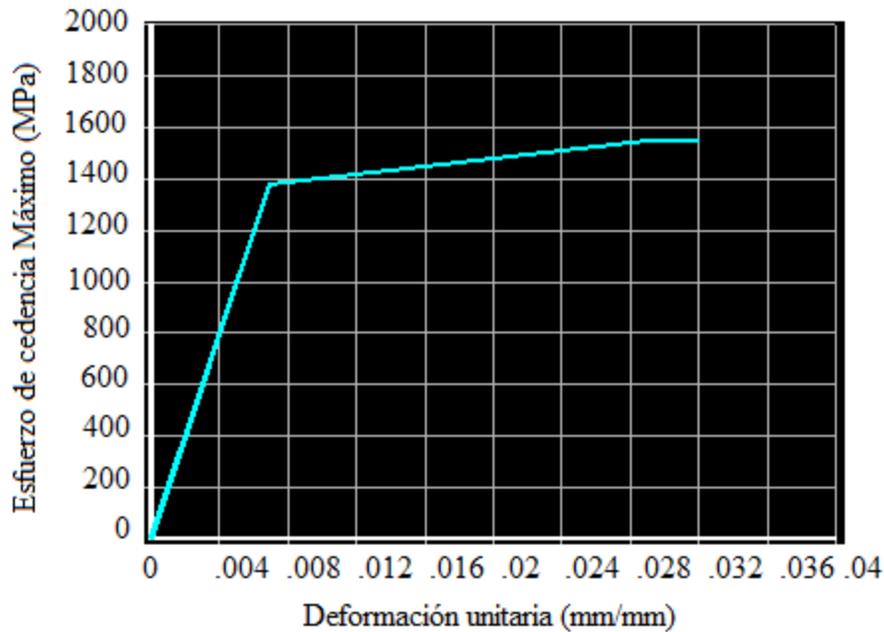


**Figura V.11.-** Criterio de *Von Mises* residual del acero AISI 8620 con carga normal

Por lo que los esfuerzos de *Von Misses* residuales generados son despreciables y el material soportará la carga de maquinado sin que haya una falla repentina del mismo.

Para el análisis elastoplástico del sistema de sujeción tenemos como comportamiento:

- *Estructural: Lineal, Elástico e Isotrópico*, con un coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) de 0.28 y con módulo de *Young* ( $E$ ) de 200 GPa y para el no lineal se tiene un comportamiento.
- *Estructural, No lineal, Inelástico, Independiente a la velocidad, Plasticidad con endurecimiento cinemático, Plasticidad de Misses, Multilineal (general)* y de acuerdo con las propiedades del material, posee un esfuerzo de cedencia de 1380 MPa para el acero H-13, que es con que está hecho el sistema de sujeción.

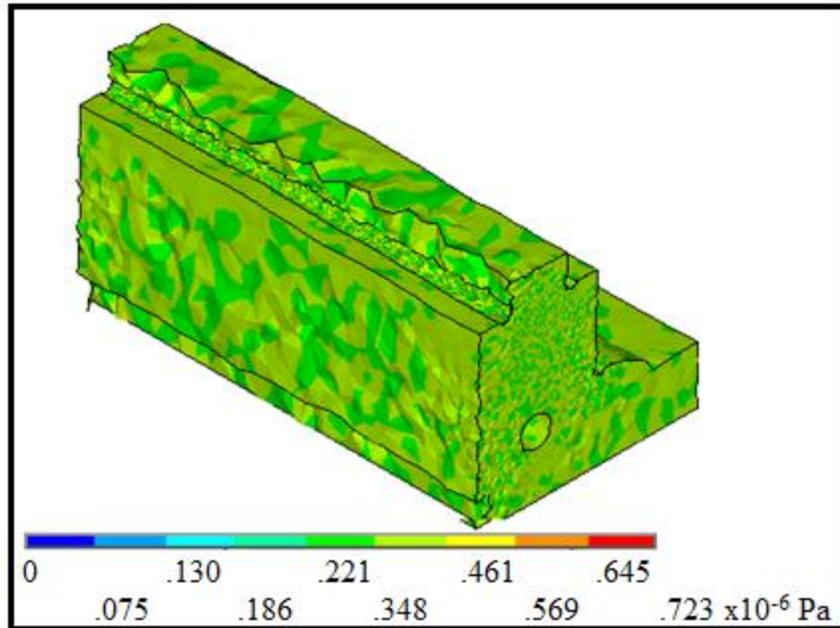


**Figura V.12.-** Gráfica de las propiedades mecánicas bilineales del sistema de sujeción (acero H-13)

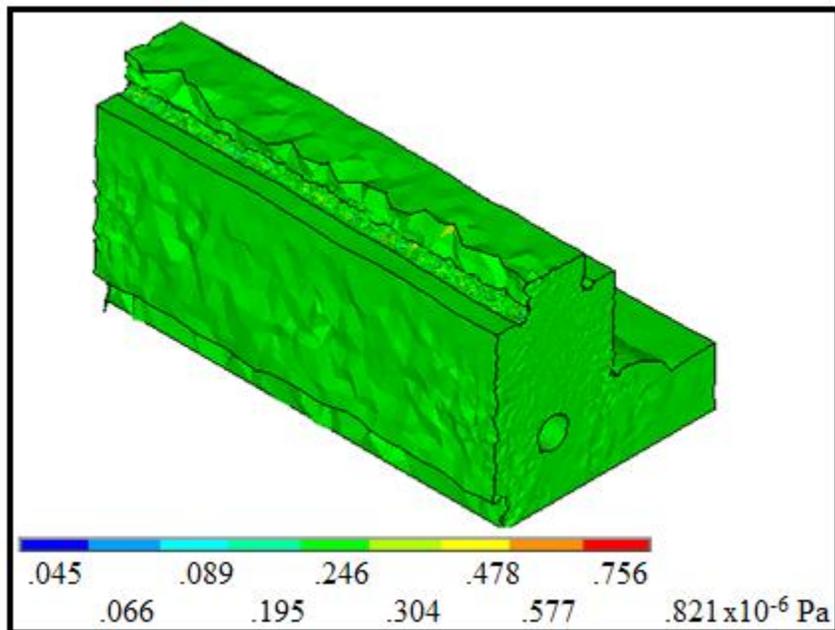
**Tabla V.2.-** Valores del comportamiento elastoplástico del sistema de sujeción (acero H-13)

<b>Esfuerzo de cedencia máximo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (mm/mm)</b>
1380	0.006
1555	0.029

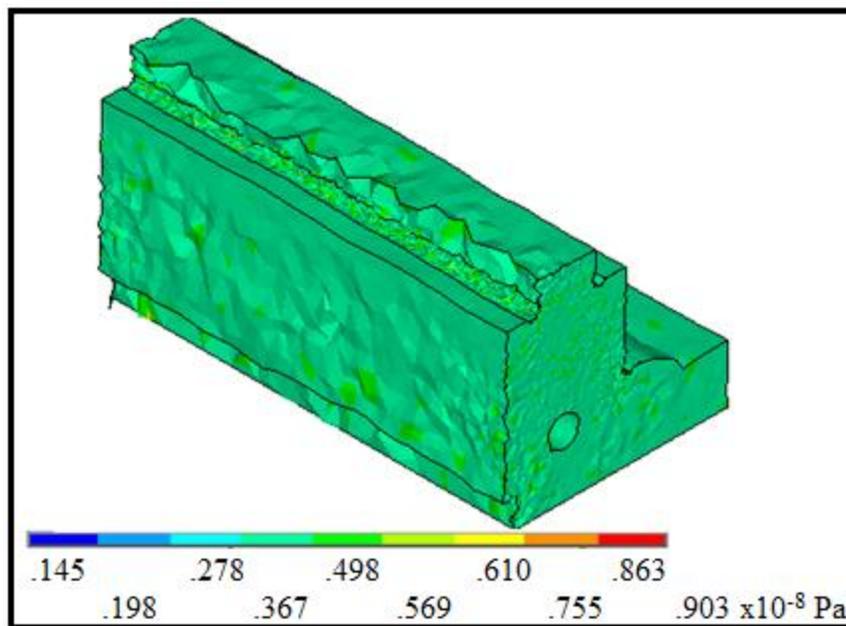
En la aplicación de la carga se tomó el valor equivalente de esfuerzo máximo obtenido del análisis plástico y que es de 29.92 MPa, éste valor lo aplicamos en la zona de agarre del sistema de sujeción, que es el valor resultante máximo obtenido por la transmisión de esfuerzo generado en la parte posterior del espécimen de acero AISI (8620). Las componentes de esfuerzos residuales generados en los tres ejes de coordenadas X, Y, y Z son como se observa a continuación.



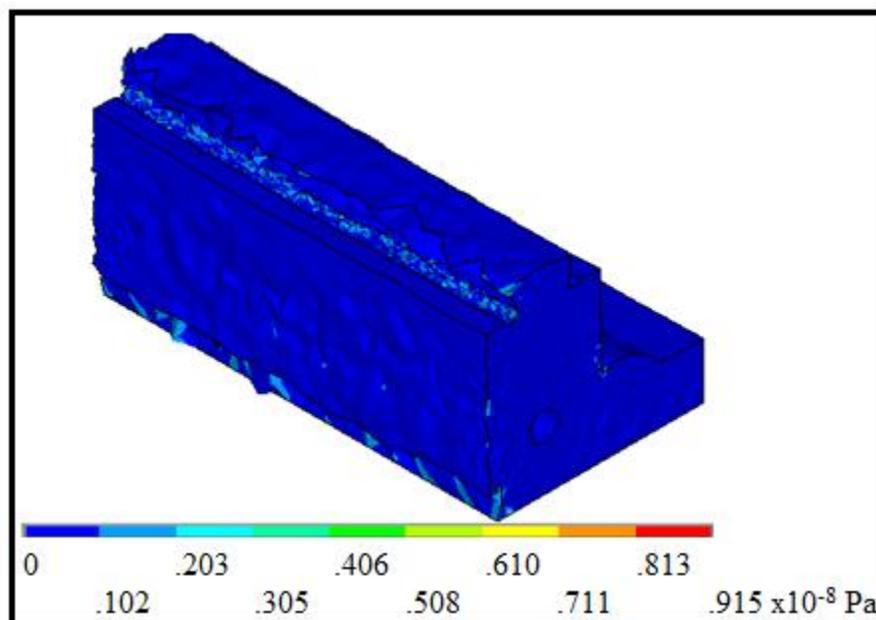
**Figura V.13.-** Componente del esfuerzo residual en X del acero H-13 con carga normal



**Figura V.14.-** Componente del esfuerzo residual en Y del acero H-13 con carga normal



**Figura V.15.-** Componente del esfuerzo residual en Z del acero H-13 con carga normal



**Figura V.16.-** Criterio de *Von Mises* residual para el acero H-13 con carga normal

Los resultados muestran que de acuerdo con la carga aplicada y luego la descarga de la misma en una operación normal de trabajo, se generan esfuerzos residuales muy pequeños, por lo que el

sistema de sujeción está dentro del diseño mecánico óptimo, lo cual soportará estas cargas sin ningún problema de falla repentina.

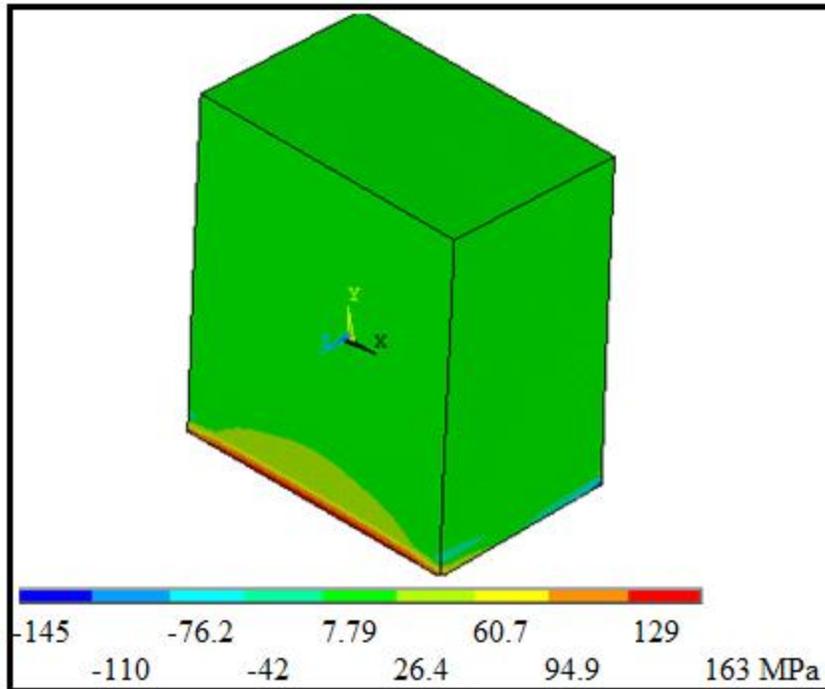
### **V.7.- Análisis elastoplástico de los especímenes con sobrecarga de trabajo**

Para el presente caso de estudio, se incrementará la carga de trabajo en la zona de maquinado para el barrenado, el análisis tendrá lugar bajo condiciones de carga extrema, tal y como se cometería por un error humano o por cargas externas que causan errores de fabricación. *Mekin* [V.10] hace referencia de estas cargas estáticas/dinámicas como las cargas de gravedad que son una función del peso de la propia pieza a maquinar, la carga de corte que surge del mismo proceso y cargas debido a la aceleración de los ejes a partir del desplazamiento de las masas de la maquina. Por lo tanto se considera para efecto de análisis en este caso únicamente, que la carga aumentará 30 veces más su carga normal debido a que se desea saber hasta qué valor de carga se requiere para que se induzcan esfuerzos residuales en el sistema de sujeción y llegue a fallar por efecto de los mismos.

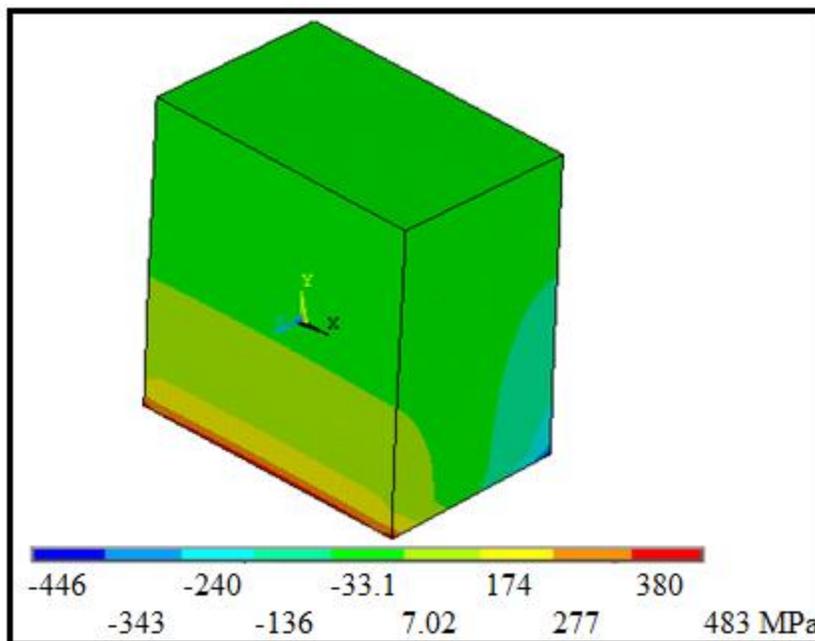
El valor requerido para tal efecto es de 25 MPa aplicados al espécimen a maquinar, donde éste espécimen soporta la carga pero se generan esfuerzos de transmisión muy grandes en el sistema de sujeción que rebasan el esfuerzo de cedencia del material, provocando la fractura del mismo. Así, para el análisis del espécimen de acero AISI (8620) tendrá el mismo comportamiento estructural y mismas propiedades mecánicas. La presión de 25 MPa sobre el área de trabajo, para la zona elástica, el esfuerzo generado es menor que el esfuerzo de cedencia, por lo que el material soporta la carga de trabajo sin ninguna deformación permanente y sin que ocurra la falla repentina del mismo.

El máximo esfuerzo de transmisión al sistema de sujeción es de 386.4 MPa que es generado en la parte posterior del acero a maquinar, que, posteriormente se aplicará a la zona de agarre del sistema.

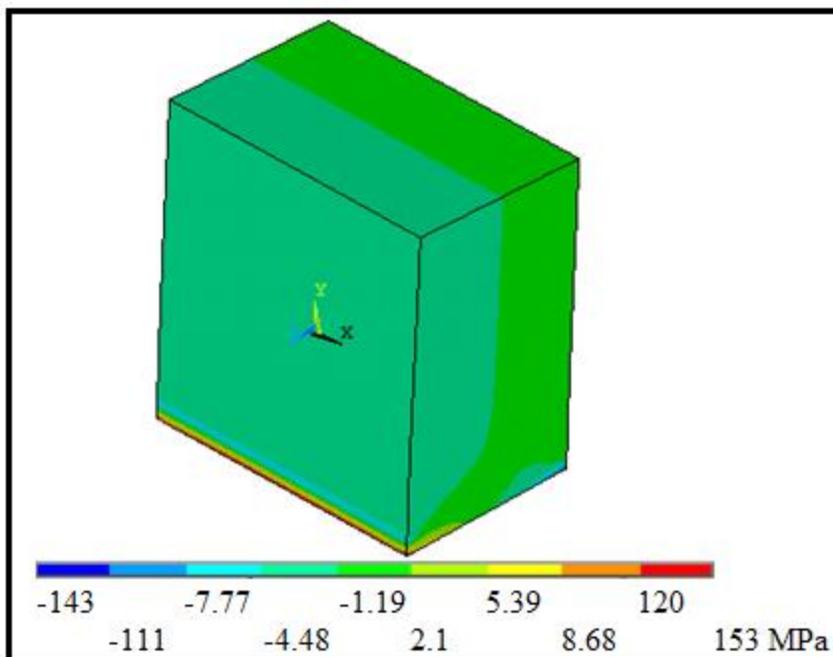
En las siguientes Figuras se observan los esfuerzos que se generan en cada uno de los ejes de coordenadas por lo que se tiene una generación de esfuerzos menor a esfuerzo de cedencia del material en cuestión.



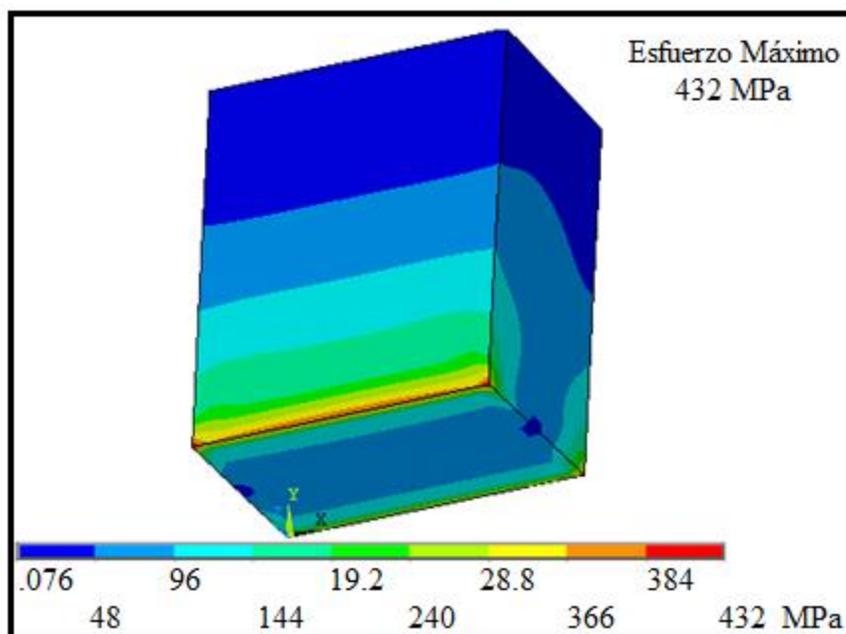
**Figura V.17.-** Componente del esfuerzo en la coordenada X del acero AISI 8620 con sobrecarga



**Figura V.18.-** Componente del esfuerzo en la coordenada Y del acero AISI 8620 con sobrecarga

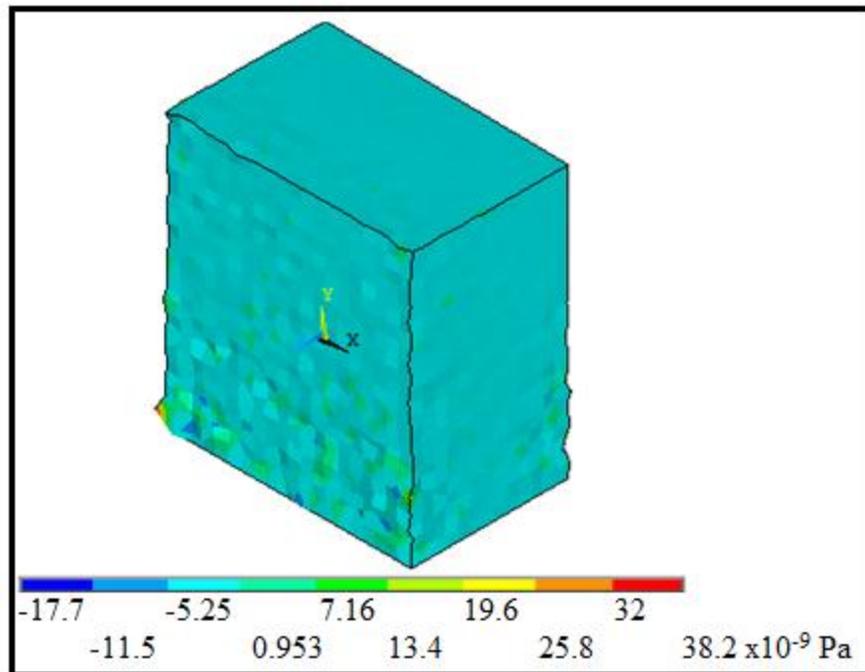


**Figura V.19.-** Componente del esfuerzo en la coordenada Z del acero AISI 8620 con sobrecarga

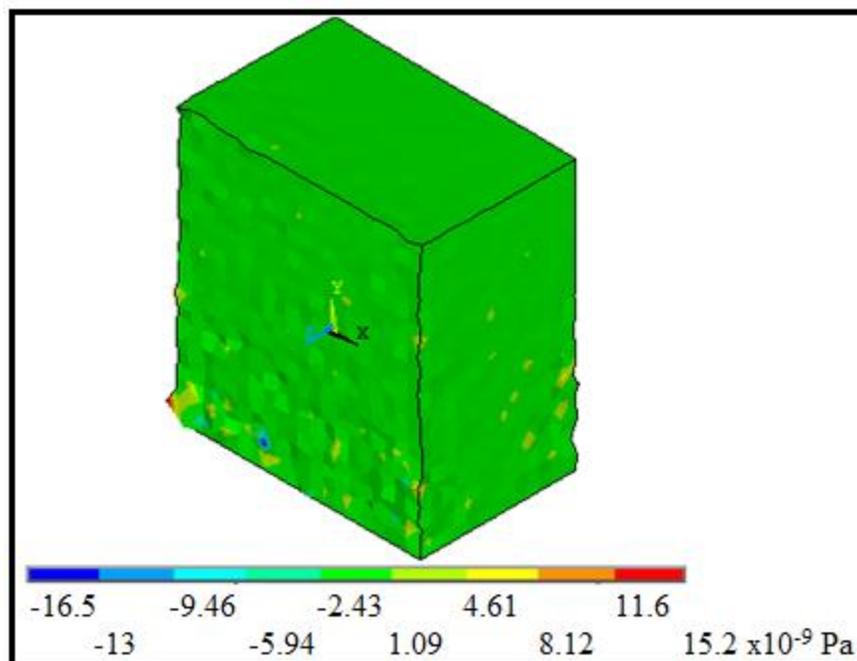


**Figura V.20.-** Criterio de *Von Mises* del acero AISI 8620 con sobrecarga

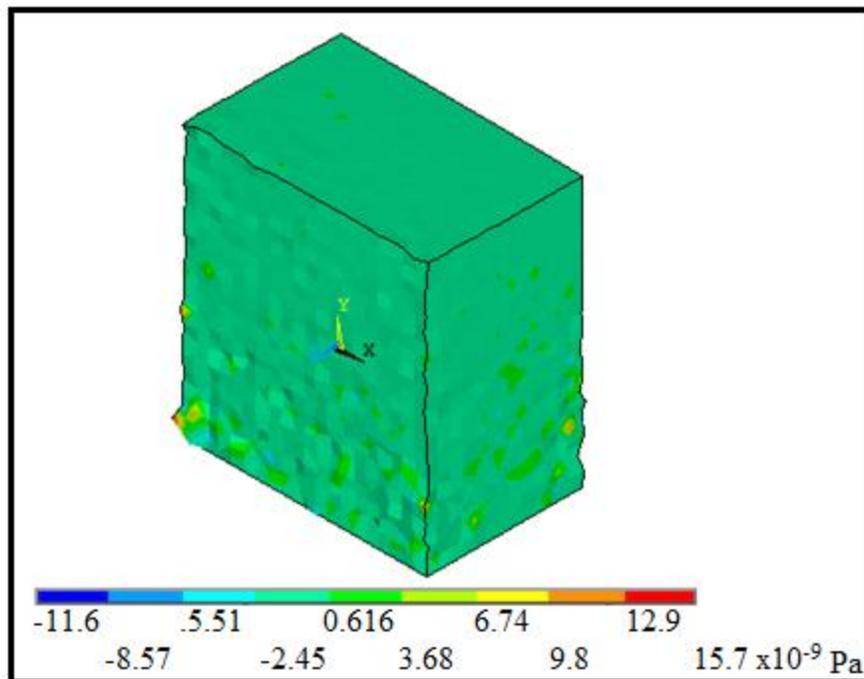
Al cargar y después descargar, se genera los esfuerzos residuales en cada uno de los ejes de coordenadas X, Y y Z. a continuación se muestran las componentes de dichos ejes.



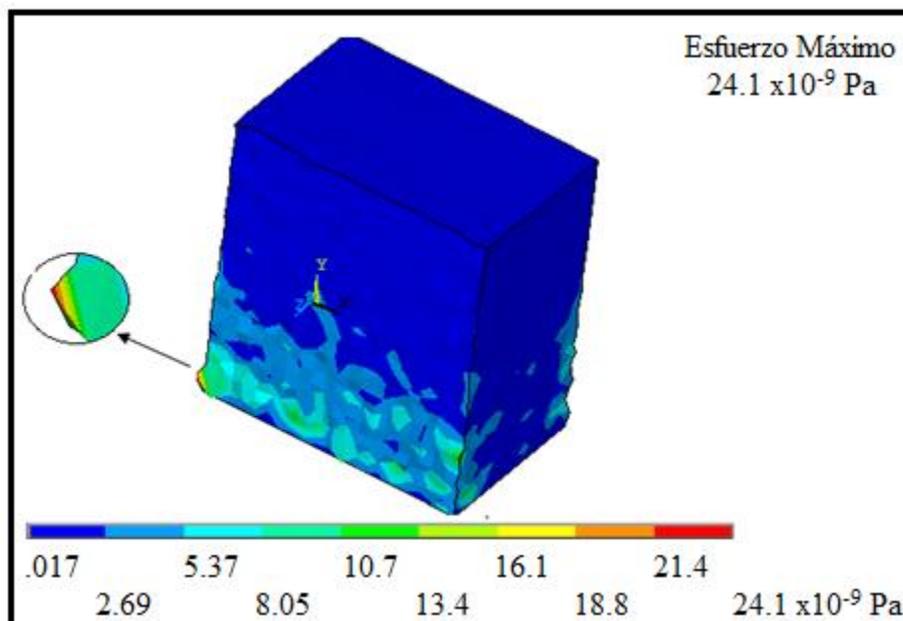
**Figura 21.-** Componente del esfuerzo residual en X del acero AISI 8620 con sobrecarga



**Figura V.22.-** Componente del esfuerzo residual en Y del acero AISI 8620 con sobrecarga



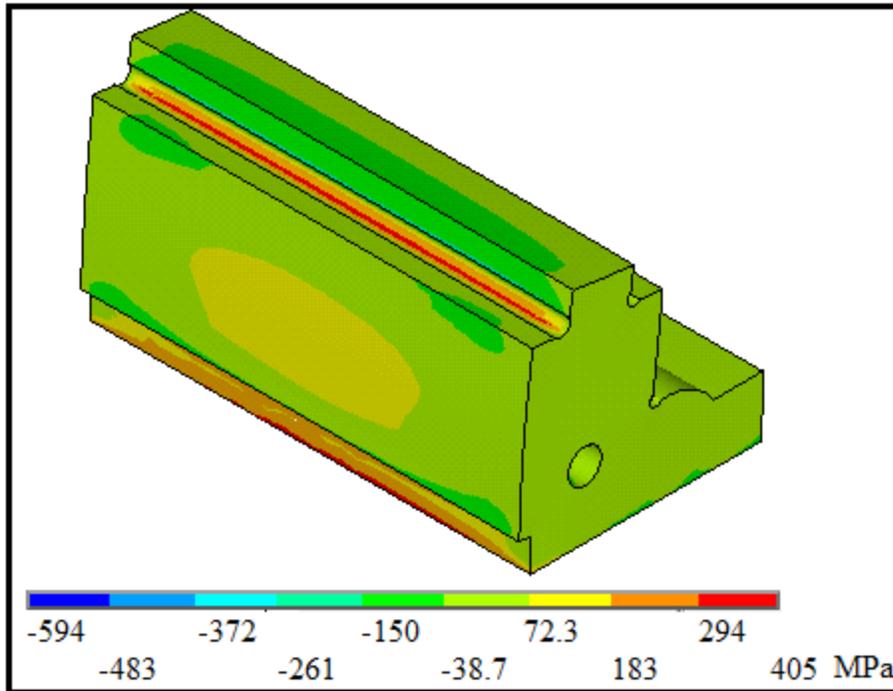
**Figura V.23.-** Componente del esfuerzo residual en Z del acero AISI 8620 con sobrecarga



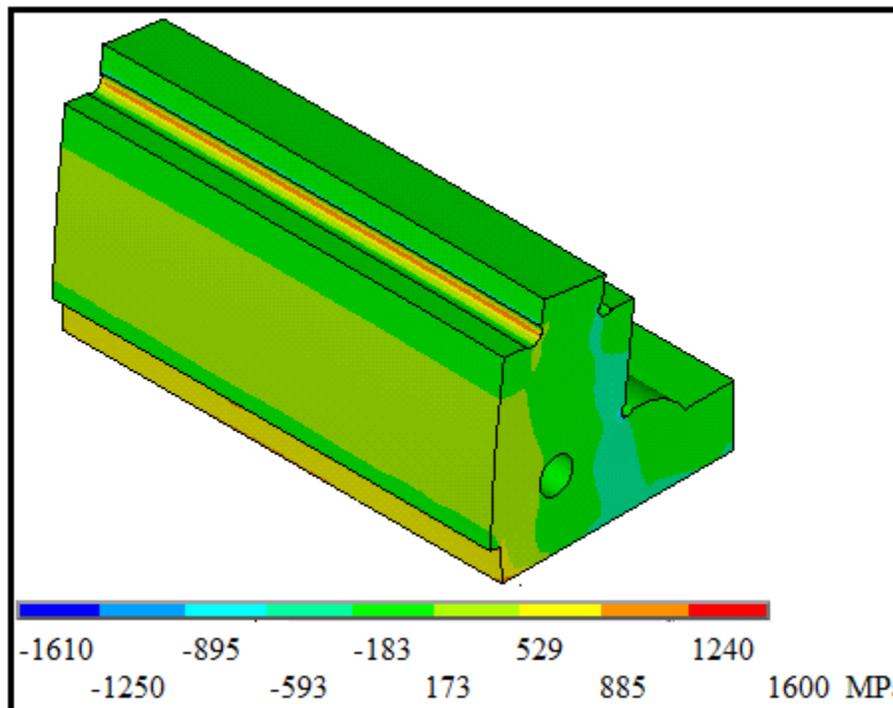
**Figura V.24.-** Criterio de *Von Mises* residual del acero AISI 8620 con sobrecarga

Al cargar y después descargar, la carga se genera los esfuerzos residuales en el espécimen de acero a maquinar, los cuales no son grandes y también se puede considerar como esfuerzos despreciables.

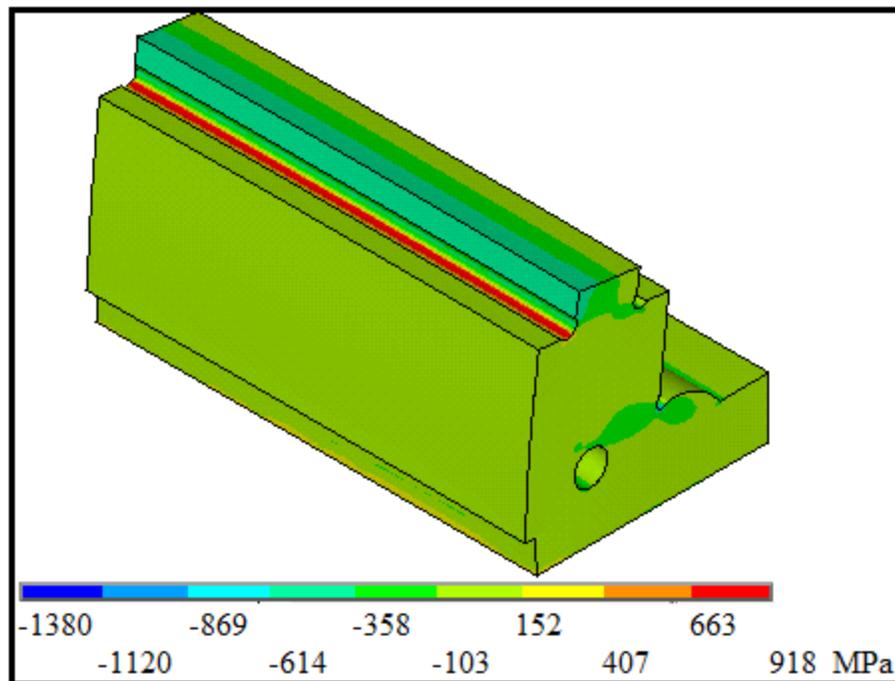
Al aplicar el esfuerzo máximo al sistema, que tiene un valor como se mencionó anteriormente de 386.4 MPa sobre la mordaza de sujeción, se generan grandes esfuerzos.



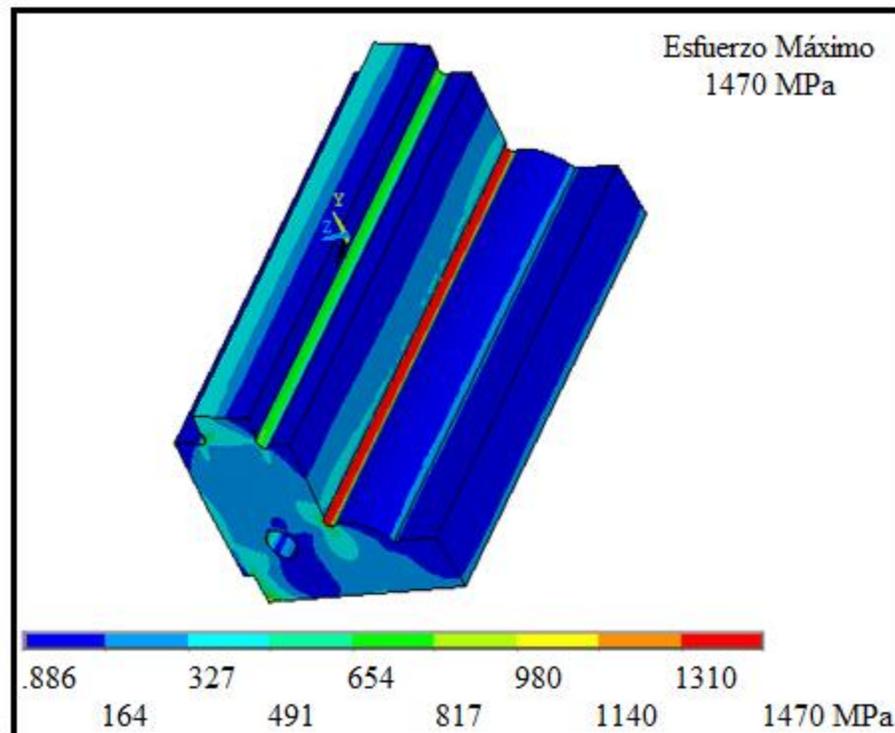
**Figura V.25.-** Componente del esfuerzo en X del acero H-13 con sobrecarga



**Figura V.26.-** Componente del esfuerzo en Y del acero H-13 con sobrecarga

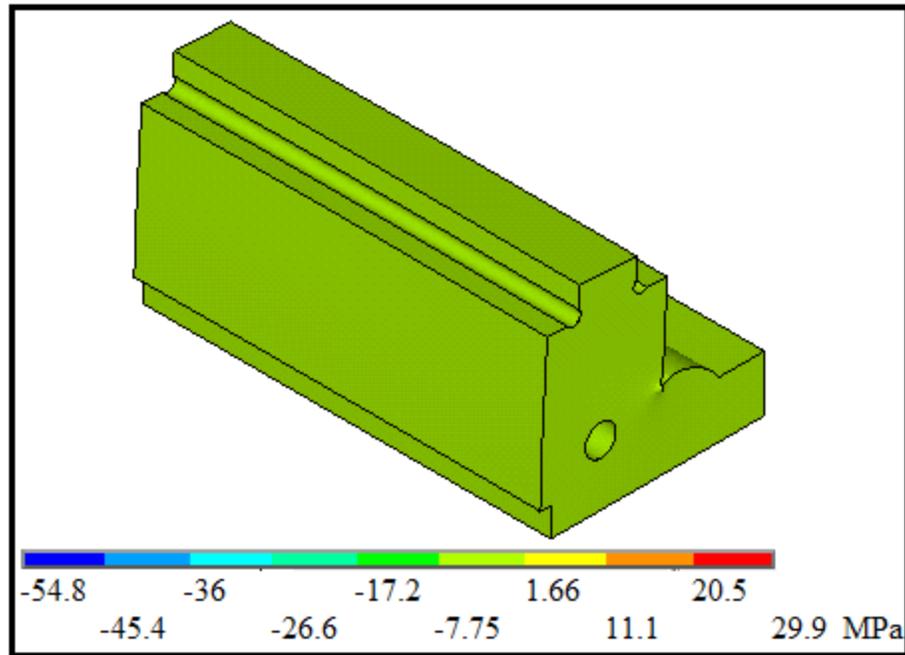


**Figura V.27.-** Componente del esfuerzo en Z del acero H-13 con sobrecarga

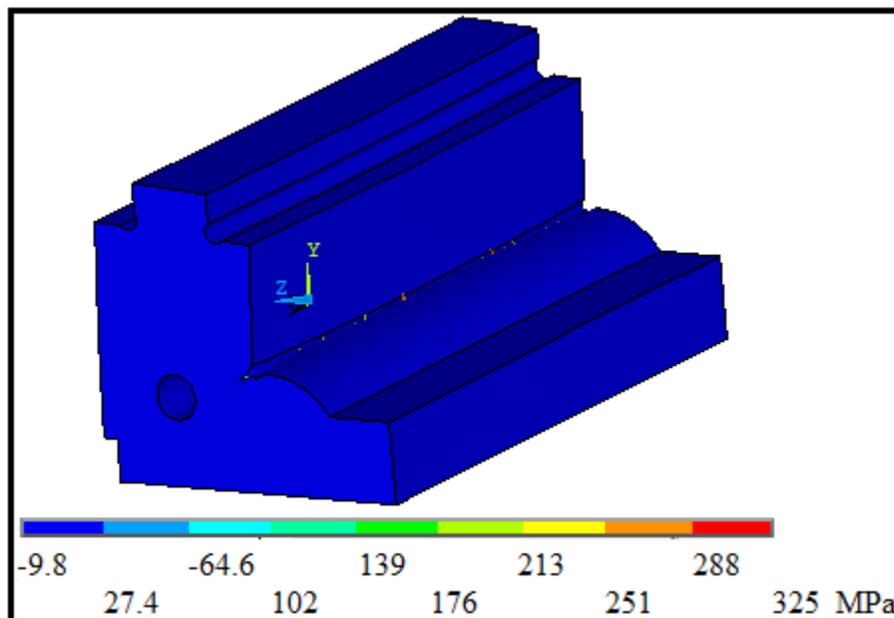


**Figura V.28.-** Criterio de *Von Misses* del acero H-13 con sobrecarga

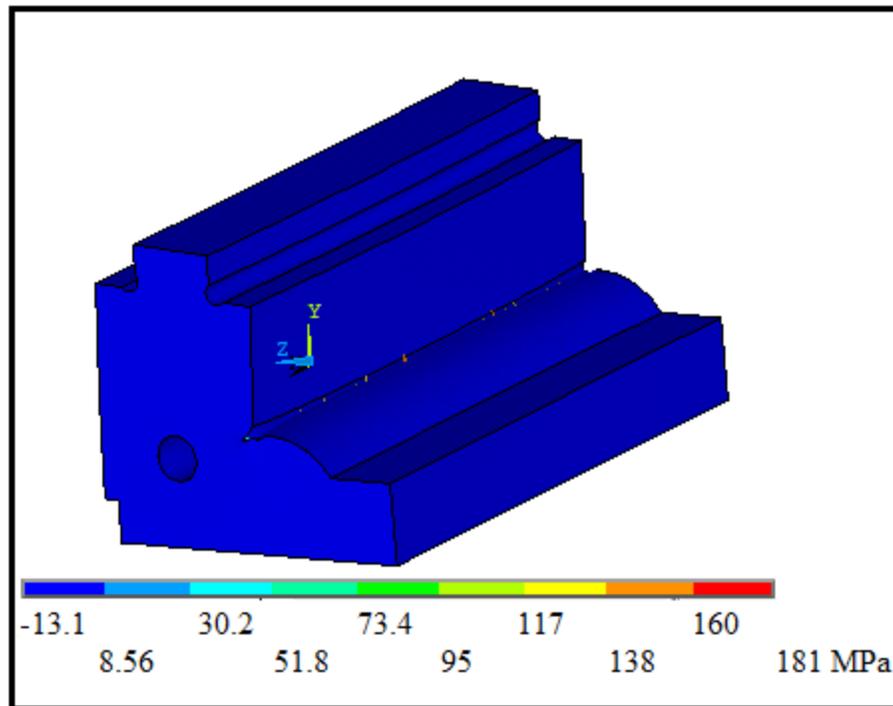
Los esfuerzos residuales generados en cada uno de los componentes de los ejes de coordenadas son como se muestra en las figuras V.29, V.30 y V.31.



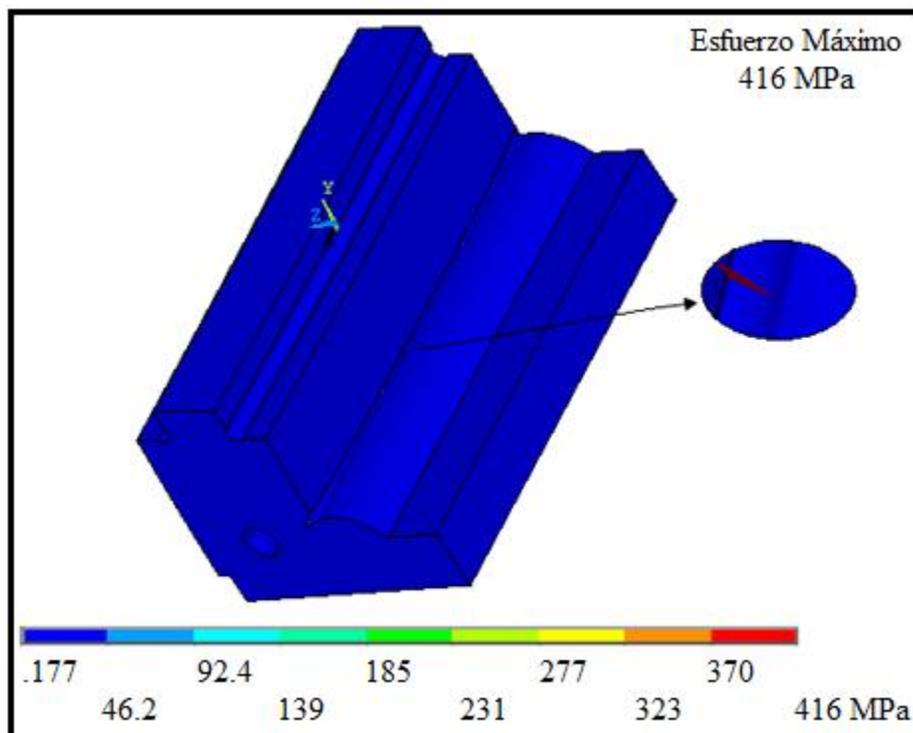
**Figura V.29.-** Esfuerzo residual en el eje de coordenada X del acero H-13 con sobre carga



**Figura V.30.-** Esfuerzo residual en el eje de coordenada Y del acero H-13 con sobrecarga



**Figura V.31.-** Esfuerzo residual en el eje de coordenada Z del acero H-13 con sobrecarga



**Figura V.32.-** Criterio de *Von Mises* residual del acero H-13 con sobrecarga

El análisis indica que con la aplicación de ésta carga máxima, el material sufrirá fractura o se iniciara una grieta, ya que rebasa el esfuerzo de cedencia que es de 1380 MPa para el acero H-13. Aun cuando el material soportara la carga propuesta, cargando el material y posteriormente descargándolo se inducen los esfuerzos residuales.

Para ésta carga de trabajo habría una generación de esfuerzos residuales que propiciarían la falla súbita del sistema de sujeción de acero H-13.

### V.8.- Sumario

En el presente capítulo se llevo a cabo el análisis elastoplástico de ambos especímenes (aceros AISI 8620 y H-13) involucrados en la operación de maquinado de metales. Se analizaron ambos especímenes bajo condiciones elastoplásticas descritas con cargas externas propuestas a fin de ubicarlos en las zonas plásticas, pero sin obtener deformaciones permanentes, en la descarga se localizan los esfuerzos residuales generados tras la historia previa de carga. Dos análisis elastoplásticos se realizaron, el primero se realizó con carga normal de trabajo en el acero a maquinar, obteniendo como resultado, un optimo diseño mecánico del sistema de sujeción, en el segundo, la carga propuesta es crítica por lo que altera sus capacidades iniciales, éste análisis determina que bajo condiciones solamente extremas, tal como lo sería un error humano con la aplicación de una carga grande, lo que habría una generación de esfuerzos que rebasan el propio esfuerzo de cedencia del acero H-13 y que propiciarían la fractura del sistema de sujeción.

### V.9.- Referencias

- 1.- Takeda, T., Nasu, Y., *Determination of the Bauschinger effect and planar anisotropy from bending test*, Bull. Yamagata Univ. Eng., Vol. 20, No. 2, pp 169, 1989.
- 2.- Morris, A., *Inestability and Plastic Collapse of Steel Structures*, Ed. Granada, pp 43, 1983.
- 3.- Friedel, J., *Dislocations Interactions and Internal Strains, Internal Stress and Fatigue in Metals*, Elsevier, Amsterdam, pp 202, 1959.
- 4.- Euler, L., *Additamentum I di Curvis Elasticis, Methodus Inveniendi Lineas Curvas Maximi Manimivi Proprietate Gaudentes, Opera Omnia*, Vo. 24, pp 153-154, 1960.
- 5.- Abdel-Karim, M., *Shakedown of complex structures according to various hardening rules*, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, No. 6, pp 428, 2005.

- 
- 
- 6.- Urriolagoitia-Sosa, G., *Analysis of prior strain history effect on mechanical properties and residual stress in beams*, Thesis Ph D, Oxford Brooks University, pp 119-135, 2005.
  - 7.- Chakrabarty, J., *Theory of Plasticity*, Ed. McGraw-Hill, ISBN 0-07-010392-5, pp 1-3, 1962.
  - 8.- Willems, N., Easley, J. y Rolfe, S., *Strength of Materials*, McGraw-Hill, Inc. pp 63, 1981.
  - 9.- Prager, W., A new method of analyzing stresses and strains in work hardening plastic solids, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp 493-495, 1956.
  - 10.- Mekin, S., Ogedengbe, T., *International Journal Precision Technology*, Vol.1, pp 254, 2010.

# DISCUCIONES Y CONCLUSIONES

## Discusiones

En el capítulo I se abordó el estado del arte sobre la introducción de las maquinas-herramientas para facilitar el trabajo del hombre, que en un principio el principal motivo para el desarrollo de estas maquinas fue la ayuda para facilitar las tareas de los trabajadores mediante utensilios que se tenían de manera natural, tal como la madera y la piedra. Sin embargo el hombre, durante su existencia sobre la tierra siempre ha tenido la inquietud de tener comodidades en sus actividades cotidianas. Pero no fue sino hasta la revolución industrial que la producción en masa de maquinaria se hizo realidad, motivados por un lado, a hacer fortuna y por otro lado la búsqueda incansable de la invención para hacer de sus vidas más cómodas y fáciles. Esto llevo a tener tal efecto, que llevo un momento que ya no podía parar esta búsqueda inventiva y (de hecho aun continua hasta nuestros días) fue así como poco a poco con conocimiento empírico analizando paso a paso cada efecto de la naturaleza se llevo a perfeccionar el conocimiento científico hasta nuestros días que en este momento se tiene un gran evolución en casi todos los campos del saber.

El capítulo II aborda la teoría del mecanizado de metales, que sin duda, la búsqueda del hombre hasta nuestros días es tener una vida más cómoda en la realización de sus tareas que lleva a cabo cotidianamente. La invención de las maquinas-herramientas para mecanizar materiales y hacer productos terminados en un menor tiempo y con el costo mínimo de inversión, es lo que ha llevado a que el hombre busque maneras o formas de hacerlo. La creación de diferentes maquinas-herramientas tales como el torno, la fresadora, el rectificado, entre otros tipos de mecanizado de manufactura convencional, es decir máquinas que operan de manera manual ha dado lugar a la invención de nuevas máquinas de mecanizado, como son las llamadas máquinas automáticas de control, estas máquinas se encuentran en un gran auge de desarrollo por motivos de economía y rapidez. Otra área de desarrollo es el estudio de nuevos materiales y sus propiedades que permitan hacer más fácil su mecanizado, con los desarrollos de las dos áreas de manufactura se pretende llegar a producir en gran volumen y en un tiempo relativamente corto con sistemas de control numérico. También tienen lugar los dispositivos que intervienen el proceso de maquinado, como son los dispositivos de sujeción entre otros. Estos dispositivos son de operación manual y de operación automática, sin embargo aun están en proceso de estudio para el rediseño de sujeción de gran eficiencia. La tarea que tienen los diseñadores de tales dispositivos no es facil, sin embargo, las nuevas técnicas de análisis numérico en nuestros días permite hacer un análisis aproximado de los

componentes mecánicos. Se espera que muy pronto la tecnología de maquinado, junto con materiales y herramientas auxiliares se fusionen para hacer procesos de manufactura veloces en poco tiempo.

El capítulo III es el análisis del desarrollo experimental de la fabricación de piezas metálicas en dónde se tiene una gran diversidad de problemas geométricos y dimensionales que repercuten en costos elevados de fabricación en las mismas piezas. La sujeción de piezas a mecanizar requiere de una gran cantidad de procesos de manufactura para tal proceso de maquinado. Sin embargo, estos procesos deben minimizarse, así como los errores de los operadores y herramientas ya que muchas veces se emplean materiales complejos que originan el cuidado en el dispendio de recursos por procesos largos que emplean varias estaciones de trabajo para la obtención de piezas.

El análisis fue llevado para dos pruebas específicamente, tales pruebas son el fresado y el barrenado de la pieza para observar los desplazamientos y esfuerzos que soporta el sistema de sujeción y poder determinar las cargas de maquinado de la misma. Así como, el desgaste y rendimiento de la totalidad de componentes que integran el sistema con dos propósitos, el primero; identificar los tiempos de mecanizado que se mejoran mediante el empleo de esta tecnología a fin de reducir el tiempo de fabricación de la pieza en comparación con metodologías tradicionales de manufactura. El segundo; para incrementar la calidad y precisión de las piezas manufacturadas, ya que reduce los errores y variación gracias a la eliminación de múltiples sujeciones de la pieza fabricada mediante procesos convencionales de sujeción mecánica y manufactura por estaciones de trabajo secuenciales. Sin embargo, a pesar de contar con una maquina de CNC muy superior con respecto a una convencional se tuvieron muchos problemas en el momento de ajustar el sistema de sujeción, ya que por dimensiones no exactas del sistema y de la máquina de CNC se tuviera que hacer ajustes de calzado para que quedara en su posición exacta el sistema de sujeción que en realidad fue en lo que se perdió el tiempo, es decir, hubo horas muertas de trabajo debido al ajusten de este dispositivo. En el futuro se prenda hacer un ciclo de montaje rápido para que no se pierda mucho tiempo.

El cálculo efectuado para la determinación del costo unitario de producción de la pieza a maquinar, en el que se consideró el tiempo ciclo para cada operación del proceso, así como el costo por minuto de operador y de maquinaria, lo que genera un costo de manufactura unitario, además del costo de la

materia prima a utilizarse en cada operación, misma que sumada al costo de manufactura unitario de las operaciones producen un costo total unitario por operación que genera el costo total de manufactura, estimándose en \$172.03 M.N. por pieza a producirse, considerando amortizar las herramientas fijas y dispositivos en el lote inicial de 10,000 piezas.

En el capítulo IV se hace el análisis numérico mediante el Método de Elementos Finitos *MEF*, en este trabajo se analizó tanto el material a maquinar que es un acero AISI 8620, como el sistema de sujeción que está hecho de un acero H-13. Se realizaron dos pruebas para el análisis, que son fundamentales para maquinar la pieza de acero AISI 8620. Las pruebas son el fresado y el barrenado de material. Se determinaron los desplazamientos y esfuerzos generados para ambos materiales con la carga propuesta de trabajo normal, encontrándose en la zona elástica. Este análisis elástico es de suma importancia en los especímenes a trabajar debido a que si la carga de trabajo produce desplazamientos y deformaciones permanentes, así como también esfuerzos que rebasan el esfuerzo de cedencia del o de los materiales, entonces estaríamos en una zona elastoplástica con deformaciones permanentes en los especímenes alterando su diseño del elemento y sus capacidades iniciales.

Para el capítulo V se realizó nuevamente el análisis con el Método de Elementos Finitos *FEM* de tipo elastoplástico para determinar si hay deformaciones permanentes en la zona plástica. En esta parte de estudio se realizó de igual manera el análisis de los especímenes a trabajar pero con una carga propuesta mucho mayor de la normal, debido a que se quiere conocer la carga que haría que falle el sistema de sujeción generando esfuerzos residuales en el sistema, así la carga se incrementa 30 veces más que la normal de trabajo y que solamente en caso de error humano se aplicaría. Así, como consecuencia de la carga se tiene que el material tiene una historia previa de carga y al descargarla se inducen los esfuerzos residuales dentro del elemento estructural.

También se analizan las componentes del esfuerzo que se generan en cada eje de coordenadas y aplicando el criterio de cedencia de Von Missses se analiza que el material a maquinar soporta las cargas de trabajo, pero conocidos los esfuerzos de transmisión sobre el sistema de sujeción se determina que tal sistema de fallará debido a que estos esfuerzos rebasan el esfuerzo de cedencia del material.

## Conclusiones

En este trabajo de tesis se concluye que el uso extensivo de la experimentación, es fase importante en la investigación en ingeniería, las ciencias y la industria, por lo que realizarla bajo una metodología y procedimientos bien definidos permite obtener datos objetivos sin caer en un nivel de prueba y error.

El diseño de la optimización de procesos de manufactura mediante el empleo de sistemas modulares de sujeción (de bajo perfil) "*Profile gripping*" y "*Quick point reference*" para mecanizados en 5 caras se realizó de manera metódica y sistemática con la finalidad de que el resultado en la programación y montaje de piezas fuera sencillo y directo, enfocándose en los elementos críticos. Estas pruebas permitieron conocer el comportamiento de los sistemas propuestos, bajo condiciones críticas de funcionamiento, habiéndose realizado dichas pruebas en la planta de fabricación de una industria metalmecánica. La tendencia a futuro de la técnica de mecanizado de piezas de complejidad geométrica en dispositivos de sujeción "*Quick Point reference*" y "*Profile Gripping*" será cada vez más usada en la industria metalmecánica, aeronáutica y militar ya que permite optimizar los tiempos de mecanizado y mantener activas la líneas de producción de maquinaria CNC, evitando paros de máquina por montaje y ajustes además de que incrementa la calidad del producto.

La integración y mezcla del sistema de sujeción "*Quick point reference*" y "*Profile gripping*", hace que la optimización de tiempos de mecanizado se incremente, agregando valor de calidad al producto por su repetitibilidad durante largas producciones en serie de los componentes de seguridad en los que se emplea, además que reduce el desperdicio de materias primas ya que en una sola sujeción se pueden mecanizar 5 caras de la pieza sin necesidad de montajes subsecuentes o posteriores. Así, debido al conocimiento del nivel de esfuerzos aplicados a sistemas de sujeción (de bajo perfil) para mecanizado por arranque de viruta a aceros aleados (AISI 8620) permitirá hacer extensiva y confiable la aplicación de ésta técnica dentro de la industria metalmecánica del país, lo que repercutirá en hacer más eficientes las metodologías de maquinados convencionales, logrando optimizar los sistemas de manufactura de control numérico.

# TRABAJO FUTURO

---

---

**Trabajo futuro**

Es importante que en esta investigación, la cual se enfoca a la evaluación de los esfuerzos y desplazamientos que se generan principalmente en el sistema de sujeción al ser sometidos por cargas de trabajo, se complemente con trabajos que deberán realizarse a futuro. Entre los cuales se recomienda:

- Plantear un estudio desde el punto de vista dinámico de todo el proceso de maquinado mediante el Método de Elementos Finitos.
- Realizar un estudio dónde se involucren diferentes materiales y geometrías que cumplan con las propiedades de resistencia, de manera tal que, se tengan materiales alternos para ser implementados para los procesos de maquinado requeridos.
- Realizar un estudio dónde se involucre el impacto térmico del proceso de maquinado, con los resultados obtenidos se tendrá un panorama más general del comportamiento del sistema de sujeción y del material a maquinar.
- Llevar a cabo un estudio de fatiga para poder predecir la vida del sistema de sujeción en función de su vida útil.
- Plantear nuevas propuestas de diseño para el sistema de sujeción que permitan soportar mayores cargas de trabajo, permitiendo el desarrollo de nuevas tecnologías de maquinado y conduciendo a la máxima optimización de las capacidades de la máquina.