

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY
DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.

INFLUENCIA DEL ENFRIAMIENTO CON CO_2 EN EL CORTE
ORTOGONAL DE ELASTOMERO TIPO SBR-1502

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE MANUFACTURA

POR

ARACELI RIVERA MORENO

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DEL 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

INFLUENCIA DEL ENFRIAMIENTO CON CO₂ EN EL CORTE
ORTOGONAL DE ELASTOMERO TIPO SBR-1502

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE MANUFACTURA

POR

ARACELI RIVERA MORENO

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE DEL 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.®**

**INFLUENCIA DEL ENFRIAMIENTO CON CO₂ EN EL CORTE
ORTOGONAL DE ELASTÓMERO TIPO SBR-1502**

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE MANUFACTURA

ARACELI RIVERA MORENO

MONTERREY, NL

DICIEMBRE 2010

DEDICATORIA

*“No hay Persona,
Donde no hay
Esfuerzo”*

Es por esto, que
dedico este trabajo a mis Padres,
por todo su amor, apoyo y esfuerzo
que me han brindado en esta nueva etapa
de mi formación personal y académica;
porque a pesar de la distancia
siempre los he sentido cerca, Gracias,
Los Amo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a mi asesor el Dr. Ciro A. Rodríguez por su tiempo y dedicación brindada durante toda la tesis, por el ánimo y apoyo que me brindo siempre, al Dr. Alex Elías por la confianza depositada en mí desde mi llegada hasta ahora, por sus buenos consejos y apoyo en todo momento, al Dr. Héctor R. Siller, por su apoyo incondicional para la elaboración de este trabajo de investigación; igualmente quiero agradecer al Dr. Antonio Sánchez por compartir sus conocimientos y Al Dr. Luis Hernández por su apoyo.

Agradezco hoy y siempre a mis padres y hermanos porque a pesar de no estar presentes físicamente, sé que siempre estaba en su mente y corazón, gracias por su apoyo, ánimos y consejos, sin duda alguna me dio la fortaleza para seguir adelante; un agradecimiento especial a Charly por la colaboración, paciencia, desvelos, apoyo y ánimos que me brinda a diario, por ser una persona con la que siempre puedo contar, gracias por tu amor.

A mis amigos que me han ayudado, alentado y hemos compartido grandes momentos, Victor, Gabriel, Erika, Hernán, Daniel, David, Bety, Servando, Oscar, Omar, Arturo, Ángel, Vicky, Huicho y Efrain. No voy a olvidar sus consejos y enseñanzas; a mis amigos que me apoyaron y me dieron ánimos a distancia, David, Temo, Ariel, Flor, Xochitl, Lalo, P. Panchito y P.Osvaldo.

Este trabajo ha sido posible gracias al financiamiento del proyecto Conacyt #61061: "Síntesis y Modelos Constitutivos de Polímeros Biocompatibles para Dispositivos Microfluídicos. Agradezco la

colaboración del Ing. Carlos (“Hules Colón”) por el apoyo de material para esta investigación.

En general quiero agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis, por haberme brindado su apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

RESUMEN

Un importante reto para la ingeniería es el desarrollo de aplicaciones dentro del campo de la biología y la medicina, tales como: chips biofluídicos, biosensores, sistemas de liberación controlada de medicamento, etc. En estos desarrollos una parte esencial está conformada por el uso de materiales elastoméricos. Los productos hechos de elastómeros generalmente se fabrican por compresión a condiciones controladas sin embargo, previo a su fabricación en serie se requiere de la elaboración de prototipos para probar su funcionamiento y buen desempeño.

Entre los procesos de fabricación más convenientes para prototipado se encuentra el maquinado, sin embargo, debido a la naturaleza de los elastómeros, es complicado aplicar este proceso. Es por eso que aún es necesario generar información que eventualmente lleve a la satisfactoria fabricación de productos elastoméricos mediante el proceso de maquinado.

En el presente trabajo de investigación se evalúa la influencia de diferentes variables, incluyendo el efecto de enfriamiento con CO₂ durante el proceso de torneado en corte ortogonal, de material elastomérico SBR-1502, principalmente se estudió la influencia sobre la calidad de la pieza, la fuerza de torneado, y la generación de viruta.

Los resultados demuestran que la temperatura es un factor que influye determinantemente en la calidad superficial, las fuerzas generadas, la precisión dimensional y la viruta que se genera en el proceso de maquinado de elastómeros.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vii
TABLA DE CONTENIDO	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xiii
NOMENCLATURA.....	xiv
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 <i>Motivación y Justificación.....</i>	<i>13</i>
1.2 <i>Objetivo.....</i>	<i>14</i>
1.3 <i>Revisión de Literatura</i>	<i>15</i>
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	16
2.1 <i>Montaje experimental.....</i>	<i>16</i>
2.2 <i>Selección del material</i>	<i>20</i>
2.3 <i>Selección de la herramienta.....</i>	<i>21</i>
2.4 <i>Selección de los factores del maquinado</i>	<i>22</i>
2.5 <i>Metodología de Diseño de experimentos</i>	<i>24</i>
3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	25
3.1 <i>Pruebas mecánicas.....</i>	<i>26</i>
3.2 <i>Fuerzas de Corte</i>	<i>31</i>

3.2.1	Criterio para el análisis de Fuerzas	31
3.2.2	Fuerza Axial	33
3.2.3	Fuerza de Reacción	35
3.2.4	Fuerza de Corte	37
3.3	<i>Rugosidad Superficial</i>	39
3.4	<i>Longitud y Clasificación de Virutas</i>	41
3.5	<i>Error Dimensional</i>	44
4.	CONCLUSIONES	46
5.	CONTRIBUCIONES	46
6.	TRABAJOS FUTUROS	47
	REFERENCIAS	49
	APÉNDICE A- Torneado de Elastómeros	51
	APÉNDICE B- Resumen de literatura	55
	APÉNDICE C- Pruebas Mecánicas de SBR-1502 (Dureza y Tensión)	72
	APÉNDICE D- Instrumentación experimental	80
	APÉNDICE E- Medición de las Fuerzas de corte	92
	APÉNDICE F- Medición de Rugosidad	115
	APÉNDICE G- Medición de la Longitud de virutas	119
	APÉNDICE H- Medición de la Continuidad de virutas	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Proceso para la adquisición de fuerzas	17
Figura 2	Torno CNC	17
Figura 3	Dinamómetro	17
Figura 4	Amplificador	18
Figura 5	Tarjeta de Adquisición de Datos	18
Figura 6	Máquina Universal	18
Figura 7	Rugosímetro	18
Figura 8	Estereoscopio	18
Figura 9	Pirómetro	18
Figura 10	Montaje experimental.....	19
Figura 11	Acondicionamiento de la Sujeción y pieza de trabajo [Toscano, 2010].....	19
Figura 12	Herramienta de Trabajo.....	22
Figura 13	Corte de Discos	23
Figura 14	Corte Ortogonal introduciendo toda la herramienta	23
Figura 15	Diseño de Experimentos.....	25
Figura 16	Prueba a tensión de SBR-1502 a temperatura ambiente	26
Figura 17	Probetas destruidas a Temperatura Ambiente	27
Figura 18	Gráfica de Prueba a Tensión SBR-1502 a Temperatura Ambiente.....	27
Figura 19	Grafica del Promedio de Pruebas a Tensión SBR-1502.....	28
Figura 20	Prueba a tensión de SBR-1502 enfriada a -10°C	28
Figura 21	Probetas destruidas a Temperatura Ambiente	29
Figura 22	Gráfica de Prueba a Tensión SBR-1502 enfriada por CO ₂	29

Figura 23 Promedio de la Gráfica de Prueba a Tensión SBR-1502 enfriada por CO ₂	30
Figura 24 Gráfica de tensión SBR-1502 Ambiente vs Enfriada por CO ₂	30
Figura 25 Fuerzas de Corte	31
Figura 26 Señal obtenida de Labview.....	32
Figura 27 Señal filtrada mostrando las cuatro réplicas a Temperatura Ambiente.....	32
Figura 28 Señal filtrada mostrando las cuatro réplicas enfriada por CO ₂	33
Figura 29 Gráfica de tendencia de la Fx ante el factor Temperatura	34
Figura 30 Gráfica de Pareto de la Fx.....	34
Figura 31 Gráfica de tendencia de la Fy ante el factor Temperatura	36
Figura 32 Gráfica de Pareto de la Fy.....	36
Figura 33 Gráfica de tendencia de la Fz ante el factor Temperatura	38
Figura 34 Gráfica de Pareto de la Fz.....	38
Figura 35 Medición de Rugosidad	39
Figura 36 Gráfica de tendencia de la Rugosidad ante el factor Temperatura	40
Figura 37 Gráfica de Pareto de la Rugosidad.....	40
Figura 38 Modelo de virutas [Lewis;2002]	41
Figura 39 Gráfica de Pareto de la Longitud de Viruta	42
Figura 40 Gráfica de Pareto de la Continuidad.....	43
Figura 41 Virutas generadas a Temperatura ambiente.....	43
Figura 42 Virutas generadas en régimen de enfriamiento	43
Figura 43 Ancho del corte a Temperatura Ambiente	44
Figura 44 Ancho de viruta a Temperatura Ambiente	44

Figura 45 Ancho del corte en régimen de enfriamiento	45
Figura 46 Ancho de viruta en régimen de enfriamiento	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Revisión Bibliográfica.....	15
Tabla 2 Equipo utilizado.....	17
Tabla 3 Composición química de SBR-1502	20
Tabla 4 Propiedades Mecánicas, Denominación y Geometría de SBR-1502.....	20
Tabla 5 Prueba de Dureza.....	21
Tabla 6 Características de la Herramienta de Trabajo.....	22
Tabla 7 Factores de Maquinado	23
Tabla 8 Relación de pruebas a tensión de SBR-1502 a temperatura ambiente	26
Tabla 9 Relación de pruebas a tensión de SBR-1502 a -10 °C	29
Tabla 10 Resultados de ANOVA para Fx	34
Tabla 11 Resultados de ANOVA para Fy	35
Tabla 12 Resultados de ANOVA para Fz	37
Tabla 13 Resultados de ANOVA para Rugosidad	39
Tabla 14 Relación de Continuidad de virutas	42

NOMENCLATURA

a_p	Profundidad de corte	mm
f	Avance por revolución	mm/rev
F_x	Fuerza axial	N
F_y	Fuerza de reacción	N
F_z	Fuerza de corte	N
L	Longitud	mm/mm
R_a	Rugosidad aritmética	media mm
T_c	Temperatura de corte	°C
V_c	Velocidad de Corte	m/min
σ	Esfuerzo	MPa
ε	Deformación	mm/mm

1. INTRODUCCIÓN

Los elastómeros son polímeros capaces de desarrollar una deformación elástica grande si se les sujeta a esfuerzos relativamente pequeños. El elastómero más conocido y frecuentemente utilizado, es el caucho natural [Groover; 1ra Ed.].

A finales del siglo XIX los elastómeros comenzaron a utilizarse dando lugar a numerosas aplicaciones a nivel industrial, y hoy en día tienen cavidad incluso en el campo de la medicina, gracias a que se han desarrollado algunos con cualidades biocompatibles, los cuales no producen efectos adversos en el organismo cuando se pone en contacto con los tejidos vivos. Pueden emplearse para evaluar, tratar, aumentar, completar o reemplazar un órgano o tejido vivo. El organismo no debe rechazar estos materiales ni afectarlos durante su funcionamiento, ya que de no ser así deben descartarse como biomateriales, pues generan problemas que llegan a ser más graves que aquellos que se trata de corregir. [Pina et al; 2004]. Para lograr esto, se han realizado diversas investigaciones relacionadas con el comportamiento y los procesos de manufactura de polímeros biocompatibles.

La mayoría de los productos a base de elastómeros se fabrican mediante moldeo. Sin embargo, se requieren aplicar otros procesos menos tardados y costosos durante la etapa de desarrollo y prototipados de los componentes. Uno de los procesos más convenientes es el maquinado, debido a su versatilidad y rapidez. Sin embargo debido a la naturaleza de los elastómeros, su maquinado es un proceso realmente complicado (ver detalles en apéndice A).

El estado del arte del maquinado de elastómeros (ver apéndice B) sigue la tendencia a mejorar la calidad superficial de la pieza. En este trabajo de investigación se evalúa el efecto de enfriamiento en el proceso de torneado realizando un corte ortogonal para simplificar el modelo del maquinado y se compara con el generado a temperatura ambiente. También se analizan las fuerzas generadas en el corte, la morfología de la viruta y la calidad de la superficie maquinada.

1.1 Motivación y Justificación

En el campo de la biología y la medicina, los desarrollos tecnológicos en torno a los dispositivos microfluídicos tales como: chips biofluídicos, biosensores, sistemas de liberación controlada de medicamento, etc., involucran el uso de técnicas de fabricación rápidas para prototipado y desarrollo de componentes.

Este tipo de aplicaciones se fabrican mediante procesos de manufactura que requieren un costo elevado. A diferencia de estos procesos de manufactura el maquinado podría resultar más económico, rápido y versátil y podría estar orientado a la manufactura de prototipos con geometrías complicadas.

En estos desarrollos una parte esencial está conformada por el uso de nuevos materiales elastoméricos. Sin embargo se conoce poco sobre el comportamiento de los elastómeros en el proceso de maquinado; es por tal razón que es de suma importancia generar suficiente conocimiento para impulsar el desarrollo de dispositivos médicos [Alting et al; 2003].

Los elastómeros constituyen un importante bloque de materiales que presentan interesantes propiedades para la preparación de prótesis e implantes quirúrgicos, pues son materiales con amplio potencial médico

debido a sus propiedades mecánicas y su biocompatibilidad [Alting et al; 2003].

Si se logra conocer y visualizar el comportamiento de los elastómeros durante el mecanizado, se podrá mejorar este proceso tecnológico e impactar de manera notable la calidad de vida de muchos pacientes.

1.2 Objetivo

Los objetivos para el presente trabajo de investigación son los siguientes:

- Evaluar el efecto de enfriamiento en el proceso de torneado realizando corte ortogonal en material SBR-1502, y comparar los resultados con los de torneado a temperatura ambiente, en función de la calidad de la pieza y las variables de proceso.
- Desarrollar e implementar una metodología experimental para el estudio de la influencia de los parámetros en el proceso de torneado de elastómeros con corte ortogonal, sobre la calidad superficial y precisión dimensional del producto.
- Analizar la relación entre diversas variables de maquinado como lo son las fuerzas de corte, el tipo de viruta y el acabado superficial, en temperatura ambiente y con un pre-enfriamiento por CO₂.
- Sentar las bases para la simulación del maquinado de elastómeros mediante la generación de resultados experimentales y su análisis estadístico.

1.3 Revisión de Literatura

A continuación, en la Tabla 1, se muestra un resumen de los trabajos de investigación relacionados con el maquinado de elastómeros. Cabe mencionar que existen pocos trabajos sobre este contexto y todos siguen la tendencia de mejorar el proceso mediante la modificación de las temperaturas de trabajo. En la Tabla 1 también se muestran los parámetros de corte y las mediciones realizadas para cada uno de ellos. A partir de esta revisión se puede apreciar el alcance y las ventajas del presente trabajo de investigación.

En el apéndice B se muestra a detalle la revisión de los trabajos de investigación de torneado para elastómeros [Rodkwan, S; 2002], [Yan, et al, 2006], así como las nuevas tecnologías en el maquinado de elastómeros en régimen de enfriamiento [Rahman, 2003], [Dhokia, 2010].

Tabla 1. Revisión Bibliográfica.

Autor	Material	Operación de Maquinado	Herramienta de Trabajo	Parámetros de Corte						Ángulo de la herramienta		Mediciones						Temperatura de Trabajo			
				Vc (m/min)	RPM	f (mm/rev)	Ap (mm)	Ataque (°)	Desahogo (°)	Ra min (μm)	Fuerzas de Corte (N)				Viruta		Error Dimensional	Ambiente	CO ₂		
											Fx	Fy	Fz	FR	Longitud	Continuidad					
Lewis, M. [2002]	Caucho	Fresado	Acero de alta velocidad para madera		4200	0.762	6.35	32			NA	✓	✓	✓	✓				✓	✓	
					2900	0.127															25
					550	0.381															21
						0.636															20
Shih, J. [2004]	Caucho	Fresado	Cortador para madera		4200	0.762	6.35	32			NA				✓			✓	✓		
					2900	0.127														30	
					5550	0.381														25	
						0.636														21	
					0.84	20															
Luo, J. [2005]	Caucho	Fresado	Acero de alta velocidad para madera		4200	212	3.81	NA	NA	NA	362	✓	✓	✓	✓			✓	✓		
					2900	635															
					5550	10.6															
						14.8															
Rodkwan, S. [2002]	Caucho	Torneado (refrentado)	Acero de alta velocidad	150		0.0635	0.2	10	5	NA		✓	✓					✓	x		
						0.254	0.1													30	
																				50	
Yan, J. [2006]	Caucho	Torneado (refrentado)	Acero de alta velocidad		80	0.144	11.61	10	5	40		✓	✓					✓	✓		
					320															30	
					550															50	
Toscano R. [2010]	SBR (hule)	Torneado (cilindrado)	Insertos CVD	600	0.05	0.5	-6	-6	13	✓		✓	✓				✓	✓			
				400	0.025		-9	-9													
Araceli R. (Trabajo actual)	SBR-1502 (hule)	Torneado (tronzado)	Insertos CVD	60	0.5	5	-10	-10	8	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			
				120	0.25																

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se presenta el procedimiento experimental, el cual incluye la descripción de la pieza de trabajo, la sujeción, el material, el tipo de herramienta, la selección de los parámetros de proceso, así como los dispositivos para medir las variables de respuesta. También se describe la metodología del diseño de experimentos.

2.1 Montaje experimental

En base a trabajos anteriores sobre el maquinado de elastómeros (Toscano 2010), se seleccionó como pieza de trabajo un tubo corto de 1 pulg de diámetro, 3 pulgadas de longitud y 0.5 pulgadas de espesor en la pared. Para sujetar la pieza de trabajo se diseñó una sujeción que permitiera los cortes requeridos en una posición alejada del giro del husillo. Para los experimentos a baja temperatura, la sujeción y la pieza de trabajo se ensamblaron antes de introducir el CO₂, para reducir el tiempo de montaje en el husillo del torno y reducir el aumento de la temperatura en la pieza de trabajo.

La pieza de trabajo ejerce un conjunto de fuerzas sobre la herramienta, como resultado del proceso de corte. Estas fuerzas se miden mediante un dinamómetro piezoeléctrico, el cual transmite su señal a través de un amplificador donde se establece la relación Voltaje-Fuerza; dependiendo de los parámetros de escala del amplificador, el voltaje se convierte en valores de fuerza, en las diferentes direcciones. Esta señal es procesada en la tarjeta de adquisición de datos y enviada a una computadora para ser manipulada mediante una aplicación en el software Labview, previamente programada. Este procedimiento se ilustra en Figura 1.

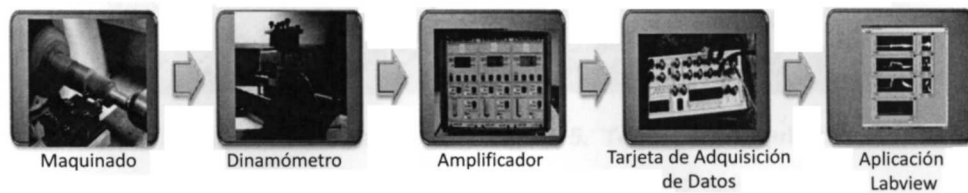


Figura 1. Proceso para la adquisición de fuerzas.

En la Tabla 2 se describen los equipos utilizados en la parte experimental, mientras que los mismos son mostrados en las Figuras 2 a 9. Las especificaciones técnicas de los equipos utilizados se describen en el apéndice D.

Tabla 2. Equipo utilizado.

Equipo	Marca	Modelo
Torno CNC (Figura 2)	Milltronics	ML-14
Dinamómetro (Figura 3)	Kistler	9257B
Amplificador (Figura 4)	Kistler	5814B1
Tarjeta de adquisición de datos (Figura 5)	NI	6062E
Maquina universal (Figura 6)	MTS Advantage	200 N
Rugosímetro (Figura 7)	Carl Zeiss	Surfcom 1500SD2
Estereoscopio (Figura 8)	Olympus	SZ2 – 2X
Termopar		Tipo K
Pirómetro (Figura 9)	Impac	

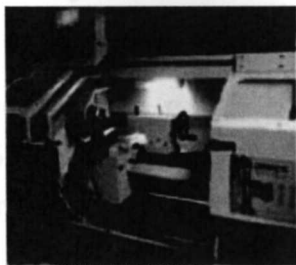


Figura 2. Torno CNC.

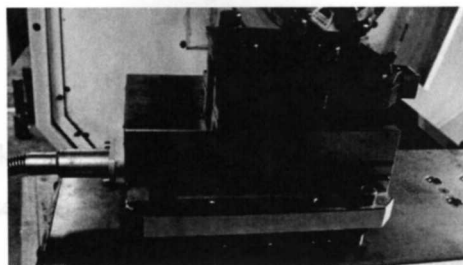


Figura 3. Dinamómetro.



Figura 4. Amplificador.

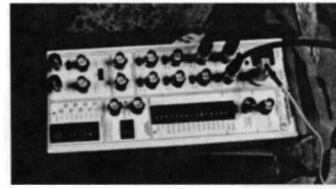


Figura 5. Tarjeta de Adquisición de Datos.

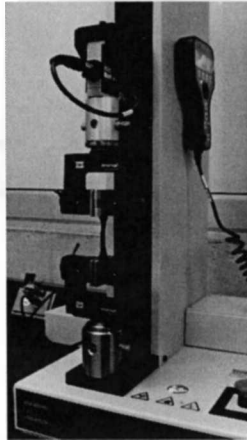


Figura 6. Máquina Universal.



Figura 7. Rugosímetro.



Figura 8. Estereoscopio.



Figura 9. Pirómetro.

El maquinado se realizó en un Torno Horizontal CNC, con potencia de 11/7.5 kW, y husillo tipo Camlock D1-5. Para el montaje de la herramienta de corte en el dinamómetro se coloca una base de acero para alcanzar la altura adecuada. Un sujetador se utiliza para fijar la herramienta al dinamómetro además se utiliza el contrapunto del torno para darle mayor estabilidad al corte como se observa en la Figura 10.

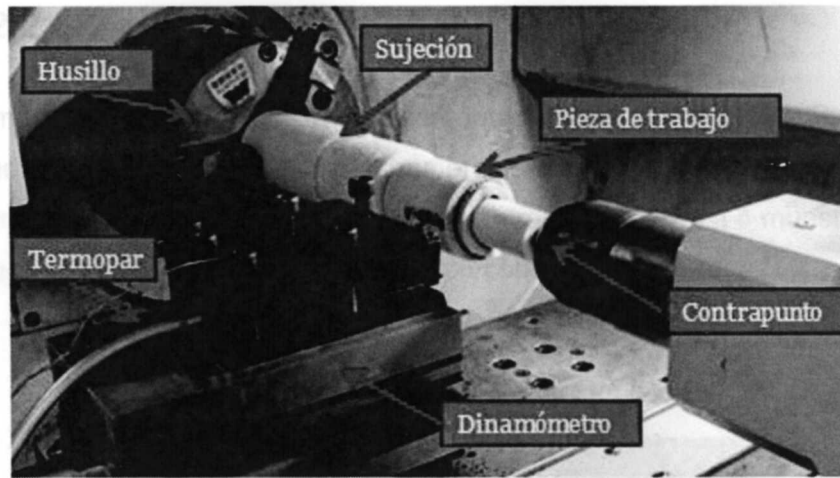


Figura 10. Montaje experimental.

Para la sujeción de la pieza, se consideró el trabajo de investigación de Toscano, [2010]; el cual coloca tornillos pasantes en la sujeción diseñada, con la finalidad de mantener rígida la pieza a maquinar como se observa en la Figura 11.

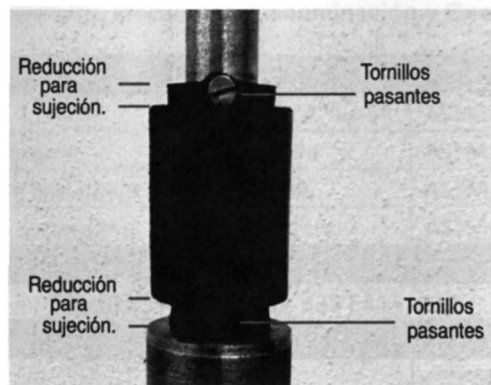


Figura 11. Acondicionamiento de la Sujeción y pieza de trabajo [Toscano, 2010].

2.2 Selección del material

El material utilizado en la experimentación es SBR-1502 (Styrene Butadiene Rubber) polimerizado por emulsión, La composición química del material se muestra en la Tabla 3, mientras que la Tabla 4 muestra las dimensiones de las piezas de trabajo, en condición de entrega.

Tabla 3. Composición química de SBR-1502.

SBR-1502: Composición Química	
Hule SBR Humex 1502	100
Caolín	123
Negro de humo GPF	30.8
Óxido de Zinc	5
TMT (disulfuro de tetra metil thiuram)	0.75
Ácido Estearico	1
Azufre	1
Aceite Aromático	30.8
Orgacel S (sulfuro de mercapto bensothiazol)	1.5

Tabla 4. Propiedades Mecánicas. Denominación v Geometría de SBR-1502.

SBR-1505 :Propiedades Mecánicas		
Dureza	65º Shore "A" +/-5º	ASTM: D 2240
Fuerza de tensión	4 MPa	ASTM: D 412
Elongación a la ruptura	250%	ASTM: D 412
Resistencia al desgarro	15 kg/cm	ASTM: D 624
Denominación:		
SAE J200, AA603, A13, B33 EA14, G21		
Geometría:		
Cilindro:	D_externo	50 mm
	D_interno	25.5 mm
	Longitud	60 mm

Se realizaron cinco pruebas de dureza bajo la norma ASTM: D 2240 por el laboratorio de pruebas “Metalisnpec”, mostrando los resultados en la Tabla 5, con la finalidad de corroborar una de las propiedades mecánicas del material a utilizar. Las especificaciones de esta prueba se encuentran en el apéndice C.

Tabla 5. Prueba de Dureza.

Muestra Numero	Medidas - Shore A					Promedio
	1	2	3	4	5	
1	72	70	69	70	72	71

Por otra parte, se hizo un análisis DRIFT (Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform) con la finalidad de verificar la naturaleza del material. Los resultados se pueden consultar en el apéndice C, Cabe mencionar que no se observaron los picos representativos de las dobles ligaduras típicas del material ya que se diluyeron en la espectrometría, debido a la cantidad de carga, y a que el material es negro y provoca que no se refleje la luz.

2.3 Selección de la herramienta

Para asegurar que el corte sea ortogonal se selecciono una herramienta rectangular (Figura 12, ver apéndice D), y de esta manera el filo es perpendicular a la dirección de la velocidad de corte. En la Tabla 6 se muestra las generalidades de la herramienta y en el apéndice C se encuentran las especificaciones técnicas.

Tabla 6. Características de la Herramienta de Trabajo.

Inserto	
SECO	LCMF 160404 – 0400 – MT TP200
Ángulo de Ataque	-10 °
Ángulo de Alivio	7 °
Porta-inserto	
SECO	CFMR 075 04B



Figura 12. Herramienta de Trabajo.

2.4 Selección de los factores del maquinado

Los factores de maquinado se determinaron mediante la revisión bibliográfica que se mencionó anteriormente. Se comenzó con un diseño preliminar, cortando discos como se muestra en la Figura 13 y probando a 124, 400, 600 y 800 (m/min) de Velocidad de corte, y con un avance de 0.01, 0.025, 0.0508 (mm/rev); se hicieron ocho combinaciones, con tres réplicas cada una a temperatura ambiente y en régimen de enfriamiento con CO₂. Realizando el corte en discos no se logró obtener una cantidad suficiente de datos debido a la corta duración del maquinado por lo que se decide realizar el corte ortogonal introduciendo completamente la herramienta como se muestra en la Figura 14 bajo los factores mostrados en la Tabla 7.

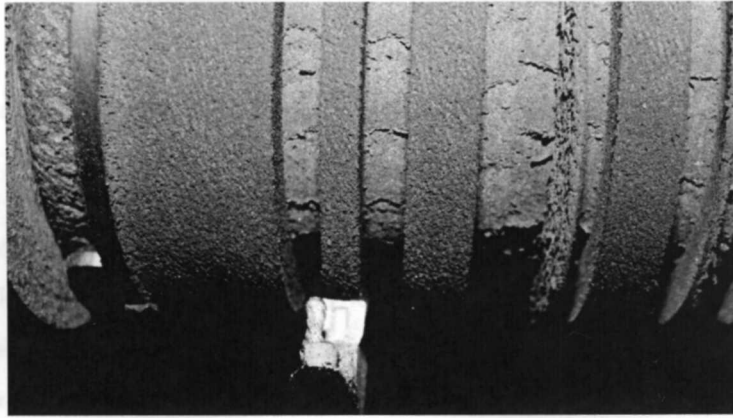


Figura 13. Corte de Discos.

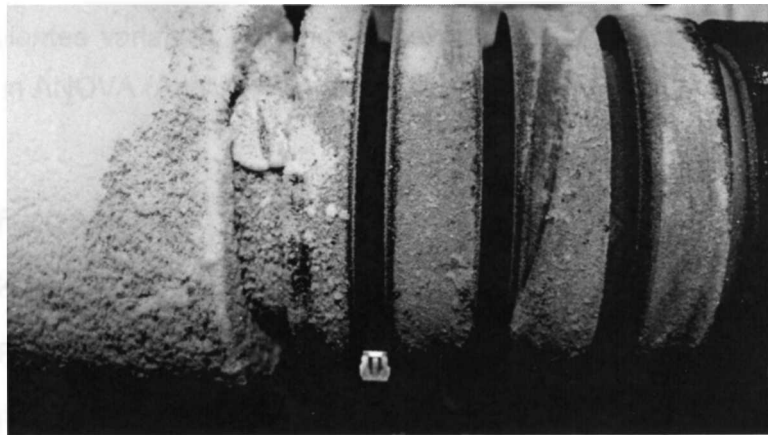


Figura 14. Corte Ortogonal introduciendo toda la herramienta.

Tabla 7. Factores de Maquinado.

Factores de Corte			Ángulo de la herramienta		Temperatura de Trabajo	
V_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)	Ataque (°)	Desahogo (°)	Ambiente	CO ₂
60	0.5	5	-10	7		
120	0.25					

2.5 Metodología de Diseño de experimentos

Una vez definidos los parámetros de proceso, se crea un DOE (Design of Experiments) utilizando el software Minitab 15. De acuerdo a la Tabla 7 el diseño tiene aleatoriedad de tres factores y dos niveles, que al realizar cuatro réplicas para cada combinación durante un periodo de 8 horas, resulta en total de 32 experimentos como se muestra en la Figura 15. Una vez concluida la experimentación, se realizó la filtración y obtención de fuerzas, se midió la rugosidad, se caracterizó la viruta y se midieron las dimensiones del corte en la pieza, obteniendo detallada información de las siguientes variables de salida. Finalmente, a estas respuestas se les aplicó un ANOVA (Analysis of Variance) para analizar sus tendencias.

- Fuerza axial (F_x)
- Fuerza radial o reacción (F_y)
- Fuerza de corte (F_z)
- Rugosidad (R_a , μm)
- Longitud de viruta (mm)
- Continuidad de la viruta
- Error Dimensional

Minitab - Minitab_cheli.MPJ - [ANOVA_KARL_MODIFICADO ERIK_CHELLMTW ***]

File Edit Data Calc Stat Graph Editor Tools Window Help

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7-T	C8	C9	C10	C11	C12	C13
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Velocidad	Avance	Temperatura	Fx	Fy	Fz	Rugosidad	Long_virut	Continuidad
1	6	1	1	1	120	0.25	Ambiente	0.9	42.1	85.1	63.68	3.00	1
2	14	2	1	1	120	0.25	Ambiente	0.2	39.2	85.0	28.49	20.40	0
3	26	3	1	1	120	0.25	Semienfriado	-1.7	28.1	114.5	6.10	24.60	1
4	9	4	1	1	60	0.25	Semienfriado	-0.6	26.0	103.9	5.02	26.10	1
5	24	5	1	1	120	0.50	Ambiente	-0.0	42.0	105.5	46.29	8.25	1
6	1	6	1	1	60	0.25	Semienfriado	-1.3	30.4	119.8	7.31	27.90	1
7	19	7	1	1	60	0.50	Semienfriado	-1.8	36.4	186.4	10.05	14.60	1
8	18	8	1	1	120	0.25	Semienfriado	-1.1	28.8	115.0	8.55	27.80	1
9	31	9	1	1	60	0.50	Ambiente	1.9	48.5	115.6	46.58	11.40	1
10	12	10	1	1	120	0.50	Semienfriado	-3.1	37.9	203.0	6.22	12.00	1
11	13	11	1	1	60	0.25	Ambiente	0.5	46.6	89.1	47.82	4.20	0
12	28	12	1	1	120	0.50	Semienfriado	-1.8	46.3	198.3	6.40	12.30	1
13	15	13	1	1	60	0.50	Ambiente	2.3	45.5	107.2	32.26	15.60	1
14	10	14	1	1	120	0.25	Semienfriado	-0.6	24.6	102.3	13.35	29.40	1
15	23	15	1	1	60	0.50	Ambiente	2.5	47.0	120.0	42.32	16.50	1
16	20	16	1	1	120	0.50	Semienfriado	-0.8	30.7	140.0	8.52	29.10	1
17	25	17	1	1	60	0.25	Semienfriado	-0.7	26.1	109.3	10.30	26.20	1
18	2	18	1	1	120	0.25	Semienfriado	-0.4	27.8	91.8	5.92	22.80	1
19	11	19	1	1	60	0.50	Semienfriado	-2.0	44.2	169.0	9.01	12.10	1
20	30	20	1	1	120	0.25	Ambiente	0.4	39.0	83.0	37.00	23.90	0
21	32	21	1	1	120	0.50	Ambiente	1.8	40.3	100.7	32.56	18.30	1
22	5	22	1	1	60	0.25	Ambiente	1.6	45.5	86.3	57.63	5.10	0
23	17	23	1	1	60	0.25	Semienfriado	-1.0	28.4	86.3	6.56	14.40	1
24	3	24	1	1	60	0.50	Semienfriado	-0.4	34.6	115.3	12.35	13.20	1
25	16	25	1	1	120	0.50	Ambiente	0.2	42.3	110.1	50.93	17.20	1
26	4	26	1	1	120	0.50	Semienfriado	-0.2	32.1	126.3	8.48	23.00	1
27	21	27	1	1	60	0.25	Ambiente	1.2	47.7	95.4	26.53	16.90	0
28	29	28	1	1	60	0.25	Ambiente	0.5	46.9	93.1	37.98	12.50	0
29	22	29	1	1	120	0.25	Ambiente	0.7	41.5	89.0	37.00	9.60	0
30	27	30	1	1	60	0.50	Semienfriado	-0.6	34.7	150.2	9.28	14.80	1
31	8	31	1	1	120	0.50	Ambiente	3.9	45.8	115.5	33.72	10.00	1
32	7	32	1	1	60	0.50	Ambiente	3.1	50.8	120.5	41.74	12.00	1

Figura 15. Diseño de Experimentos con las respuestas del ANOVA.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el siguiente capítulo se muestran los resultados de pruebas a tensión del material seleccionado, las fuerzas de corte, rugosidad superficial, longitud y clasificación de viruta, y por último los resultados de error dimensional.

Minitab - Minitab_cheli.MPJ - [ANOVA_KARL_MODIFICADO ERIK_CHELLMTW ***]

File Edit Data Calc Stat Graph Editor Tools Window Help

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7-T	C8	C9	C10	C11	C12	C13
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Velocidad	Avance	Temperatura	Fx	Fy	Fz	Rugosidad	Long_virut	Continuidad
1	6	1	1	1	120	0.25	Ambiente	0.9	42.1	85.1	63.68	3.00	1
2	14	2	1	1	120	0.25	Ambiente	0.2	39.2	85.0	28.49	20.40	0
3	26	3	1	1	120	0.25	Semienfriado	-1.7	28.1	114.5	6.10	24.60	1
4	9	4	1	1	60	0.25	Semienfriado	-0.6	26.0	103.9	5.02	26.10	1
5	24	5	1	1	120	0.50	Ambiente	-0.0	42.0	105.5	46.29	8.25	1
6	1	6	1	1	60	0.25	Semienfriado	-1.3	30.4	119.8	7.31	27.90	1
7	19	7	1	1	60	0.50	Semienfriado	-1.8	36.4	186.4	10.05	14.60	1
8	18	8	1	1	120	0.25	Semienfriado	-1.1	28.8	115.0	8.55	27.80	1
9	31	9	1	1	60	0.50	Ambiente	1.9	48.5	115.6	46.58	11.40	1
10	12	10	1	1	120	0.50	Semienfriado	-3.1	37.9	203.0	6.22	12.00	1
11	13	11	1	1	60	0.25	Ambiente	0.5	46.6	89.1	47.82	4.20	0
12	28	12	1	1	120	0.50	Semienfriado	-1.8	46.3	198.3	6.40	12.30	1
13	15	13	1	1	60	0.50	Ambiente	2.3	45.5	107.2	32.26	15.60	1
14	10	14	1	1	120	0.25	Semienfriado	-0.6	24.6	102.3	13.35	29.40	1
15	23	15	1	1	60	0.50	Ambiente	2.5	47.0	120.0	42.32	16.50	1
16	20	16	1	1	120	0.50	Semienfriado	-0.8	30.7	140.0	8.52	29.10	1
17	25	17	1	1	60	0.25	Semienfriado	-0.7	26.1	109.3	10.30	26.20	1
18	2	18	1	1	120	0.25	Semienfriado	-0.4	27.8	91.8	5.92	22.80	1
19	11	19	1	1	60	0.50	Semienfriado	-2.0	44.2	169.0	9.01	12.10	1
20	30	20	1	1	120	0.25	Ambiente	0.4	39.0	83.0	37.00	23.90	0
21	32	21	1	1	120	0.50	Ambiente	1.8	40.3	100.7	32.56	18.30	1
22	5	22	1	1	60	0.25	Ambiente	1.6	45.5	86.3	57.63	5.10	0
23	17	23	1	1	60	0.25	Semienfriado	-1.0	28.4	86.3	6.56	14.40	1
24	3	24	1	1	60	0.50	Semienfriado	-0.4	34.6	115.3	12.35	13.20	1
25	16	25	1	1	120	0.50	Ambiente	0.2	42.3	110.1	50.93	17.20	1
26	4	26	1	1	120	0.50	Semienfriado	-0.2	32.1	126.3	8.48	23.00	1
27	21	27	1	1	60	0.25	Ambiente	1.2	47.7	95.4	26.53	16.90	0
28	29	28	1	1	60	0.25	Ambiente	0.5	46.9	93.1	37.98	12.50	0
29	22	29	1	1	120	0.25	Ambiente	0.7	41.5	89.0	37.00	9.60	0
30	27	30	1	1	60	0.50	Semienfriado	-0.6	34.7	150.2	9.28	14.80	1
31	8	31	1	1	120	0.50	Ambiente	3.9	45.8	115.5	33.72	10.00	1
32	7	32	1	1	60	0.50	Ambiente	3.1	50.8	120.5	41.74	12.00	1

Figura 15. Diseño de Experimentos con las respuestas del ANOVA.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el siguiente capítulo se muestran los resultados de pruebas a tensión del material seleccionado, las fuerzas de corte, rugosidad superficial, longitud y clasificación de viruta, y por último los resultados de error dimensional.

3.1 Pruebas mecánicas

Para caracterizar mecánicamente al material se realizaron 5 pruebas a tensión como se muestra en la Figura 16 bajo las especificaciones de la norma ASTM D-412 (Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic elastomers—Tension); las medidas de las probetas evaluadas son del Tipo C, y las pruebas se hicieron a una velocidad de 500 mm/min. La norma indica que a temperatura ambiente las pruebas se deben hacer a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$. En la Tabla 8 se muestra la relación de las probetas, mientras que en la Figura 17 se observan las probetas fracturadas.

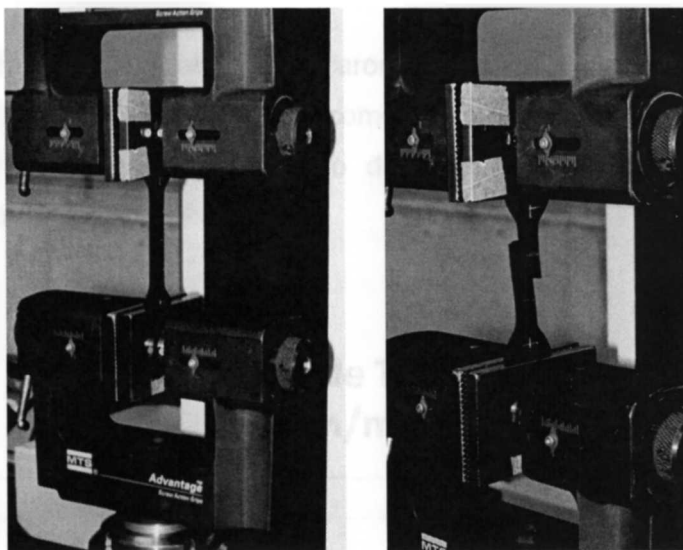


Figura 16. Prueba a tensión de SBR-1502 a temperatura ambiente.

Tabla 8. Relación de pruebas a tensión de SBR-1502 a temperatura ambiente.

Prueba	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Humedad (%)
3_a	6.1	3.34	21.5	53
6_a	6	3.38	21.5	51.4
7_a	6.1	3.32	21.8	51.7
8_a	6.18	3.2	21.9	51.7
11_a	6.08	3.4	22	51.2

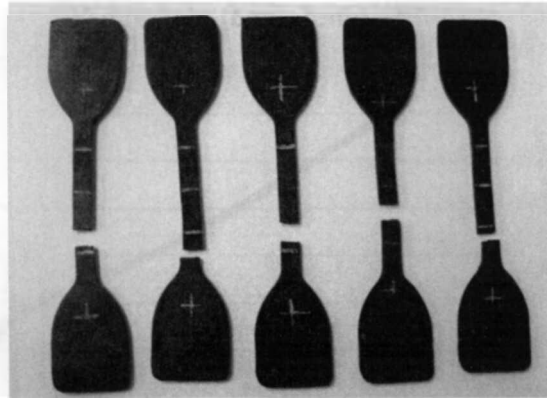


Figura 17. Probetas destruidas a Temperatura Ambiente.

Con los datos obtenidos se graficaron las curvas esfuerzo-deformación para cada una de las pruebas, como se observa en la Figura 18. Y posteriormente se hizo un promedio de estas, obteniendo una sola curva como se muestra en la Figura 19.

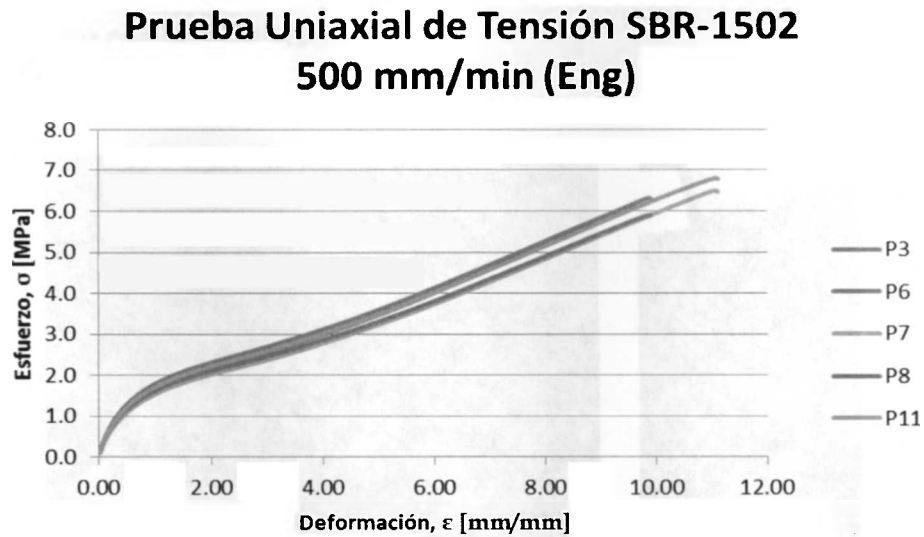


Figura 18. Gráfica de Prueba a Tensión SBR-1502 a Temperatura Ambiente.

**Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502
500 mm/min (Eng) Temp ambiente**

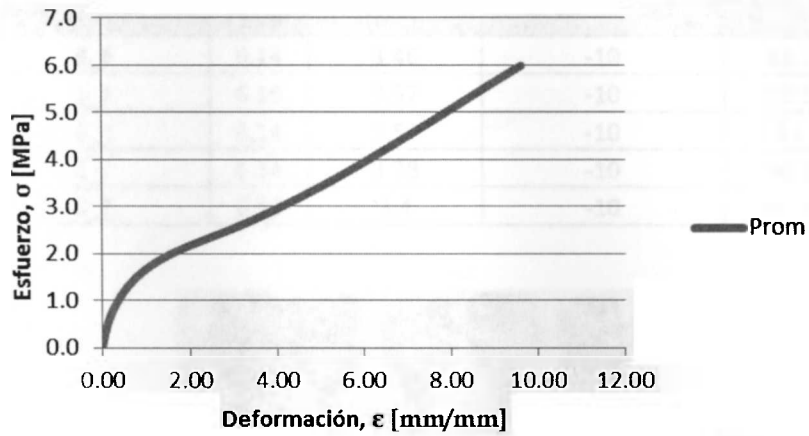


Figura 19. Grafica del Promedio de Pruebas a Tensión SBR-1502.

De igual manera se realizan 5 pruebas a tensión enfriando las probetas con CO_2 , como se observa en la Figura 20. La relación de dichas pruebas se muestra en la Tabla 9 y las probetas fracturadas se muestran en la Figura 21. La temperatura inicial de las pruebas fue de $-10\text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ$, lo cual se verificó con un pirómetro.

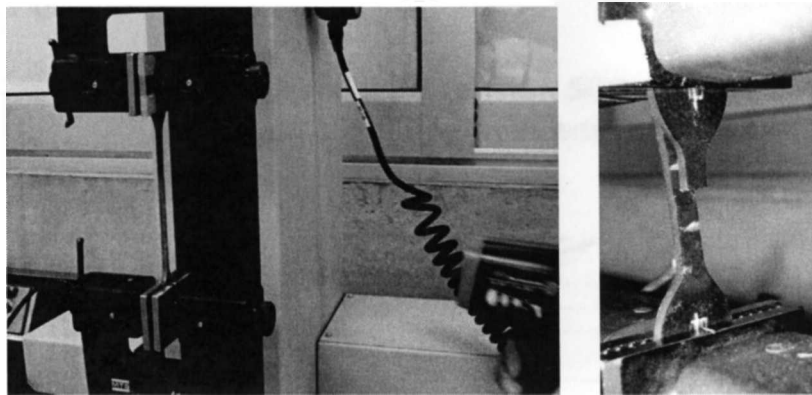


Figura 20. Prueba a tensión de SBR-1502 enfriada a -10°C .

Tabla 9. Relación de pruebas a tensión de SBR-1502 a -10 °C.

Prueba	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Temperatura °C	Humedad (%)
3_f	6.14	3.46	-10	51.7
5_f	6.16	3.57	-10	50.5
6_f	6.14	3.57	-10	51
7_f	6.34	3.38	-10	50.9
8_f	6.18	3.4	-10	50.7

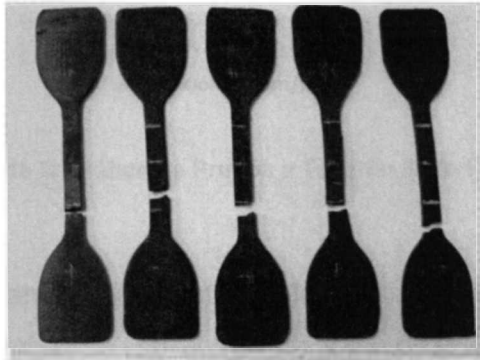


Figura 21. Probetas destruidas a Temperatura Ambiente.

Con los datos obtenidos en régimen de enfriamiento se forma la gráfica esfuerzo-deformación para cada una de las pruebas como se observa en la Figura 22, y después se hace un promedio de estas, como se muestra en la Figura 23.

**Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502
500 mm/min (Eng) Régimen enfriado por
CO₂**

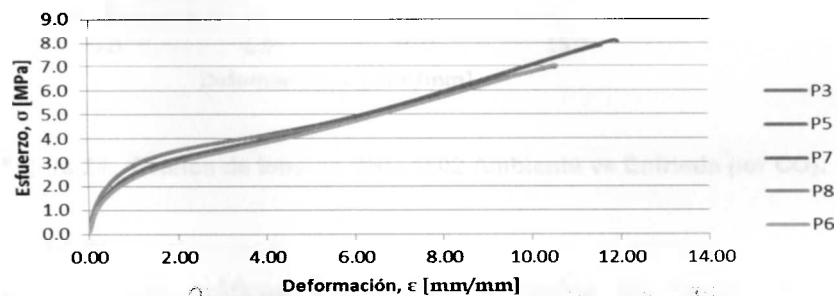


Figura 22. Gráfica de Prueba a Tensión SBR-1502 enfriada por CO₂.

Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502 500 mm/min (Eng) Régimen enfriado por CO₂

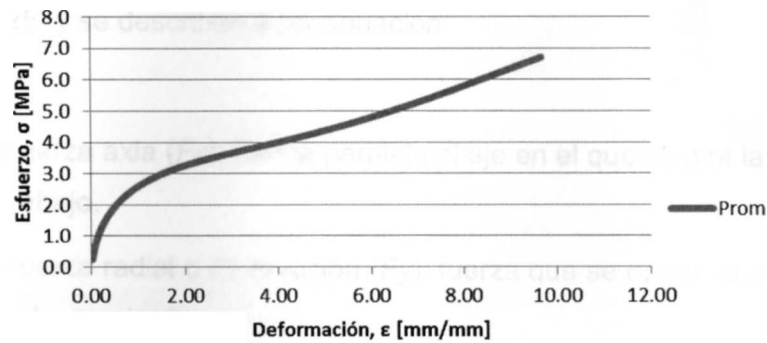


Figura 23. Promedio de la Gráfica de Prueba a Tensión SBR-1502 enfriada por CO₂.

Después de haber analizado y graficado los datos de las pruebas, se creó una gráfica con ambas temperaturas de trabajo, (Figura 24) donde se comprueba el aumento de la resistencia que adquiere el material en régimen de enfriamiento por CO₂.

Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502 500 mm/min (Eng)

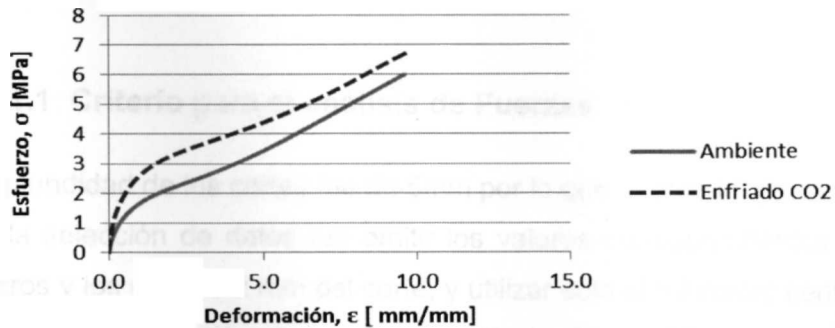


Figura 24. Gráfica de tensión SBR-1502 Ambiente vs Enfriada por CO₂.

El cálculo y las gráficas ingenieriles y reales de cada prueba se encuentran en el apéndice C.

3.2 Fuerzas de Corte

Las fuerzas que se registraron durante el torneado se muestran en la Figura 25 y se describen a continuación:

- Fuerza axia (F_x): fuerza paralela al eje en el que se gira la pieza de trabajo.
- Fuerza radial o de reacción (F_y): fuerza que se opone al avance de la herramienta.
- Fuerza de corte (F_z): fuerza tangencial a la circunferencia de la pieza que se ejerce sobre la punta de la herramienta

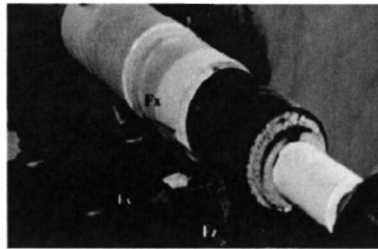


Figura 25. Fuerzas de Corte.

3.2.1 Criterio para el análisis de Fuerzas

La profundidad de los cortes fue de 5mm por lo que el criterio que se tomó para la selección de datos fue omitir los valores correspondientes a los primeros y los últimos 2 mm del corte, y utilizar solo el milímetro central (1 mm) para la valoración de las fuerzas. En la Figura 26 se muestra un ejemplo de la señal obtenida en Labview, y a la cual se le aplica un filtro paso-bajo en Matlab, para obtener la señal como la que se muestra en como se muestra en la Figura 27 (temperatura ambiente) la Figura 28 muestra un ejemplo del régimen de enfriamiento por CO₂. Los detalles de valores y el resto de las gráficas se encuentran ver en el apéndice E.

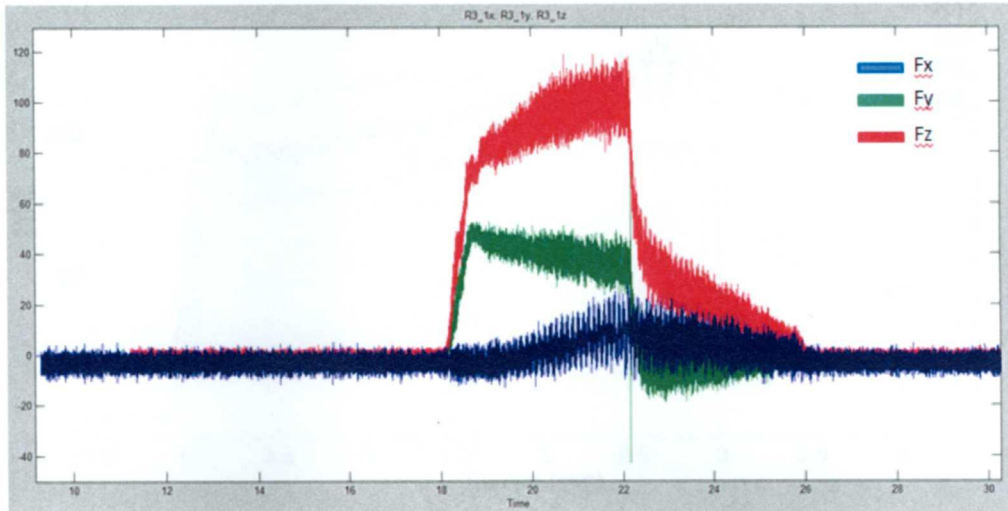


Figura 26. Señal obtenida de Labview.

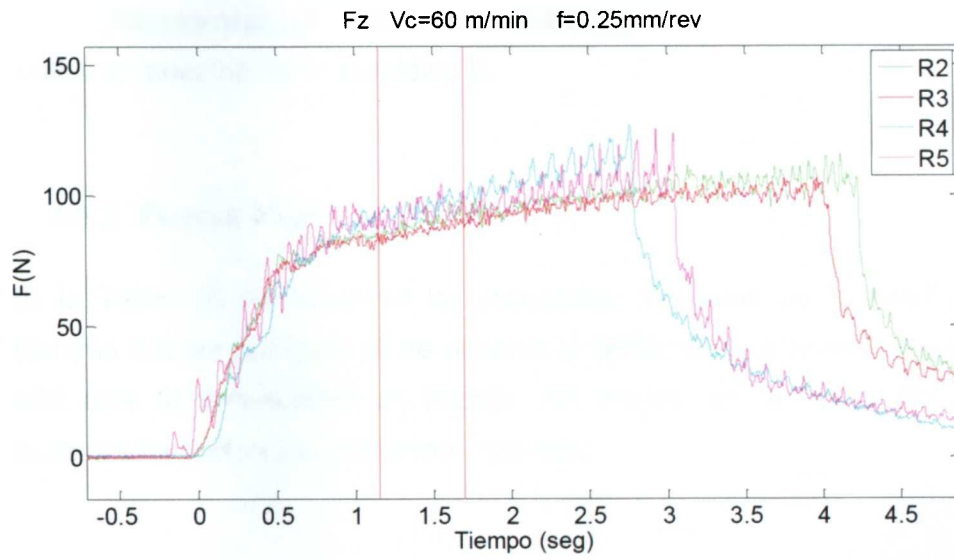


Figura 27. Señal filtrada mostrando las cuatro réplicas a Temperatura Ambiente.

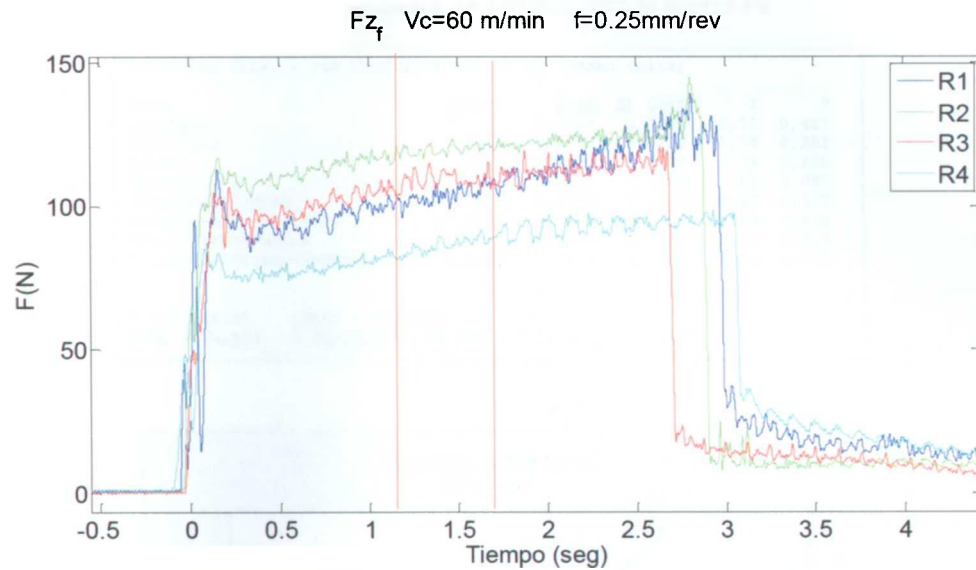


Figura 28. Señal filtrada mostrando las cuatro réplicas enfriada por CO₂.

Después de tener las señales filtradas se realiza un promedio bajo el criterio mencionado, obteniendo los valores de las fuerzas de corte, las cuales se muestran en el apéndice E.

3.2.2 Fuerza Axial

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de la ANOVA, mientras que en la Figura 29 se observa la tendencia que tiene la fuerza axial ante la temperatura de trabajo. Así mismo, en la Figura 30 se muestran los factores significativos, que son:

- Temperatura
- Avance-Temperatura

Tabla 10. Resultados de ANOVA para la fuerza F_x .

Estimated Effects and Coefficients for F_x (coded units)						
Term	Effect	Coef.	SE Coef	T	P	
Constant		0,1147	0,1623	0,71	0,487	
Velocidad	-0,4079	-0,2040	0,1623	-1,26	0,221	
Avance	0,3781	0,1890	0,1623	1,16	0,256	
Temperatura	2,4799	1,2400	0,1623	7,64	0,000	
Velocidad*Avance	-0,1856	-0,0928	0,1623	-0,57	0,573	
Velocidad*Temperatura	-0,2636	-0,1318	0,1623	-0,81	0,425	
Avance*Temperatura	0,8130	0,4065	0,1623	2,50	0,019	
Velocidad*Avance*Temperatura	-0,1048	-0,0524	0,1623	-0,32	0,750	

S = 0,918056 PRESS = 35,9606
R-Sq = 74,10% R-Sq(pred) = 53,96% R-Sq(adj) = 66,55%

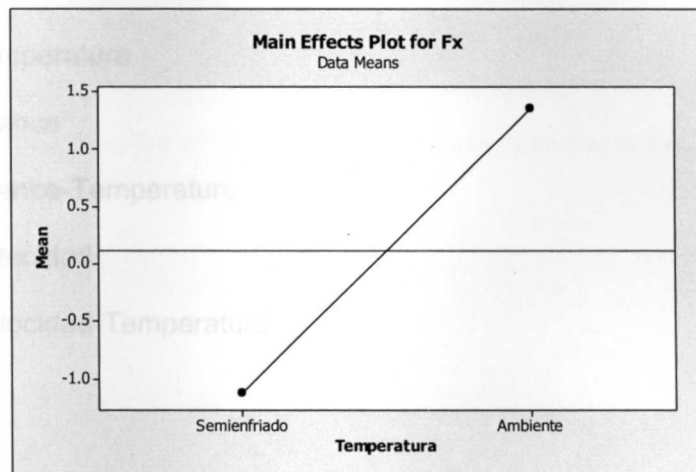


Figura 29. Gráfica de tendencia para la fuerza F_x ante el factor Temperatura.

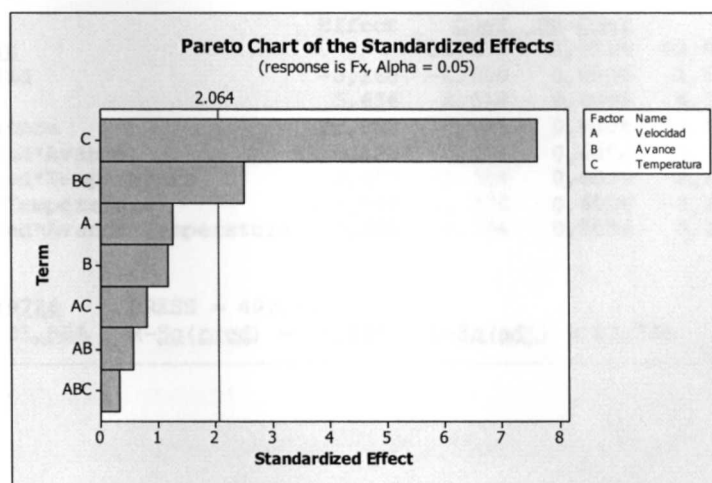


Figura 30. Gráfica de Pareto para la fuerza F_x .

3.2.3 Fuerza de Reacción

La Tabla 11 muestra los resultados obtenidos de la ANOVA, con un porcentaje del 81.73 % de confiabilidad, mientras que en la Figura 31 se observa la tendencia que tiene la fuerza de Reacción ante la temperatura de trabajo. Los valores P de los factores determinan la significancia de la regresión aplicada [Escalante; 1ra Ed.]. De acuerdo a la Figura 32 los factores de influencia son los siguientes:

- Temperatura
- Avance
- Avance-Temperatura
- Velocidad
- Velocidad-Temperatura

Tabla 11. Resultados de ANOVA para la fuerza F_y .

Estimated Effects and Coefficients for F_y (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		38,370	0,6006	63,89	0,000	
Velocidad	-3,160	-1,580	0,6006	-2,63	0,015	
Avance	5,636	2,818	0,6006	4,69	0,000	
Temperatura	12,083	6,041	0,6006	10,06	0,000	
Velocidad*Avance	0,122	0,061	0,6006	0,10	0,920	
Velocidad*Temperatura	-2,607	-1,304	0,6006	-2,17	0,040	
Avance*Temperatura	-3,944	-1,972	0,6006	-3,28	0,003	
Velocidad*Avance*Temperatura	0,307	0,154	0,6006	0,26	0,800	

S = 3,39726	PRESS = 492,432	
R-Sq = 85,86%	R-Sq(pred) = 74,86%	R-Sq(adi) = 81,73%

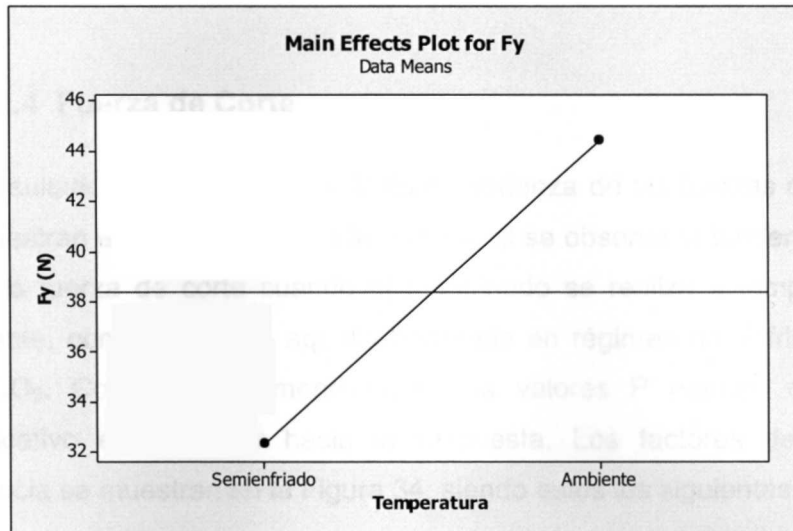


Figura 31. Gráfica de tendencia para la fuerza Fy ante el factor Temperatura.

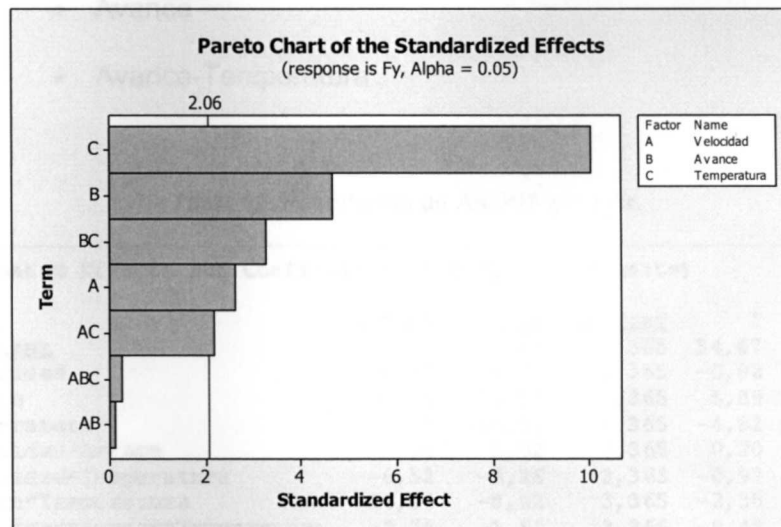


Figura 32. Gráfica de Pareto de para fuerza Fy.

De las gráficas anteriores se observa que las fuerzas son menores cuando el material se enfría. Se estima que esto se debe a que disminuye la fricción, lo cual se ve reflejado en el acabado superficial del material. Este comportamiento es parecido al de los metales de acuerdo a estudios anteriores [Shane Y. 2001].

3.2.4 Fuerza de Corte

Los resultados obtenidos del análisis de varianza de las fuerzas de corte se muestran en la Tabla 12. En la Figura 33 se observa la tendencia que tiene la fuerza de corte cuando el maquinado se realiza a temperatura ambiente, comparada con aquella generada en régimen de enfriamiento por CO₂. Como se ha mencionado, los valores P marcan qué tan significativo es el factor hacia la respuesta. Los factores de mayor influencia se muestran en la Figura 34, siendo estos los siguientes:

- Temperatura
- Avance
- Avance-Temperatura

Tabla 12. Resultados de ANOVA para Fz.

Estimated Effects and Coefficients for Fz (coded units)						
Term	Effect	Coef.	SE Coef	T	P	
Constant		116,64	3,365	34,67	0,000	
Velocidad	-0,15	-0,08	3,365	-0,02	0,982	
Avance	39,66	19,83	3,365	5,89	0,000	
Temperatura	-33,13	-16,57	3,365	-4,92	0,000	
Velocidad*Avance	2,04	1,02	3,365	0,30	0,764	
Velocidad*Temperatura	-6,52	-3,26	3,365	-0,97	0,342	
Avance*Temperatura	-16,04	-8,02	3,365	-2,38	0,025	
Velocidad*Avance*Temperatura	-3,26	-1,63	3,365	-0,48	0,633	

S = 19,0333	PRESS = 15456,8	
R-Sq = 73,31%	R-Sq(pred) = 52,55%	R-Sq(adi) = 65,53%

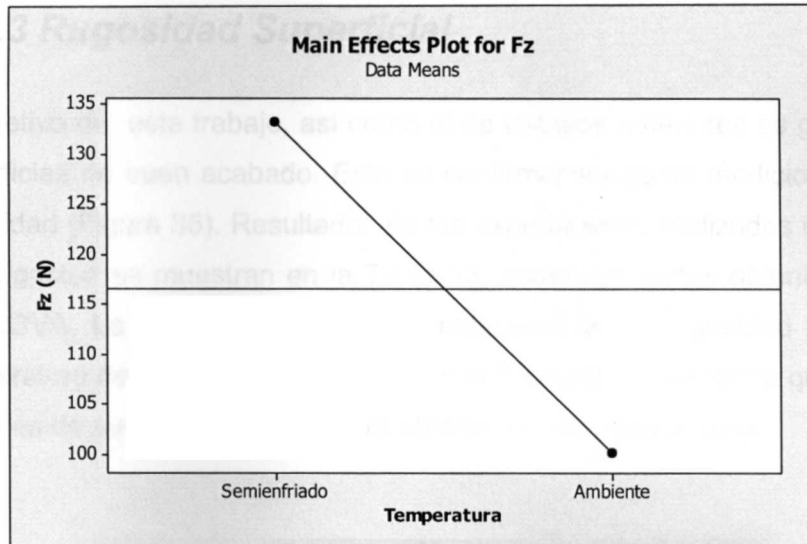


Figura 33. Gráfica de tendencia de la fuerza F_z ante el factor Temperatura.

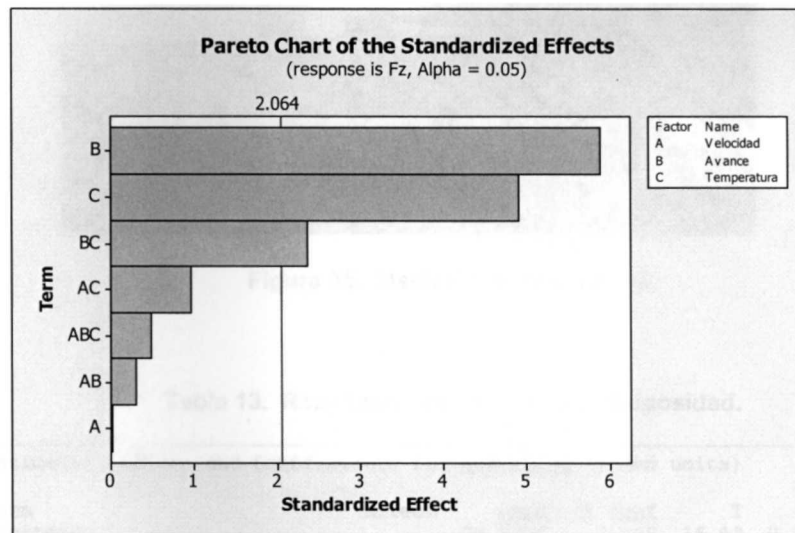


Figura 34. Gráfica de Pareto de la fuerza F_z .

El incremento de la fuerza de corte observado en las gráficas anteriores se debe al aumento del módulo de elasticidad del material en estado de enfriamiento por CO_2 , de acuerdo con las pruebas de tensión a diferentes temperaturas. Por lo tanto se ejerce sobre la herramienta una fuerza mayor en régimen enfriado que a temperatura ambiente.

3.3 Rugosidad Superficial

El objetivo de este trabajo, así como el de trabajos anteriores es generar superficies de buen acabado. Esto se confirma mediante mediciones de rugosidad (Figura 35). Resultados de los experimentos realizados en esta investigación se muestran en la Tabla 13, como resultados obtenidos de la ANOVA. La Figura 36 muestra la respuesta de la rugosidad ante la temperatura de trabajo, mientras que en la Figura 37 se confirma que este factor es de suma importancia para obtener un acabado óptimo.

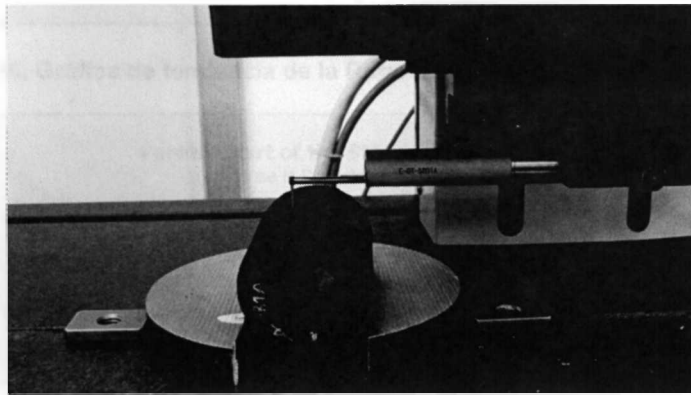


Figura 35. Medición de Rugosidad.

Tabla 13. Resultados de ANOVA para Rugosidad.

Estimated Effects and Coefficients for Rugosidad (coded units)						
Term	Effect	Coef.	SE Coef	T	P	
Constant		24.8734	1.469	16.93	0.000	
Velocidad	-0.5956	-0.2978	1.469	-0.20	0.841	
Avance	-0.1581	-0.0791	1.469	-0.05	0.958	
Temperatura	33.0694	16.5347	1.469	11.26	0.000	
Velocidad*Avance	-0.7131	-0.3566	1.469	-0.24	0.810	
Velocidad*Temperatura	0.1969	0.0984	1.469	0.07	0.947	
Avance*Temperatura	-1.0581	-0.5291	1.469	-0.36	0.722	
Velocidad*Avance*Temperatura	1.2619	0.6309	1.469	0.43	0.671	
S = 8.30930 PRESS = 2945.90						
R-Sq = 84.12% R-Sq(pred) = 71.77% R-Sq(adi) = 79.49%						

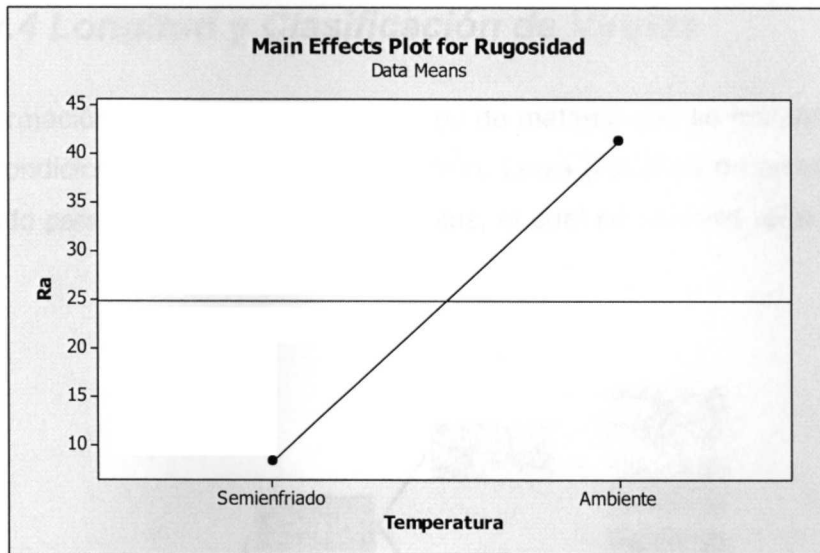


Figura 36. Gráfica de tendencia de la Rugosidad ante el factor Temperatura.

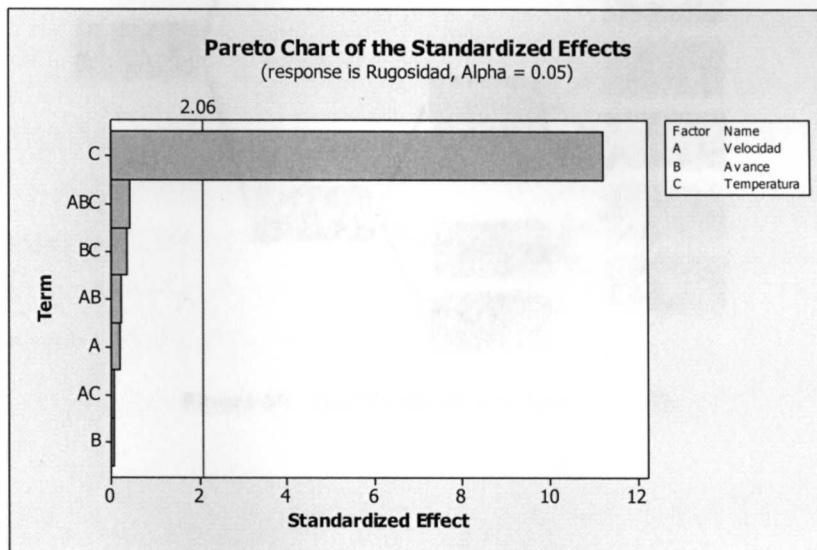


Figura 37. Gráfica de Pareto de la Rugosidad.

Se observa que la rugosidad es mayor a temperatura ambiente debido a que el material es más flexible durante el corte, lo que ocasiona mayores ondulaciones en la superficie que cuando esta frío.

3.4 Longitud y Clasificación de Virutas

La formación de viruta depende del tipo de material que se maquina y de las condiciones de corte de la operación. Lewis [2002] ha desarrollado un método para la clasificación de las virutas, el cual se muestra en la Figura 38.

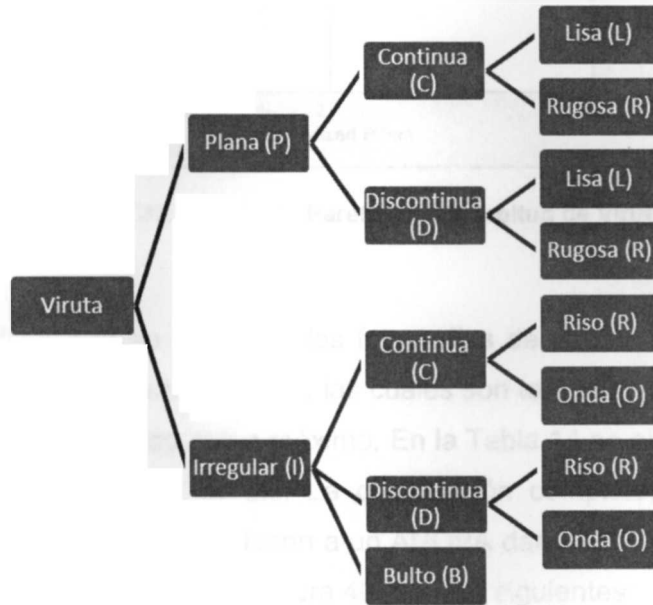


Figura 38. Modelo de virutas [Lewis;2002].

A lo largo de la experimentación se recolectaron las virutas generadas con cada uno de los cortes, esto con la finalidad de caracterizarlas y clasificarlas. En el apéndice G se muestran las medidas de longitud de cada viruta. Con estos resultados se realiza un análisis estadístico, parte del cual se muestra en la Figura 39, donde se destaca que el factor de importancia es la temperatura.

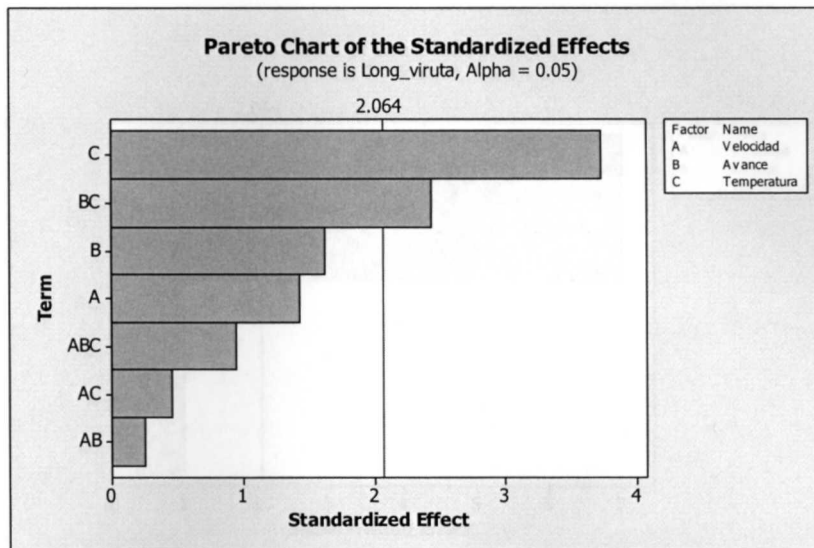


Figura 39. Gráfica de Pareto de la Longitud de Viruta.

En el apéndice H se muestran las fotografías de virutas representativas obtenidas en la experimentación, las cuales son tomadas con una cámara de 10x de zoom óptico como máximo. En la Tabla 14 se observa parte de la clasificación de las virutas. La clasificación completa, junto con los valores de entrada se introducen a un ANOVA dando como resultado que los factores de importancia (Figura 40) son los siguientes:

- Temperatura
- Avance
- Avance - Temperatura

Tabla 14. Relación de Continuidad de virutas.

Vc (m/min)	f (mm/rev)	Continuidad de viruta	
		Ambiente	Semienfriado
120	0.5	si	si
120	0.25	no	si
60	0.5	si	si
60	0.25	no	si

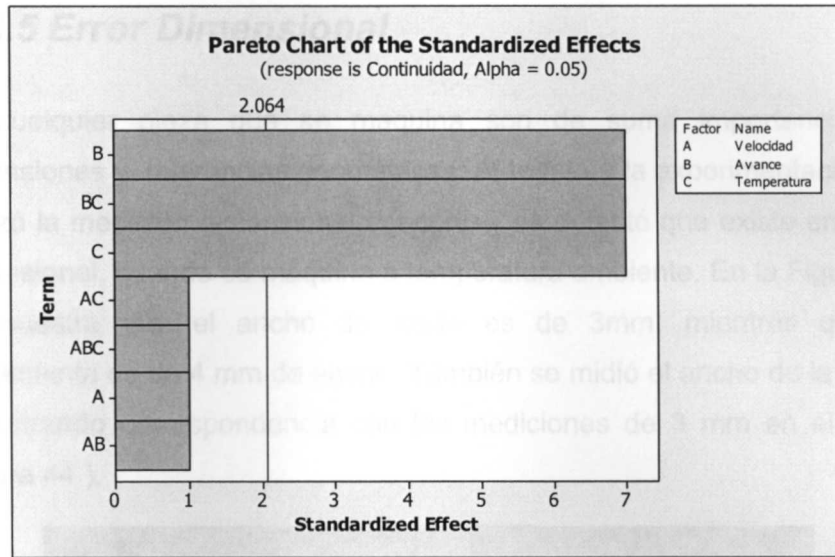


Figura 40. Gráfica de Pareto de la Continuidad.

En la Figura 41 se muestran algunas virutas a temperatura ambiente, mientras que en la Figura 42 se muestra la influencia del maquinado en régimen de enfriamiento. Con esto se confirma la influencia de la temperatura sobre la calidad del maquinado.

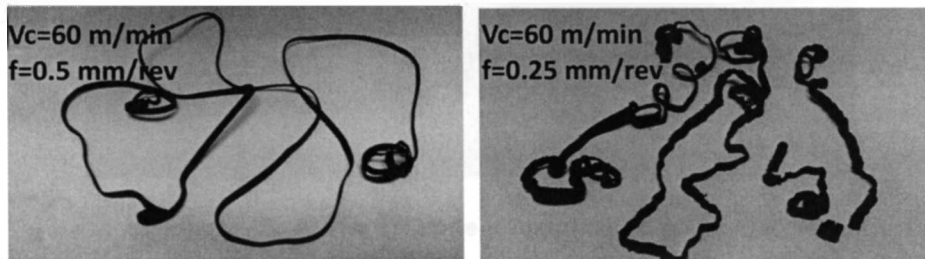


Figura 41. Virutas generadas a Temperatura ambiente.

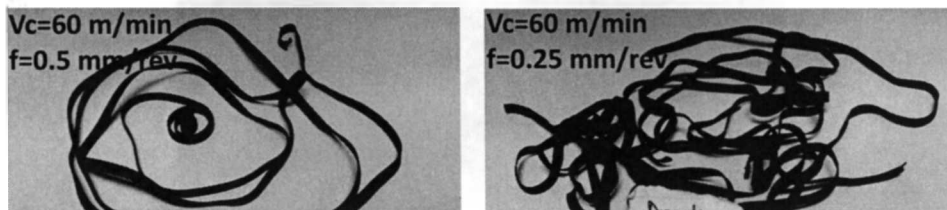


Figura 42. Virutas generadas en régimen de enfriamiento.

3.5 Error Dimensional

En cualquier pieza que se maquina son de suma importancia las dimensiones y tolerancias geométricas. Al terminar la experimentación se realizó la medición dimensional del corte y se detectó que existe un error dimensional, cuando se maquina a temperatura ambiente. En la Figura 43 se muestra que el ancho del corte es de 3mm, mientras que la herramienta es de 4 mm de ancho. También se midió el ancho de la viruta encontrando correspondencia con las mediciones de 3 mm en el corte (Figura 44).

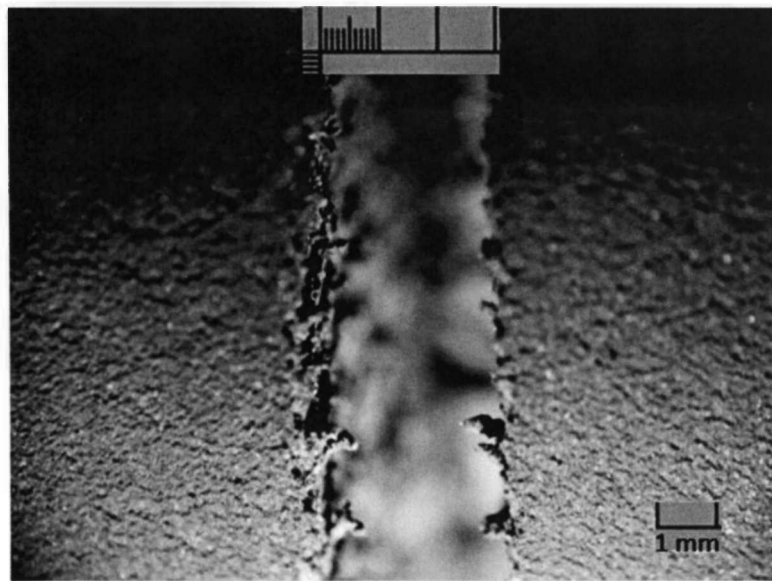


Figura 43. Ancho del corte a Temperatura Ambiente.

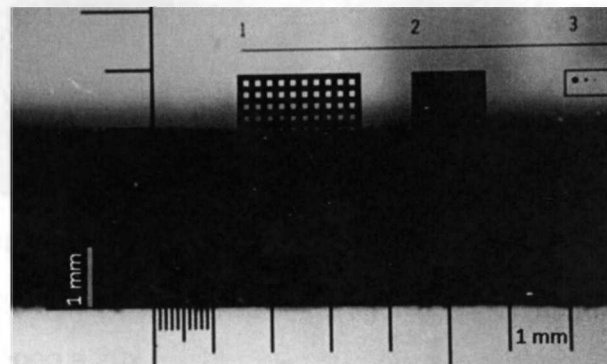


Figura 44. Ancho de viruta a Temperatura Ambiente.

En cambio, en la Figura 45 se muestra que el ancho del corte es de 4 mm; es decir, corresponde al ancho de la herramienta. De igual manera se comprueba al medir el ancho de la viruta generada, (Figura 46).

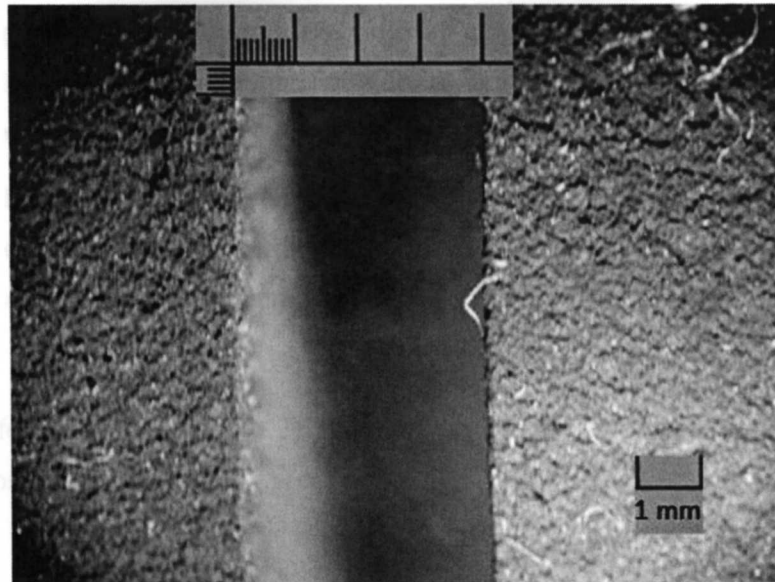


Figura 45. Ancho del corte en régimen de enfriamiento.

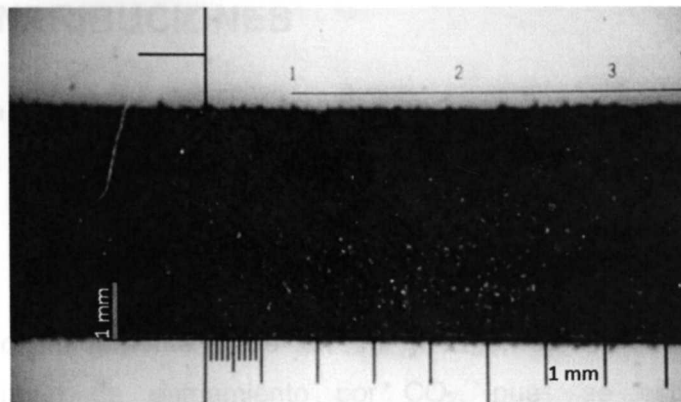


Figura 46. Ancho de viruta en régimen de enfriamiento.

Las fotografías correspondientes a las figuras 43-46 fueron tomadas con un estereoscópeo a 20x.

4. CONCLUSIONES

Al ser evaluado el efecto del enfriamiento en el proceso de torneado realizando un corte ortogonal del material SBR-1502 y comparándolo con el mismo proceso a temperatura ambiente, se ha concluido que:

1. La Fuerza de Corte (F_z) se incrementa en régimen de enfriamiento por CO_2 (entre un 20% y 35%) comparada con la generada a temperatura ambiente, debido al aumento de la resistencia del material.
2. La rugosidad se redujo en un 80% después de haber maquinado en régimen de enfriamiento por CO_2 , por lo que se obtiene un mejor acabado superficial.

Los efectos anteriores (1,2) también han sido reportados en trabajos anteriores (Yan J.[2005] y Toscano R.[2010]).

5. CONTRIBUCIONES

Con base a los resultados del presente trabajo se encontraron los siguientes efectos:

- La fuerza de reacción F_y es mayor a temperatura ambiente, aproximadamente entre un 16 y 27%, comparada con la de régimen de enfriamiento por CO_2 , pues se estima que a temperaturas bajas disminuye el coeficiente de fricción.

- La longitud de la viruta generada a temperatura ambiente es menor entre un 30% y un 50% en comparación con la longitud y continuidad de aquella generada en régimen de enfriamiento por CO₂.
- Existe un error dimensional en el corte de torneado a temperatura ambiente de un 25% (ancho =3mm) comparado con el de régimen de enfriamiento por CO₂ (ancho =4mm), el cual se puede determinar midiendo el ancho del canal y ancho de viruta.
- Se realizó la correspondiente validación estadística de la Fuerza de Corte, la Fuerza de Reacción, Rugosidad, Longitud y Continuidad de la viruta, lo cual en estudios previos publicados no había sido realizado. Las tendencias identificadas en este estudio son consistentes con resultados publicados por otros grupos de investigación [Yan J., 2004].

6. TRABAJOS FUTUROS

- Controlar la temperatura del proceso de maquinado en régimen de enfriamiento por CO₂ utilizando una cámara de enfriamiento.
- Reforzar la explicación técnica de la Fuerza de reacción (F_y) mediante la evaluación de modelos matemáticos herramienta-viruta.

- Completar la caracterización del material con un análisis DMA (Dynamic Mechanical Analysis) con la finalidad de obtener la temperatura de transición vítrea del polímero y un análisis TGA (Thermal Gravimetric Analysis).
- Realizar modelos de FEM (Método del Elemento Finito) que predigan las fuerzas de corte, la forma de la viruta, los esfuerzos y deformaciones.

REFERENCIAS

- [Altintas et al; 1991] Altintas, Y., Montgomery, D. Mechanism of cutting forces and surface generation in dynamic milling. ASME, J. Eng. Ind. 113, 160-168. (1991)
- [Alting et al; 2003] L. Alting, F. Kimura, H.N. Hansen, G. Bissacco. Micro Engineering, Published by Elsevier B.V. (2003)
- [Chiles et al, 1ra Ed. Español; 2006] Chiles, V., Black, S. C., Lissaman, A. J., Martin, S. J., Principios de ingeniería de manufactura. 1ra. Edición en Español, Editorial Continental (2006).
- [Dornfeld et al; 2008] Dornfeld, D., Lee, D. *Precision Manufacturing*. Springer. New York, USA. (2008).
- [Dhokia et al; 2010] Dhokia, S.; T. Newman, P. Crabtree, M. P. Ansell., The Formation of Adiabatic Shear Bands as a result of Cryogenic CNC Machining of Elastomers, Proceedings of the 36th International MATADOR Conference, Springer (2010)
- [Escalante; 1ra. Ed.] Escalante, V. J., Seis- Sigma: metodología y técnicas. 1ra Edición. Limusa/ Noriega (2003).
- [Groover; 1ra. Ed.] Groover P. M. Fundamentos de Manufactura Moderna. 1ra. Edición Prentice Hall Hispanoamerica.
- [Kalpakjian et al; 2003] Kalpakjian, S., Schmid, S., *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. Fourth Edition. Prentice Hall. (2003)
- [Lewis; 2002] Lewis, M. A., *End Milling of elastomers. , NCSU Tesis de maestría. (2002).*
- [Luo; 2005] Luo, J., Machining os Elastomers, Universidad de Michigan, Tesis
- [Montgomery; 2da. Ed.] Montgomery, D. C., Runger, G. C., Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería. 2da. Edicion, Limusa Wiley; (2007).
- [Rahman et al; 2003] Rahman, A. Senthil Kumar, Manzoor-UI-Salam, M. S. Ling., Effect of Chilled Air on Machinino Performance In End Milling,

- The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. (2003)
- [Rodkwan; 2002] Rodkwan, S., A numerical and Experimental Investigation of the Machinability os Elastomers. NCSU Tesis Doctoral. (2002).
- [Ramsden et al; 2007] Ramsden J., Allen D. M., Stephenson D. J., Alcock J. R., Pegg G. N., Fuller G., Goch G., The design and Manufacture of Bioedical Surfaces. *Annals of the CIRP* 5, 687-711 (2007).
- [Smith; 2008] Smith G. T. *Cutting Tool Technology –Industrial Handbook*. Springer (2008).
- [Sullivan et al; 2001] Sullivan D. O., Cottell M., Temperature measurement in single point turning. *Journal of Materials Processing Technology* 118, 301-308 (2001)
- [Shih et al; 2004] Shih A. J., Lewis M. A., Strenkowski J. S., End Milling of Elastomers- Fixture Design and Tool effectiveness for Material Removal. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126, 115-123 (2004).
- [Swierkowski et al; 1999] Swierkowski, S., Balch, J., Brewer,L., Copeland, A., Davidson, J., Fitch, P., Kimbrough, J., Madabhushi, R., Pastrone, R., Richardson, P., Tarte, L., Vainer, M. Large Microchannel array fabrication and results for DNA sequencing. *Micro- and Nanofabricated Structures and Devices for Biomedical Enviromental Applications II, SPIE's BIOS '99 International Biomedical Optics Symposium*. San Jose, CA. January 23-29. (1999).
- [Piña et al; 2004] Piña B. Ma. C., Medina M. N., *Los Materiales de implante. Materiales Avanzados*, 3, 6-12 (2004).
- [Yan et al; 2006] Yan J., Strenkowski J. S., *A finite element análisis of orthogonal rubber cutting, Journal of Material Processing Technology* 174: 102-108 (2006).
- [Yan et al; 2004] Tan, M., Huang, C., Fang, C., Chang, C. Development of a prototype Micro- Wire- EDM machine. *Journal of materials Processing Technology* 149. 99-105. (2004).

APÉNDICE A- Torneado de Elastómeros

El mecanizado, es un de deformación, en el que tienen lugar deformaciones plásticas a grandes velocidades. El estudio del proceso se complica aún más a causa de los parámetros de corte, las variaciones de la geometría de las herramientas y sus materiales, la temperatura, las condiciones de funcionamiento de la máquina e incluso el medio en que se desarrolla este proceso.

Es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una parte 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 viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie [Groover; 1ra. Ed.]

El torneado es una operación de maquinado en donde se remueve material de la pieza de trabajo con una herramienta de corte generando una superficie nueva, la pieza gira en el eje X mientras la herramienta de corte se mueve en dos dimensiones X y Z, en esta operación de maquinado crea un sólido de revolución.

Las operaciones de torneado se clasifican de acuerdo al movimiento entre la herramienta de y la pieza de trabajo, algunas de las operaciones más comunes son el refrentado, el de cono de inflexión, el ranurado, el tronzado, el roscado, y taladrado, el escariado, maquinado de interiores y el torneado simple.

Las variables de un proceso de torneado simple son:

1. La velocidad de corte, V_c (m/min), se define como la velocidad tangencial constante sobre la punta de la herramienta, por lo que si la herramienta cambia de diámetro durante el maquinado el control numérico del torno ajustara las revoluciones por minuto pero

mantendrá siempre la misma velocidad constante sobre la punta de la herramienta.

2. El avance por revolución (f), dado en (mm/rev), se define como la longitud desplazada longitudinalmente en función de las revoluciones del husillo
3. La profundidad de corte, (mm), es la distancia que la herramienta penetra en la pieza de trabajo para remover material, se define como la diferencia entre los diámetros iniciales y finales de la pieza

Las revoluciones por minuto, (mm/rev), se definen como la cantidad de giros que da el husillo por minuto, y se utiliza en lugar de la velocidad de corte.

Durante el torneado, se presenta una fuerza de oposición a corte sobre el plano de formación de viruta. Las fuerzas generadas dependen de la velocidad de corte, el avance, la sección transversal de la viruta y las propiedades físicas del material. La fuerza generada depende de la velocidad de corte, el avance, la sección transversal de la viruta y las propiedades físicas del material. La fuerza que se opone al avance de la herramienta se denomina fuerza axial (F_x), la fuerza que se opone a la profundidad de corte se denomina fuerza radial (F_y) y la fuerza tangencial que se presenta sobre la punta de la herramienta se denomina fuerza de corte (F_z), estas fuerzas se muestran en la Figura 1A.

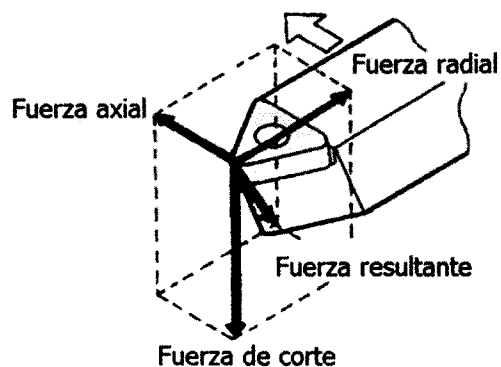


Figura 1A. Fuerzas de corte.

Los procesos de corte se clasifican en dos tipos, corte oblicuo y corte ortogonal. En la figura 2A(a) el eje cortante de la herramienta es perpendicular a la velocidad de corte, mientras la herramienta sigue su paso cortando a través del material, la viruta resultante sigue el flujo U_{chip} el cual a su vez es perpendicular al eje cortante, en esta condición se dice que el corte es ortogonal. En la figura 2A(b) se aprecia que el flujo de la viruta no es perpendicular al eje cortante y en esta condición se dice que el corte es oblicuo, esto sucede cuando el plano por el cual se desliza la viruta tiene un ángulo de inclinación con respecto al eje de giro. [Child et al; 2000]

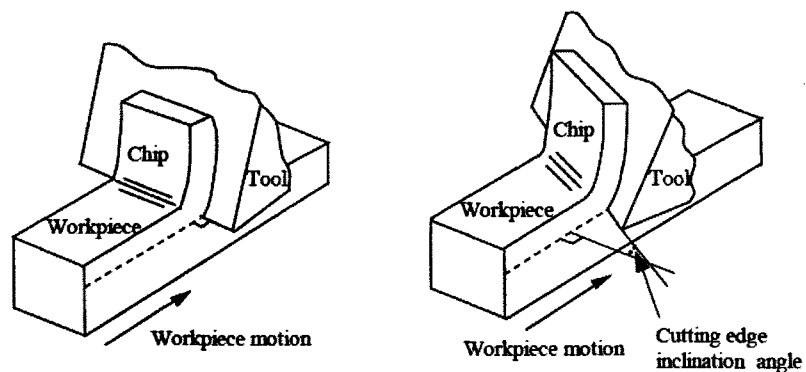


Figura 2A. Tipos de corte: a) Corte ortogonal y b) Corte oblicuo.

Elastómeros

Los polímeros son los más nuevos de los tipos básicos de materiales y, al mismo tiempo los más antiguamente conocidos por el hombre. Un polímero es un compuesto que consiste en moléculas de cadena larga, cada molécula esta hecho de unidades repetitivas que se conectan entre sí. Puede haber miles o millones de unidades en una sola molécula, de polímero. El término deriva de las palabras griegas Poly, que significa muchos, y meros que significa parte.

Los polímeros se dividen en plásticos y hules. Son materiales de ingeniería relativamente nuevos comparados con los metales y los

cerámicos, se conocen desde mediados del siglo XIX. A fin de cubrir los polímeros como una materia técnica, se considera apropiado dividirlos en las siguientes categorías: 1) y 2) donde se encuentran los plásticos, y 3) donde se encuentran los hules:

1. *Polímeros termoplásticos, o termoplásticos (TP)*, como se llaman frecuentemente, son materiales sólidos a temperatura ambiente, pero cuando se someten a temperaturas de algunos cientos de grados se convierten en líquidos viscosos. Esta característica permite conformarlos fácilmente y económicamente en productos útiles. Pueden sujetarse repetidamente a ciclos de calentamiento y enfriamiento sin que se degraden significativamente.

2. *Polímeros termofijos (TS)*, no toleran ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento como lo hacen los termoplásticos. Con calentamiento inicial, se ablandan y fluyen para ser moldeados, pero las temperaturas elevadas producen también reacción química que endurece el material y lo convierte en un sólido infusible. Si este polímero termofijo se recalienta, se degrada por pirolisis en lugar de ablandarse.

3. *Elastómeros (hules)*. Polímeros que exhiben una extrema extensibilidad elástica, cuando se sujetan a esfuerzos mecánicos relativamente bajos. Algunos elastómeros pueden estirarse alargando 10 veces su longitud y luego recuperan completamente su forma original. Aunque las propiedades son bastante diferentes a las de los termofijos, comparten una estructura molecular similar a la de estos, pero difieren de los termoplásticos.

APÉNDICE B- Resumen de literatura

Rodkwan; 2002. Expone que la rugosidad de la superficie en un elastómero maquinado es altamente dependiente del tipo de viruta producida en el maquinado. Virutas discontinuas son asociadas con una superficie rugosa del material, la cual resulta en dimensiones imprecisas de la pieza. La deformación de los elastómeros puede ser considerada no-lineal en los términos de la geometría del mismo.

El objetivo principal de esta investigación es obtener un mejor entendimiento de las condiciones de maquinado que mejoran la maquinabilidad de elastómeros. Se desarrollan modelos de indentación y, pruebas en corte ortogonal aseguran estos objetivos. Simulaciones de elemento finito son realizados para identificar las condiciones de maquinado que permiten una continua formación de virutas y una buena superficie final de la pieza.

Una serie de experimentos de corte ortogonal en elastómeros se desarrollan en un torno convencional. Los parámetros experimentales son:

Longitud de la herramienta = 12.7 mm

Material de la herramienta = HSS

Ángulo de salida = 5°

Ángulo de ataque = 10°, 30° y 50°

Avances por revolución = 0.0635 y 0.2550 mm/rev

Velocidad de corte = 2.50 m/s

Discusión de resultados:

El tipo de viruta es dependiente del ángulo de ataque y la velocidad de avance. En general virutas discontinuas son generadas por ángulos de

ataque de 10° y avances de 0.0635 mm/rev, cuando se incrementa el ángulo y el avance las virutas se vuelven más continuas. Una fluctuación en las fuerzas de corte ocurre debido a la flexibilidad del elastómero, y se pronuncia más en ángulos de 10° y avance de 0.0635 mm tal y como se ilustra en las Figuras 1B y 2B.

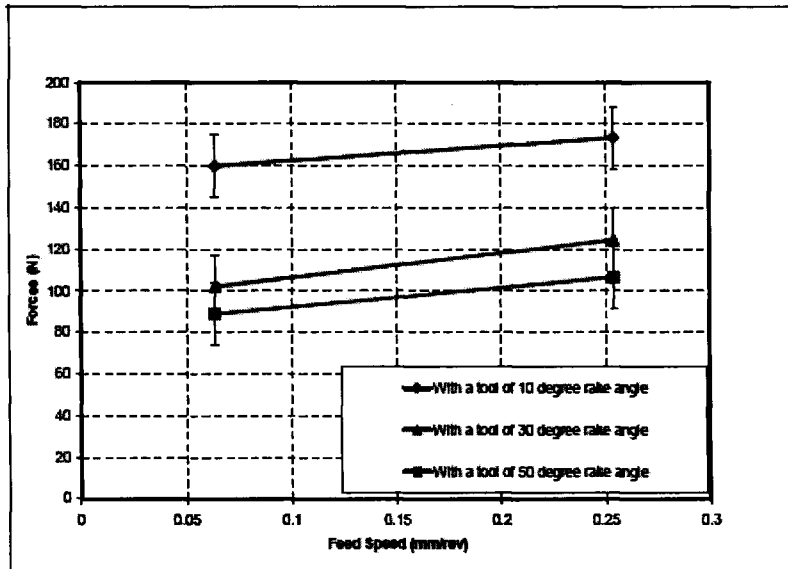


Figura 1B. Fuerza de Corte ($V_c = 2.50$ m/s) [Rodkwan; 2002]

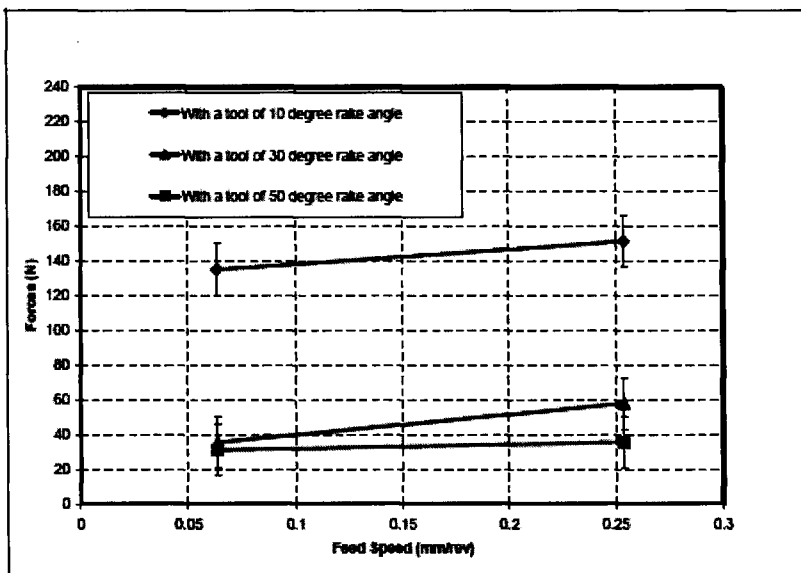


Figura 2B. Fuerza de Reacción ($V_c = 2.50$ m/s) [Rodkwan; 2002]

Yan et al; 2006. El estudio tiene como objetivo principal determinar las condiciones en las que el elastómero puede ser maquinado con una superficie suave, comparando los experimentos con la simulación de elemento finito.

Se examinan las fuerzas de corte, rugosidad y temperatura. Se encontró que la el ángulo de ataque y la temperatura de la pieza de trabajo son significantes en la rugosidad durante el corte. Ángulos grandes de ataque y enfriamiento de la pieza producen una superficie suave en el material lo cual corresponde a virutas continuas.

La densidad de energía de tensión cerca del filo de la herramienta se demuestra no ser únicamente larga si no que se extiende en una gran área en una superficie rugosa. Una gran energía de tensión corresponde a una superficie rugosa.

Tiene como objetivo, el torneado de elastómero y simulación numérica de corte ortogonal se realiza para tener una mejor comprensión del proceso, utilizando una nueva fijación y herramientas para tener un mejor acabado superficial. El Termómetro infrarrojo utilizado para la temperatura.

Parámetros de corte:

- Ángulos de ataque= 10°, 30°, 50° y 75°.
- Ángulos de salida= 5° y 20 °
- Rpm= 80, 320, 550
- Avances por revolución= 0.0127, 0.254 y 0.508 mm/rev.

La fuerza principal se aumenta durante el corte criogénico, siendo mayor cuando se aumenta la velocidad del corte para el enfriamiento. Esto debido a que se tiene un módulo más alto en bajas temperaturas. En contraste, las fuerzas verticales disminuyen cuando se enfría la pieza. Esto debido a que al enfriar la pieza permite que menos material fluya por debajo de la superficie de salida de la herramienta. Menores fuerzas verticales son benéficas para mantener la estabilidad del corte teniendo

una mejor superficie maquinada, ya que la herramienta tiene un pequeño ángulo el cual resulta en poca rigidez de la herramienta.

En temperatura ambiente el elastómero es más flexible y más fácil de fluir en la superficie de la salida de la herramienta, generando mayores fuerzas, la fluctuación de las fuerzas ocurre como resultado del proceso de acumulación y liberación de la energía interna durante el corte.

A continuación en las Figuras 3B a la 7B se muestran los resultados obtenidos de la experimentación.

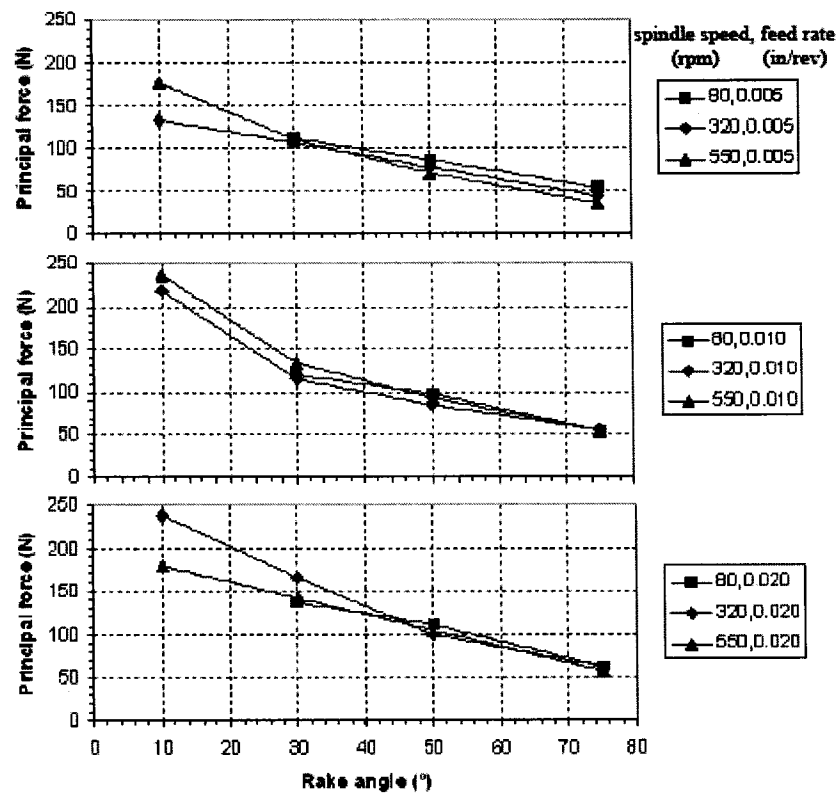


Figura 3B. Fuerzas Principales en función del ángulo de ataque para varias condiciones de corte [Yan et al; 2006]

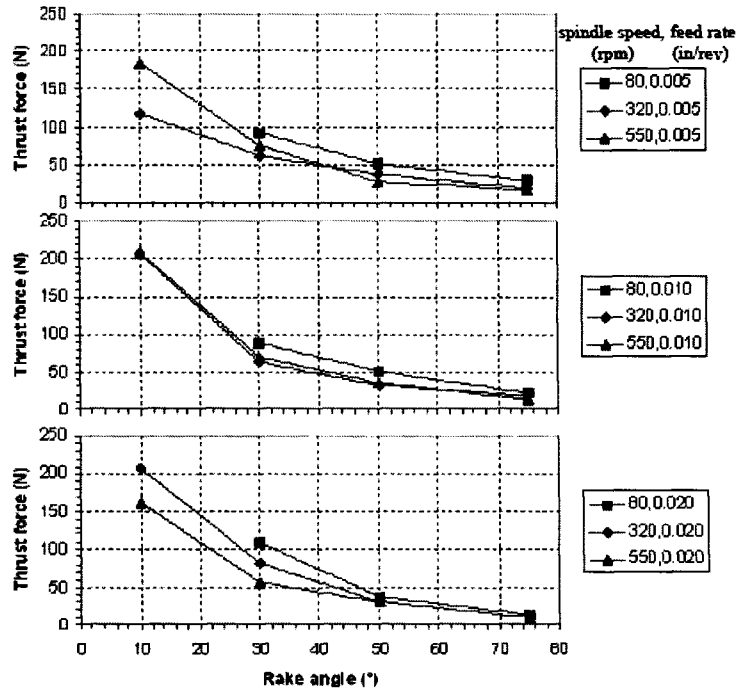


Figura 4B. Fuerzas de Reacción en función del ángulo de ataque para varias condiciones de corte [Yan et al; 2006]

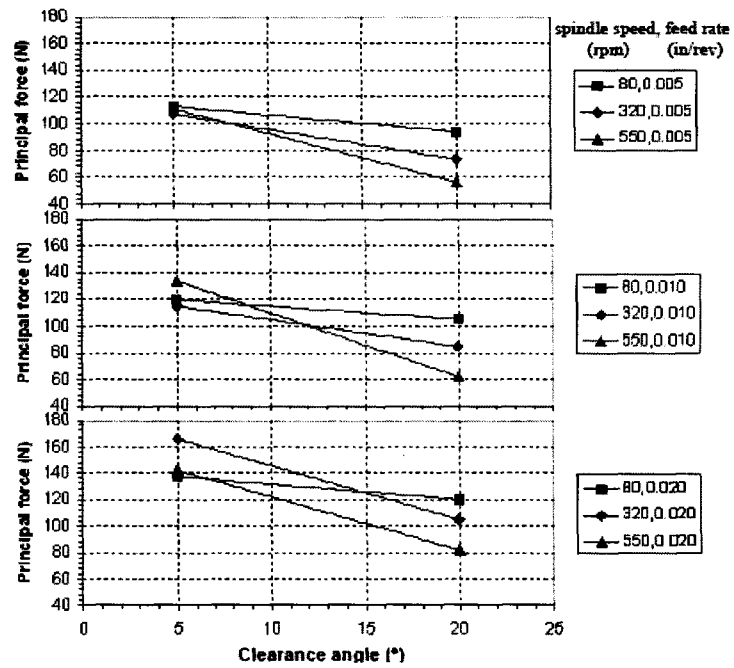


Figura 5B. Fuerzas Principales en función del ángulo de desahogo para varias condiciones de corte [Yan et al; 2006]

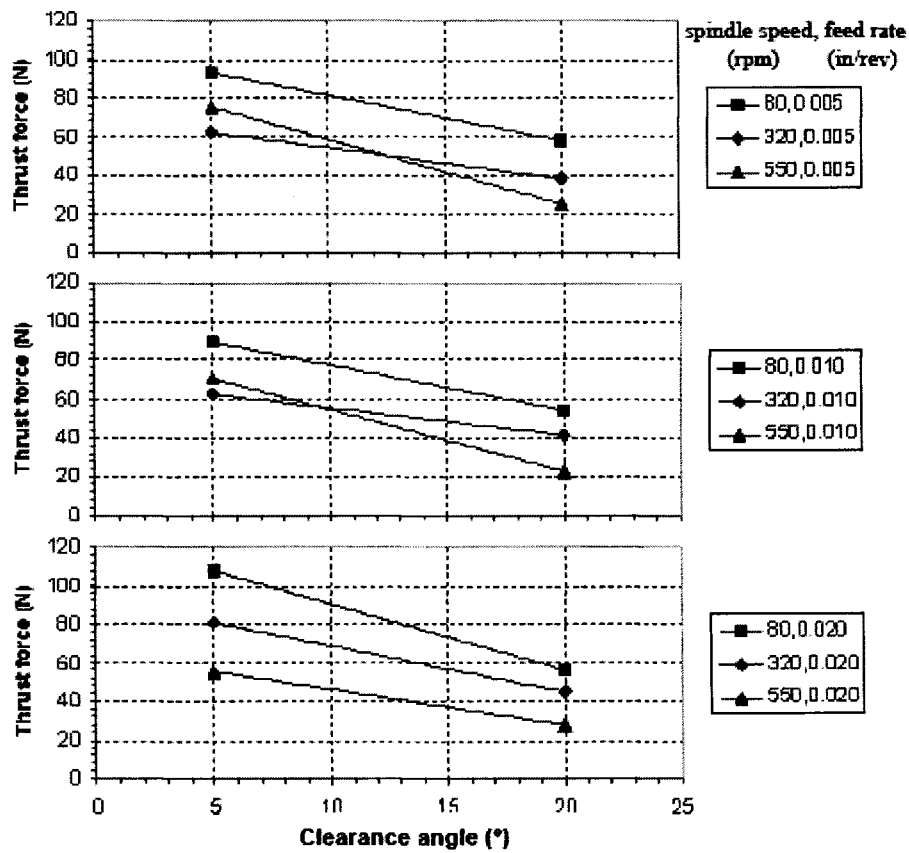


Figura 6B. Fuerzas de Reacción en función del ángulo de desahogo para varias condiciones de corte [Yan et al; 2006]

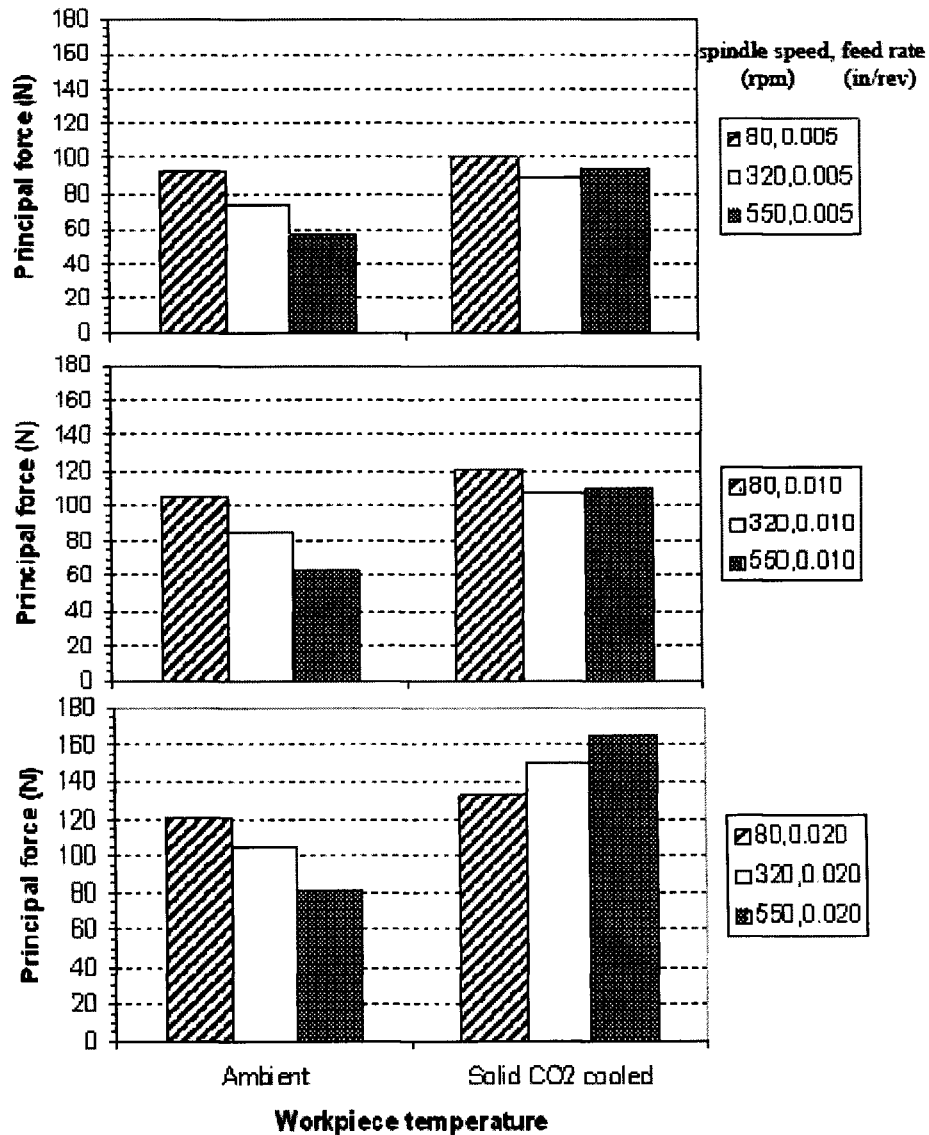


Figura 7B. Fuerzas de corte en los diferentes parámetros, [Yan, 2006]

El ángulo de ataque tiene la mayor influencia en la calidad superficial, disminuyendo la rugosidad al incrementar el ángulo de ataque. La velocidad de corte y el avance no tiene un efecto significate en la calidad superficial. Una baja rigidez del elastómero contribuye a una superficie rugosa, en la Figura 8B se muestran los resultados de rugosidad de esta investigación.

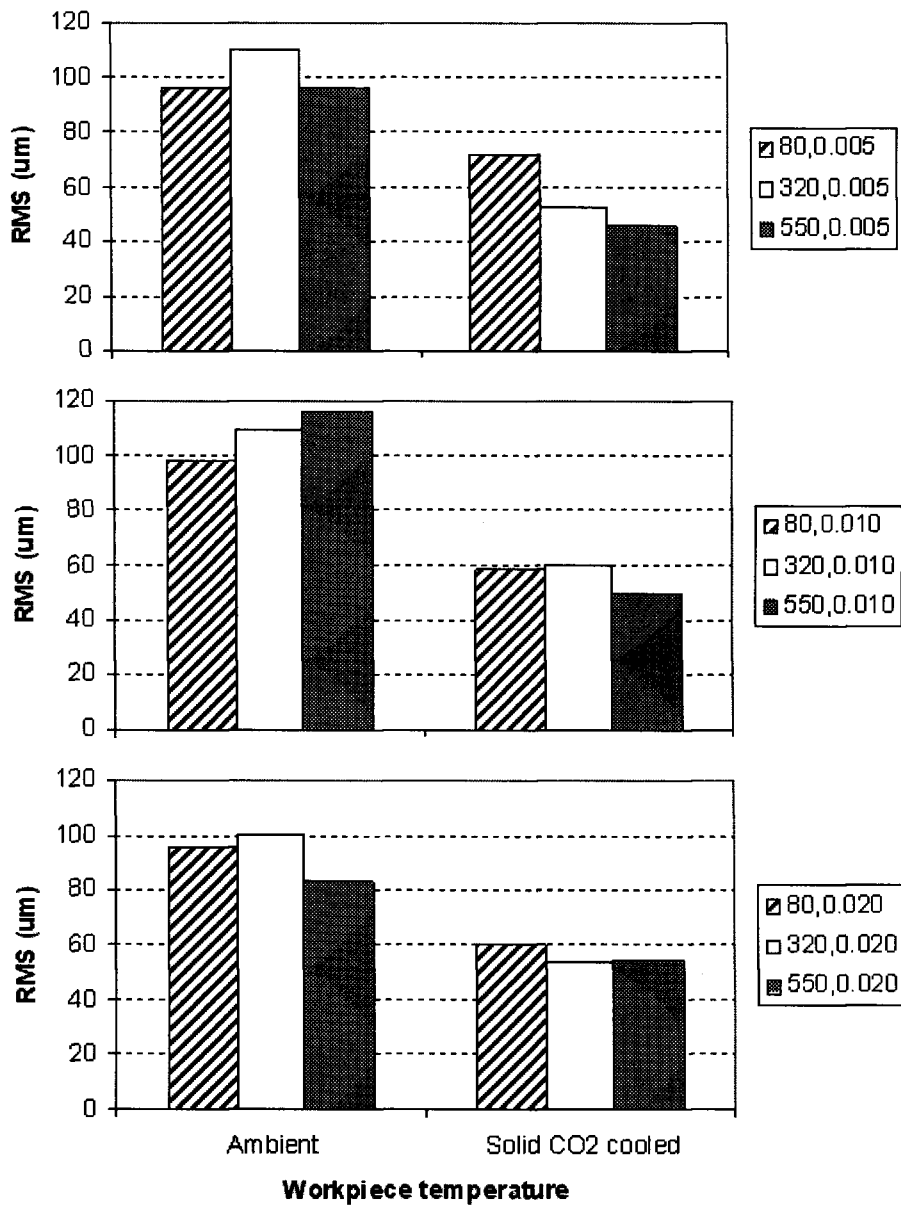


Figura 8B. Evolución de las rugosidades en los diferentes parámetros de corte, [Yan, 2006]

El elastómero tiene una baja temperatura de fusión y capacidad térmica. El calor generado durante el maquinado puede deteriorar las propiedades mecánicas y afectar dramáticamente el proceso de maquinado. Existen dos fuentes de calor que pueden aparecer en el maquinado. Una es el calor generado por fricción entre la superficie de ataque de la herramienta

y la pieza de trabajo, y la otra es la histéresis del elastómero durante el ciclo de carga.

Toscano; 2010. Realizó un estudio de la influencia de los parámetros de corte en la maquinabilidad de elastómeros, específicamente un SBR, dicha investigación se lleva a cabo en un torno CNC, con herramientas de corte con insertos intercambiables, a temperatura ambiente y en régimen de pre – enfriamiento por CO₂, recopila señales de fuerza de corte y temperatura, y evalúa dichas fuerzas, el desgaste de la herramienta y la calidad superficial de la pieza. Sus parámetros de corte son:

Velocidad de corte = 400 y 600 m/min

Avance = 0.025 y 0.05 mm/rev

A continuación en las Figuras 9B a la 12B se muestran los resultados obtenidos de la experimentación.

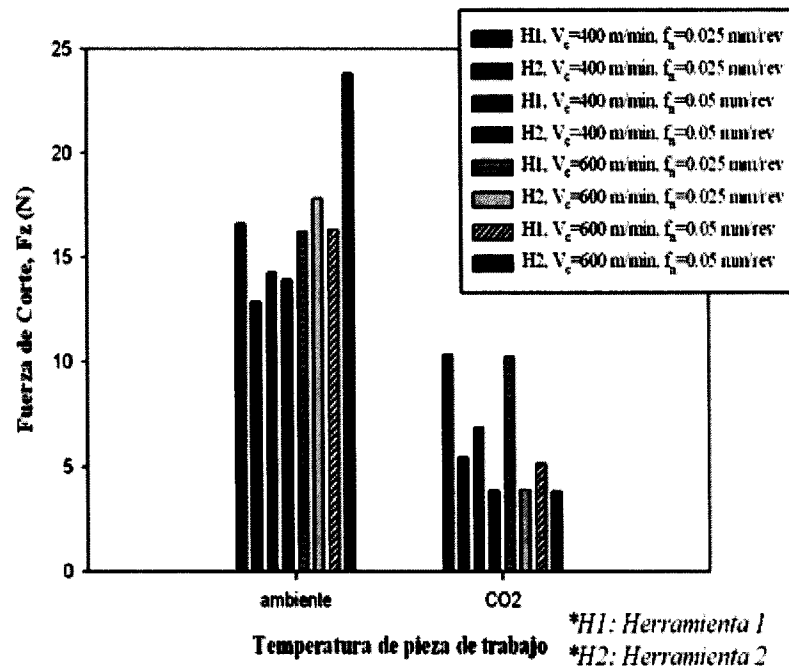


Figura 9B. Evolución de las fuerzas de corte del proceso [Toscano, 2010]

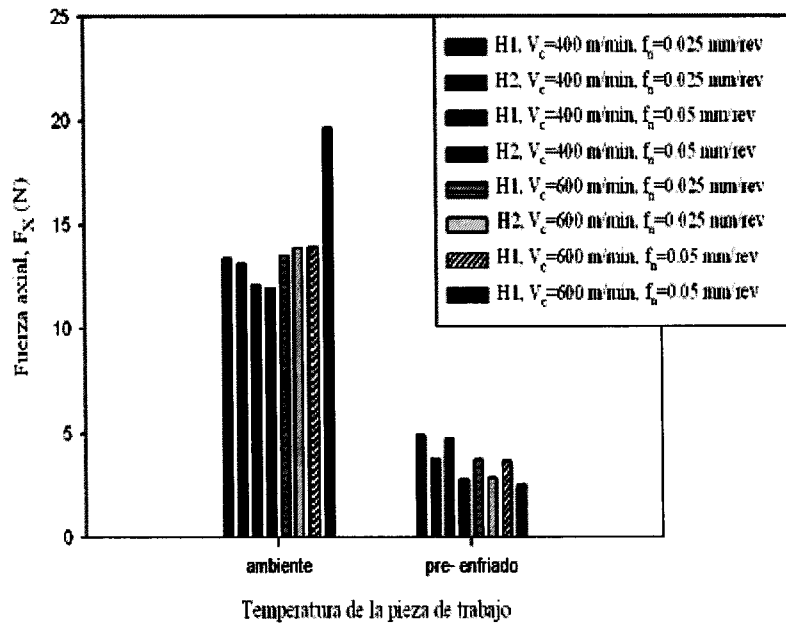


Figura 10B. Fuerza Axial del proceso, [Toscano, 2010]

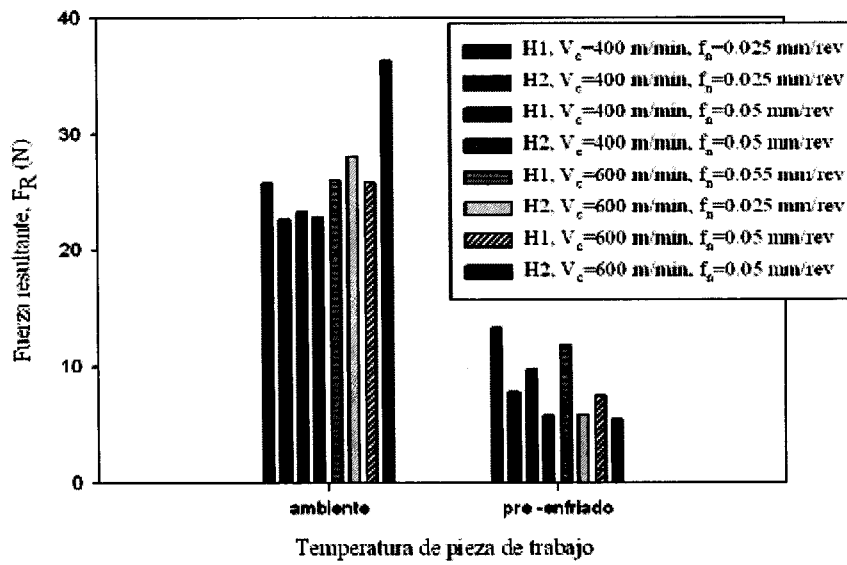


Figura 11B. Fuerza Resultante del proceso, [Toscano, 2010]

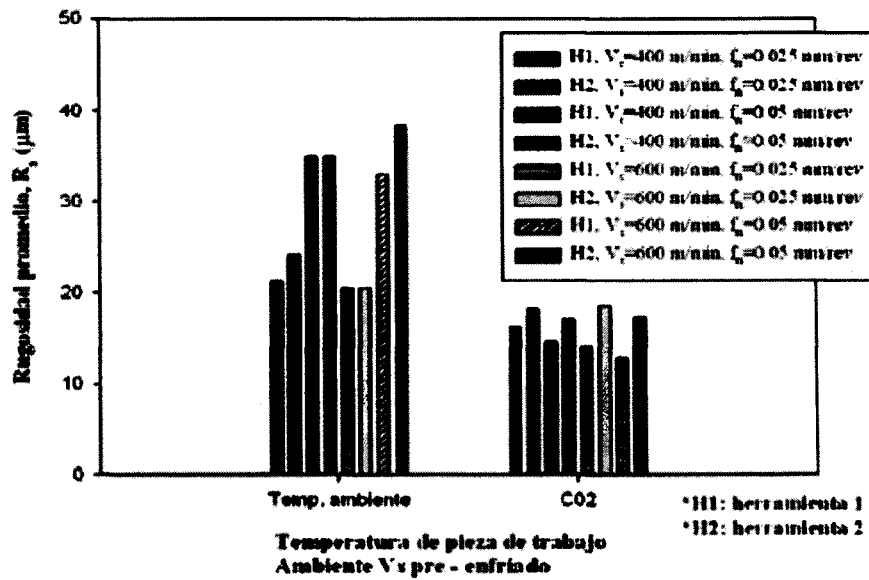


Figura 12B. Evolución de las rugosidades promedio de las piezas de trabajo [Toscano, 2010]

Los resultados de este trabajo de investigación han demostrado que en régimen de pre-enfriamiento con parámetros calibrados previamente y el uso de herramientas de corte con ángulos negativos, el acabado superficial de las piezas maquinadas mejora considerablemente.

Lewis; 2002. Presentó un estudio enfocado en el fresado de elastómeros utilizando un enfriamiento de la pieza por CO₂. Registra las fuerzas de corte en el proceso, y utiliza un modelo para clasificar el acabado en las ranuras maquinadas en el elastómero.

Utilizo herramientas de acero para Madera, con ángulos de hélices: 30°, 21°, 25°, 32°, nariz redondeada. Los parámetros de corte son RPM: 2900, 4200 y 5500 para el avance por revolución: 2.12, 6.35, 10.6 y 14.8 mm/s.

Concluye que el bajo módulo de elasticidad de los elastómeros contribuye al alto porcentaje de elongación antes de la fractura. También demuestran un fenómeno de histéresis significativa que contribuye a la habilidad para absorber energía.

El factor de Poisson del elastómero es de 0.5, la escala más alta del Factor de Poisson y la respuesta de visco-elasticidad de los elastómeros demuestra que la flexibilidad del material es un reto en el maquinado. Al elongar el compuesto incrementa la resistencia según se aplica más carga. Una forma de desplazar la flexibilidad es incrementar su rigidez con enfriamiento criogénico. Una ventaja de los elastómeros es su bajo coeficiente de conductividad térmica (0.13 W/mK), Debido a esto pueden ser enfriados y mantener esas temperaturas por largos periodos de tiempo. Con una temperatura criogénica los elastómeros pueden ser maquinados en la fase de transición vítrea.

Para identificar los mecanismo que pueden guiar a un mecanizado efectivo del elastómero, la profundidad de corte se mantiene constante a 3.81 mm. La V_c y f_n son los parámetros más importantes para este estudio. La velocidad de husillo y el avance afecta directamente el grosor de la viruta que es retirada de la pieza de trabajo., la cual es relacionada a la fuerza de corte.

Investigando la relación de la fuerzas de corte y los parámetros de maquinado, menores fuerzas son benéficas para reducir la fricción entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte, reduciendo el calor generado y prolongando la vida de la herramienta.

En general, la formación de virutas en el maquinado se puede categorizar en: formas continuas, discontinuas o virutas aserradas. Se puede notar que varios tipos de virutas durante un fresado de acabado.

Se indica que existe una recuperación elástica del material durante el maquinado de elastómeros. En general, enfriando el elastómero se crean virutas ligeramente más largas. Bajo condiciones criogénicas el elastómero es más duro y requiere mayor fuerza de corte.

Rahman; 2003. Presenta un estudio del efecto de aire enfriado en el proceso de fresado evaluando la vida de la herramienta, el acabado superficial, las fuerzas de corte y la calidad de la viruta, todo esto en comparación con el uso de aire enfriado, el corte en seco e inundado en refrigerante. Realiza varios experimentos en un acero AISI P20, con los tres modos de lubricación antes mencionados; seco (CD), con refrigerante (CO) y aire enfriado (CA), analiza las virutas en el SEM y evalúa las fuerzas de corte con un dinamómetro. Esta investigación concluye diciendo que las fuerzas de corte aumentan cuando se maquina en seco y disminuyen con aire enfriado, el desgaste en la herramienta es menor que cuando se maquina con refrigerante. Las fuerzas obtenidas y la rugosidad se muestran en las siguientes figuras.

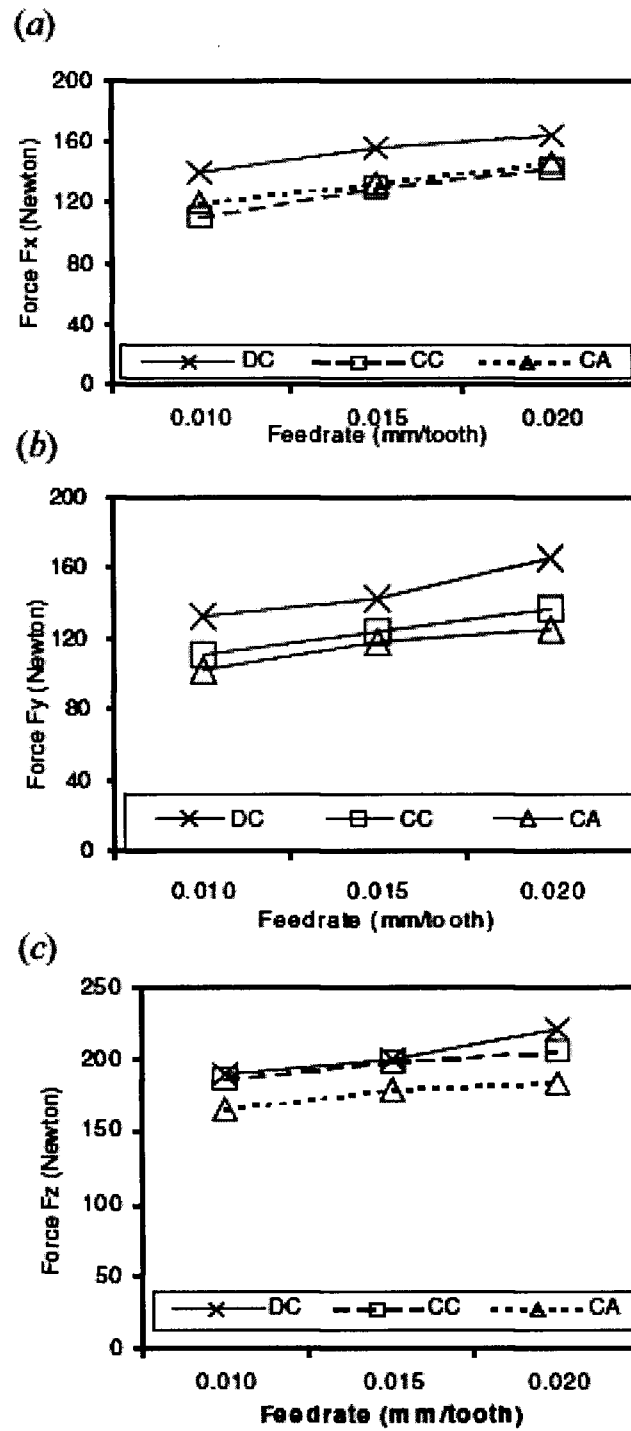


Figura 13B. Efecto del avance en la Fuerza (a) F_x , (b) F_y y (c) F_z , $a_p=0.35$ mm y $V=75$ m/min [Rhanman, 2003]

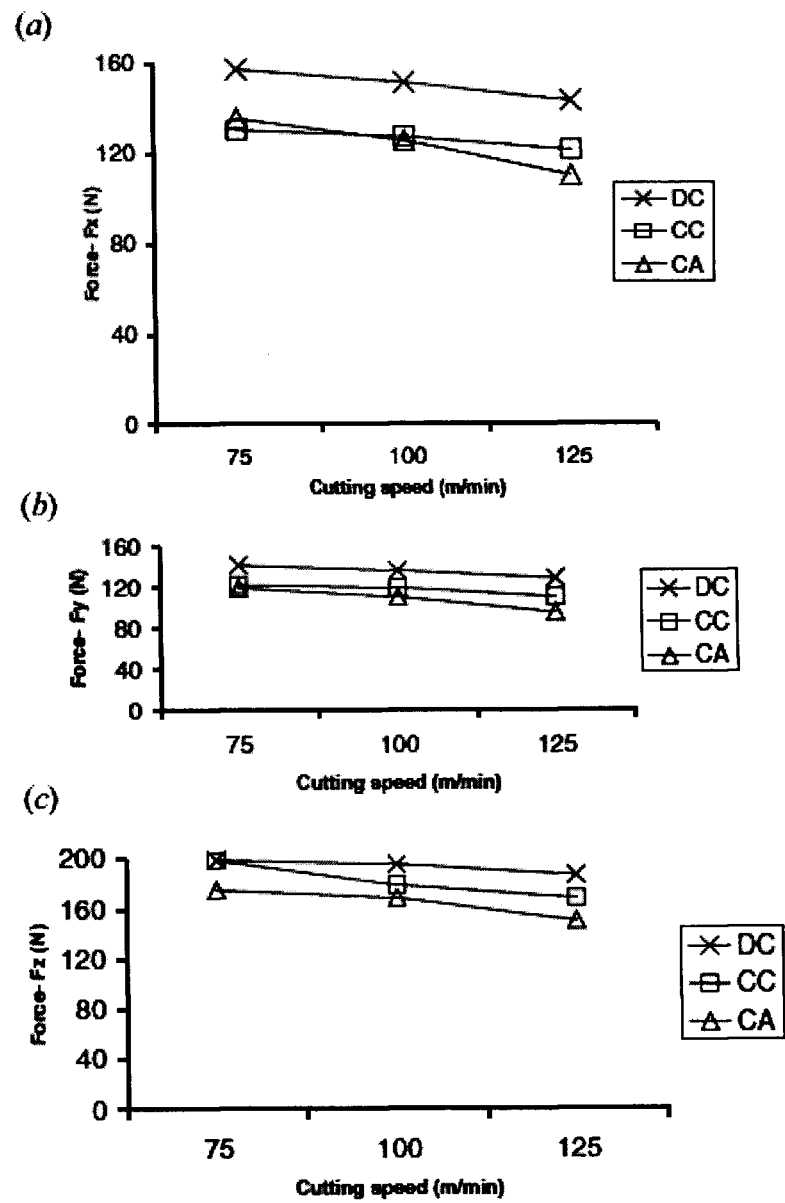


Figura 14B. Efecto de la Velocidad de Corte en la Fuerza (a) Fx, (b) Fy y (C) Fz, $a_p=0.35$ mm y $f_z=0.015$ m/diente [Rhanman, 2003]

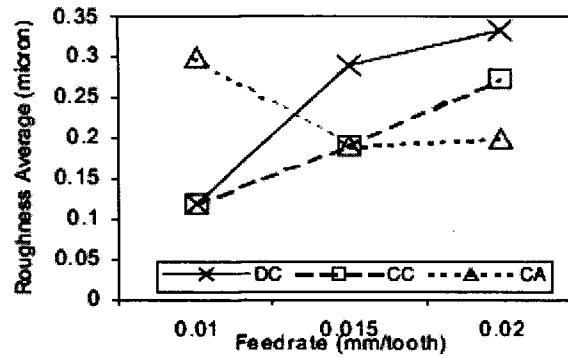


Figura 15B. Efecto del avance sobre la rugosidad promedio $a_p=0.35$ mm y $V=1225$ m/min [Rhanman, 2003].

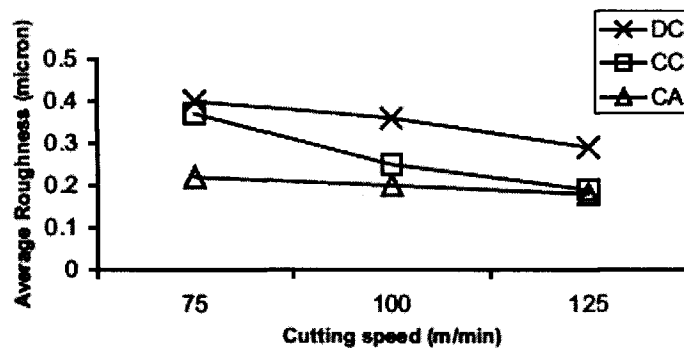


Figura 16B. Efecto de la Velocidad de Corte sobre la rugosidad promedio $a_p=0.35$ mm y $f_z=0.02$ mm/diente [Rhanman, 2003]

Dhokia et al; 2010. El estudio de esta investigación ilustra y demuestra un nuevo proceso para maquinado rápido de materiales elastoméricos en una máquina CNC usando la técnica de enfriamiento con nitrógeno líquido. El fenómeno de la formación de banda cortante adiabática también ha sido demostrada como resultado del proceso de maquinado en criogénico.

Para su investigación ha usado una fresadora CNC con dos boquillas que enfrían a -30°C , al maquinar se origina viruta la cual es observada en el SEM y a partir de aquí se determina cómo será la superficie de banda

cortante adiabática, la cual es un indicador para el proceso de maquinado en criogénico en CNC, la formación de esta banda es una región de la viruta donde las propiedades dúctiles del material maquinadas son excedidas y el calor generado no tiene suficiente tiempo para disiparse. Los materiales utilizados fueron Neopreno y EVA (Ethylene Vinyl Acetate). Por último, con este estudio se observa la degradación de la herramienta y cómo afecta la calidad en el acabado superficial usando esta técnica.

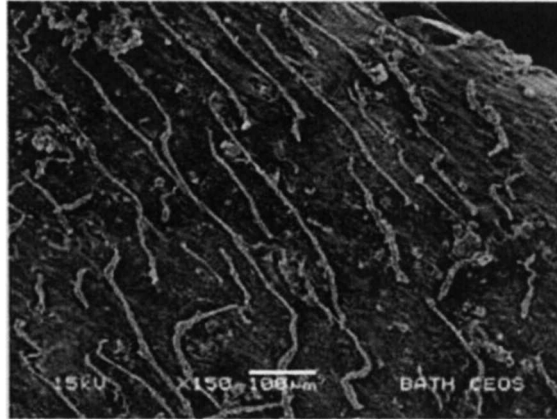


Figura 17B. Neopreno maquinado, ejemplo de viruta con banda cortante adiabática en la superficie [Dhokia, 2010]

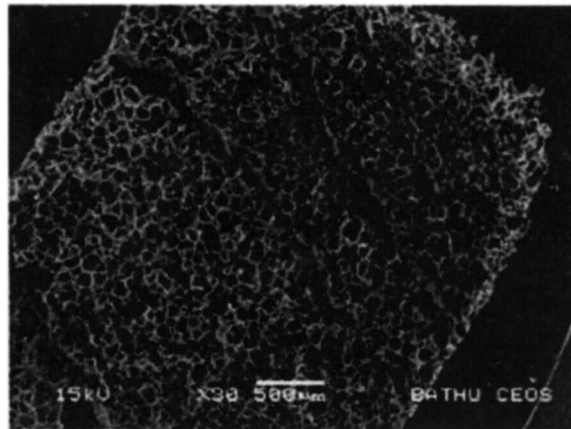


Figura 1B8. EVA maquinado, ejemplo de viruta con banda cortante adiabática en la superficie [Dhokia, 2010]

APÉNDICE C- Pruebas Mecánicas de SBR-1502 (Dureza y Tensión)

Se realizan cinco pruebas a tensión bajo la norma D-412, bajo las siguientes especificaciones, según la Tabla 1C:

Tabla 1C. Especificaciones de la Norma D-412 de ASME para pruebas de tensión uniaxial en probetas de elastómeros.

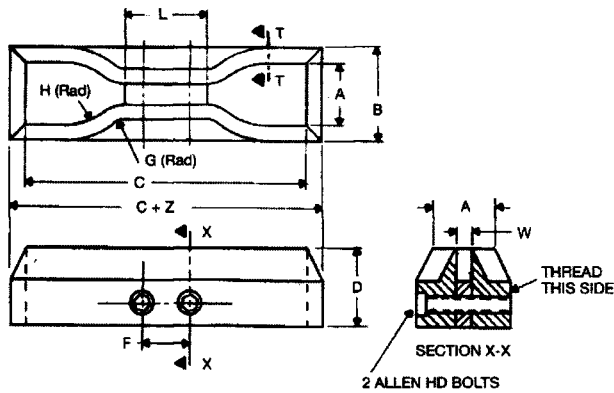


FIG. 2 Standard Dies for Cutting Dumbbell Specimens

Dimensions of Standard Dumbbell Dies ¹ (Metric Units)									
Dimension	Units	Tolerance	Die A	Die B	Die C	Die D	Die E	Die F	Die G
A	mm	±1	25	25	25	16	16	16	16
B	mm	max	40	40	40	30	30	30	30
C	mm	min	140	140	115	100	125	125	125
D-E	mm	±6 [#]	32	32	32	32	32	32	32
F	mm	±1	13	13	13	13	13	13	13
G	mm	±2	38	38	19	19	38	38	38
H	mm	±1	14	14	14	14	14	14	14
L	mm	±2	25	25	25	16	16	16	16
L	mm	±2	59	59	33	33	59	59	59
W	mm	±0.05, -0.00	12	6	6	3	3	6	6
Z	mm	±1	13	13	13	13	13	13	13

A continuación de la Figura 1C a la 5C, se muestran las gráficas de las probetas a temperatura ambiente:

Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502 500 mm/min (Eng)

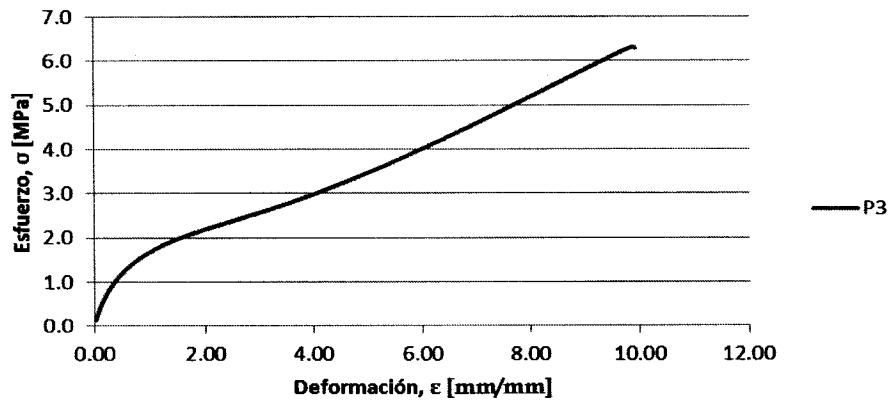


Figura 1C. Gráfica de la Prueba a Tensión SBR-1502 de la probeta P3 a Temperatura Ambiente.

Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502 500 mm/min (Eng)

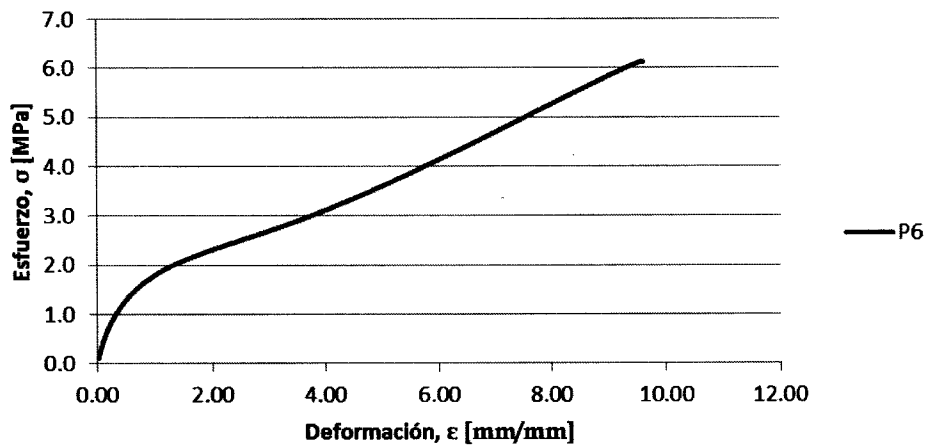


Figura 2C. Gráfica de la Prueba a Tensión SBR-1502 de la probeta P6 a Temperatura Ambiente.

Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502 500 mm/min (Eng)

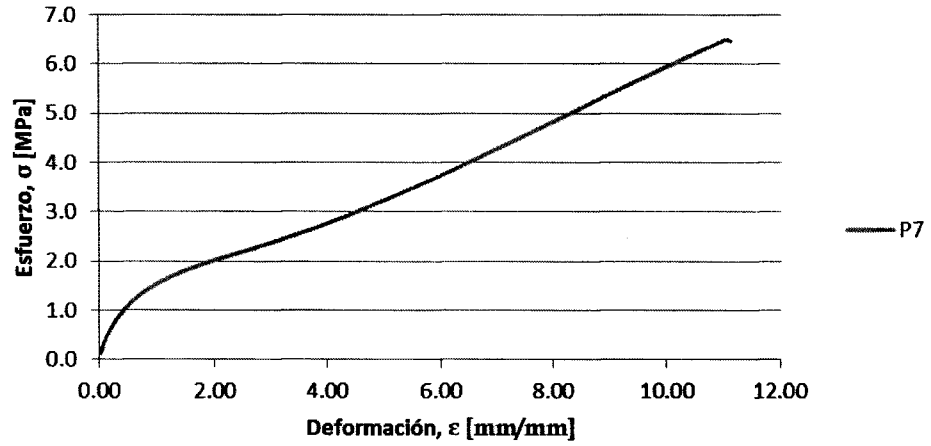


Figura 3C. Gráfica de la Prueba a Tensión SBR-1502 de la probeta P7 a Temperatura Ambiente.

Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502 500 mm/min (Eng)

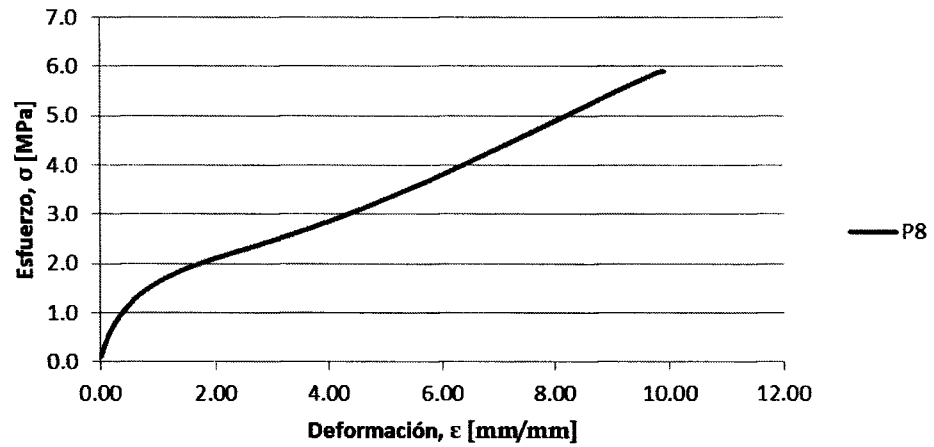


Figura 4C. Gráfica de la Prueba a Tensión SBR-1502 de la probeta P8 a Temperatura Ambiente.

Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502 500 mm/min (Eng)

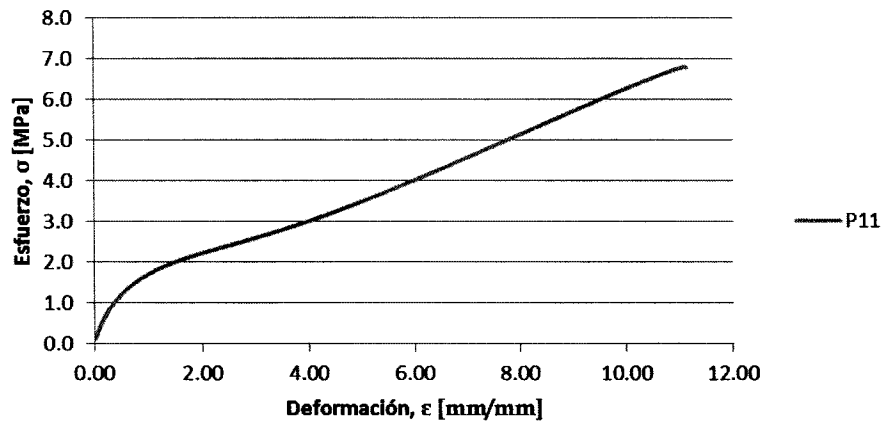


Figura 5C. Gráfica de la Prueba a Tensión SBR-1502 de la probeta P11 a Temperatura Ambiente.

A continuación de la Figura 6C a la 10C se muestran las gráficas de las probetas en régimen por enfriamiento con CO_2 :

Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502 500 mm/min (Eng) Régimen enfriado por CO_2

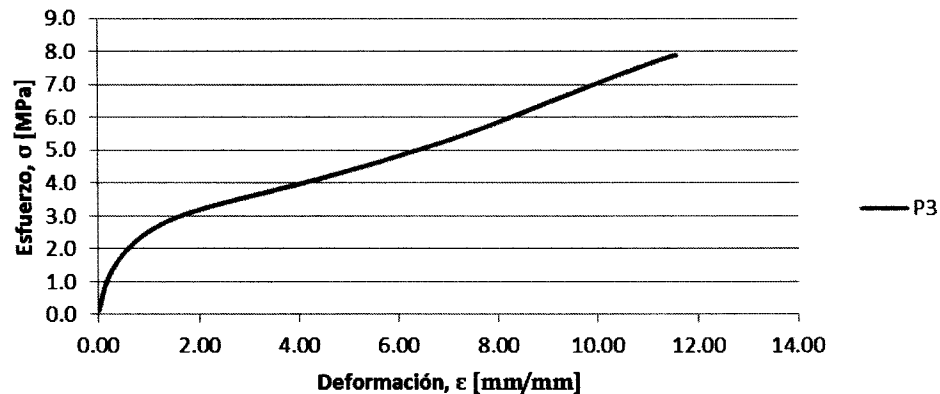


Figura 6C. Gráfica de la Prueba a Tensión SBR-1502 de la probeta P3 en régimen de enfriamiento por CO_2 .

**Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502
500 mm/min (Eng) Régimen enfriado por
CO₂**

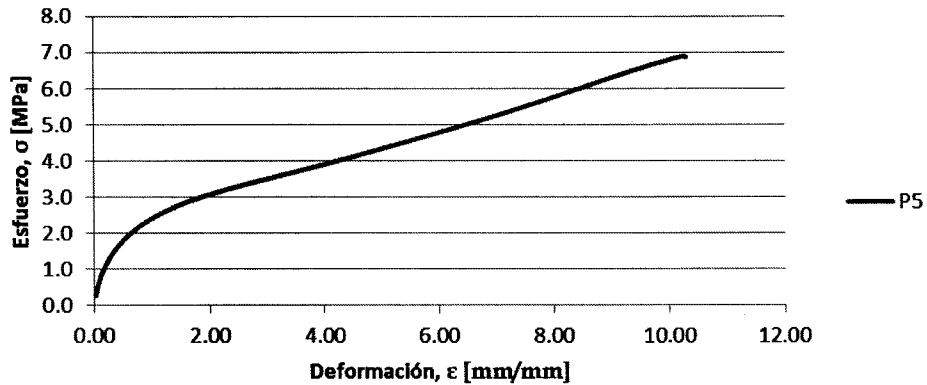


Figura 7C. Gráfica de la Prueba a Tensión SBR-1502 de la probeta P5 en régimen de enfriamiento por CO₂.

**Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502
500 mm/min (Eng) Régimen enfriado por
CO₂**

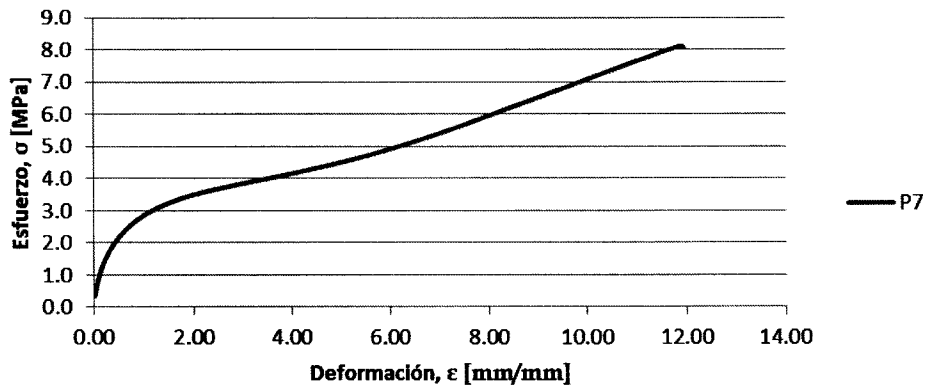


Figura 8C. Gráfica de la Prueba a Tensión SBR-1502 de la probeta P7 en régimen de enfriamiento por CO₂.

**Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502
500 mm/min (Eng) Régimen enfriado por
CO₂**

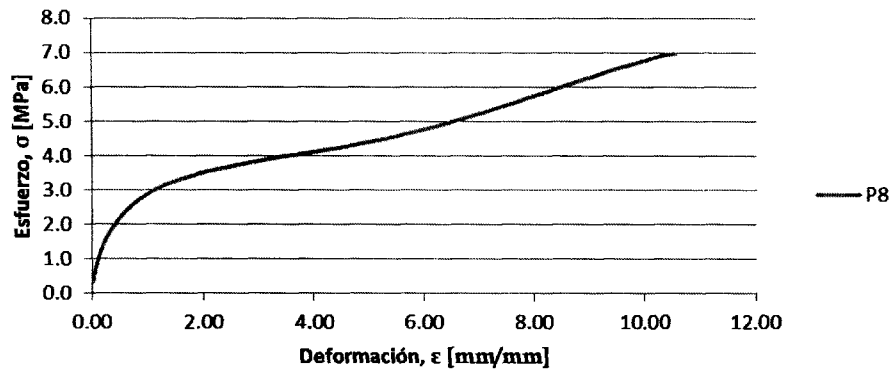


Figura 9C. Gráfica de la Prueba a Tensión SBR-1502 de la probeta P8 en régimen de enfriamiento por CO₂.

**Prueba Uniaxial de Tensión SBR-1502
500 mm/min (Eng) Régimen enfriado por
CO₂**

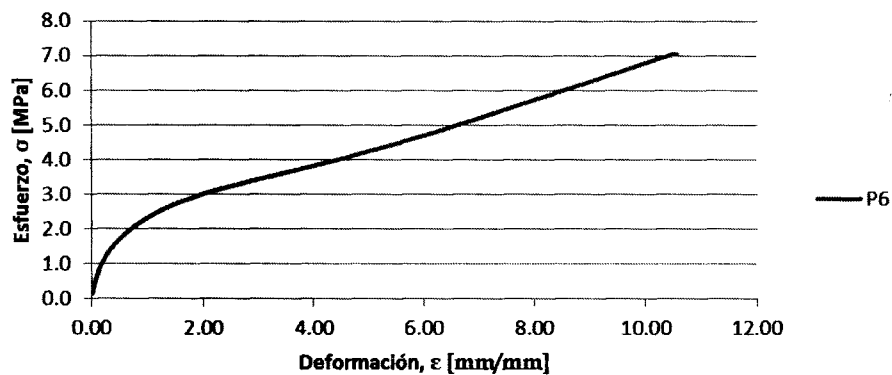



Figura 10C. Gráfica de la Prueba a Tensión SBR-1502 de la probeta P6 en régimen de enfriamiento por CO₂.

En la tabla 2C se presenta el resumen de las pruebas de dureza obtenidas en el material SBR. En esta tabla 2C se observa que la dureza para el material SBR-1502 es de 71 Shore A bajo la norma ASTM D2240:

Tabla 2C. Pruebas de Dureza del material SBR-1502

 Metalinspec® Laboratorio de Pruebas		Informe de Prueba No./ Test Report: MED-240-2010		Hoja/Page: 1																			
				De/Of: 1																			
Av. San Nicolas No. 119-A Col. Arboledas de San Jorge San Nicolas de los Garza N.L. C.P. 66465		Tel: 80578416 80578989 Fax: 80578417		Fecha de recepcion/ Date Entrance: 28/08/2010 Fecha de prueba/Test date: 31/08/2010 Fecha de emision/Issue: 01/09/2010																			
Cliente/Company: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Direccion/Address: Av. Eugenio Garza Sada Num 2501 Bar Col. Tecnológico C.P. 64849		Telefono/Phone: 8118006401 Atencion/Attention: Ing. Araceli Rivera Moreno		Entidad/Entrance: 574 Temp: 24.9 H.R: 55%																			
Prueba/Test: DUREZA ROCKWELL / HARDNESS ROCKWELL TEST TIME STANDARD Naturaleza/Material: HULE																							
Equipo Utilizado: Probador de Dureza Shore/ Marca: PTC/ Modelo 305L / Fecha de calibración: Junio-2010 / Trazabilidad/MSB Used Equipment: Hardness Tester Brand: PTC/ Model: Shore Type A/ Inspection Date: Jun-2010/ Traceability: MSB Las pruebas fueron realizadas de acuerdo con la especificación A.S.T.M. D2248, y el procedimiento interno COP-ML-99 The test were carrying out agree with A.S.T.M. D2248, and internal procedure COP-ML-99 LOS RESULTADOS REPORTADOS SON VALIDOS Y CONFIABLES PARA LAS CONDICIONES Y CARACTERISTICAS BAJA DE LAS QUE SE REALIZAN LAS PRUEBAS ESTE INFORME NO ES VALIDO SI PRESENTA ALTERACIONES O EMENDADURAS Y SIN LA CORRESPONDIENTE FIRMA DEL INGENIERO DE SERVICIO Y/O JEFE DE LABORATORIO Y NO PODRA SER REPRODUCIDO EN FORMA TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACION EXPRESA DE METALINSPEC LABORATORIOS, S.A. DE C.V. LOS RESULTADOS REPORTADOS SE REFIEREN UNICAMENTE A LAS MUESTRAS PROBADAS THE REPORTED RESULTS ARE ONLY WORTH AND RELIABLE FOR THE CONDITIONS AND CHARACTERISTICS UNDER WHICH THE TESTS WERE MADE THIS REPORT IS NOT WORTH IF IT PRESENTS ALTERATIONS AND WITHOUT THE CORRESPONDING SIGNATURE OF THE ENGINEER SERVICE AND/OR TEST LAB CHIEF AND WILL NOT BE REPRODUCED IN TOTAL OR PARTIAL FORM WITHOUT THE EXPRESS AUTHORIZATION OF METALINSPEC LABORATORIOS, S.A. DE C.V. THE REPORTED RESULTS ONLY TALK ABOUT THE PROVEN SAMPLES																							
Resultados de Prueba/ Test Results																							
<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Sample Number</th> <th colspan="5">Measurements Shore A</th> <th rowspan="2">Prom.</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>72</td> <td>70</td> <td>69</td> <td>70</td> <td>72</td> <td>71</td> </tr> </tbody> </table>					Sample Number	Measurements Shore A					Prom.	1	2	3	4	5	1	72	70	69	70	72	71
Sample Number	Measurements Shore A					Prom.																	
	1	2	3	4	5																		
1	72	70	69	70	72	71																	
Realiza/Made: Heriberto Nolas Ingeniero de Servicio/ Service Engineer			Revisor/ Review: Raymundo Gonzalez Jefe de Laboratorio de Pruebas / Test Laboratory Chief																				

COP-ML-76

A continuación en la Figura 11C (a) y 11C (b) se presentan los resultados del análisis DRIFT (diffuse reflectance infrared Fourier transform) del material SBR-1502:

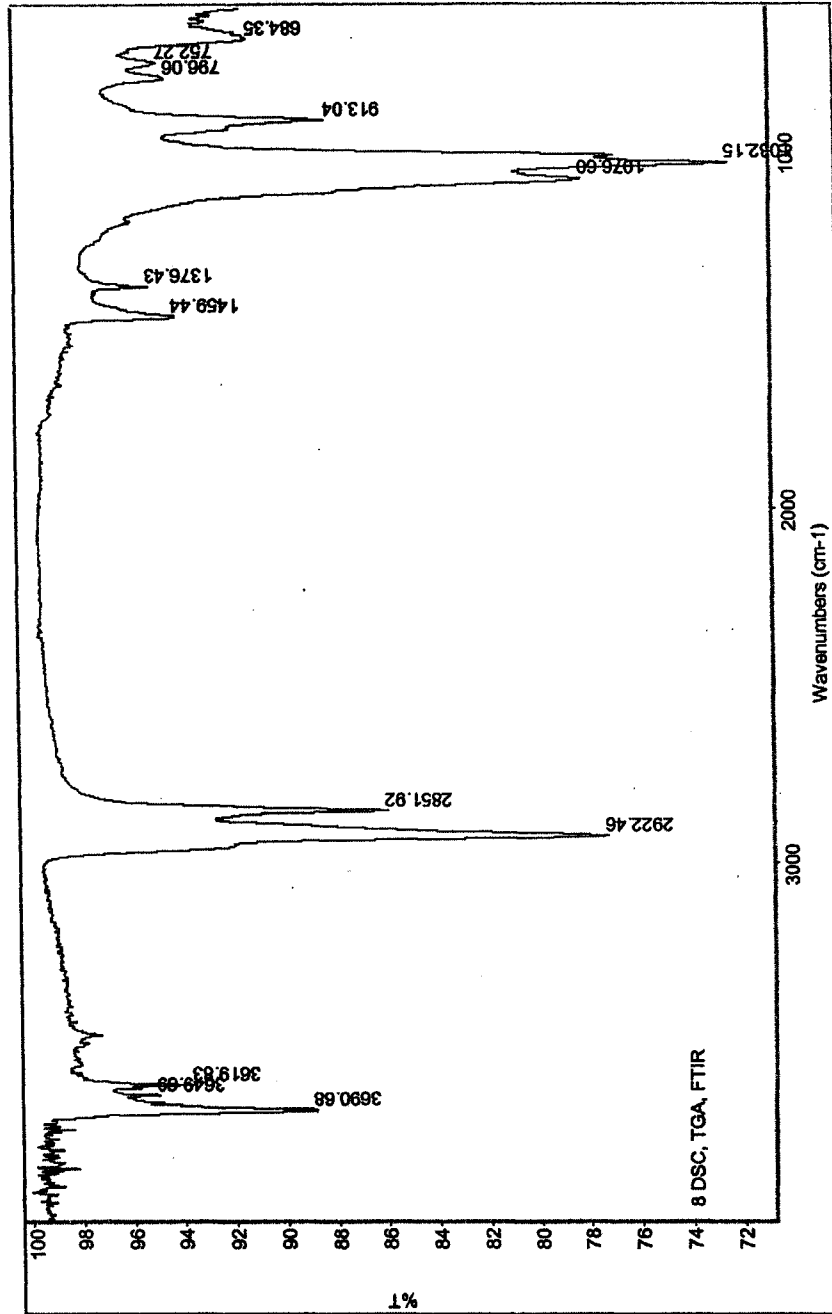


Figura 11C (a). Gráfica de la Prueba DRIFT del material SBR-1502.

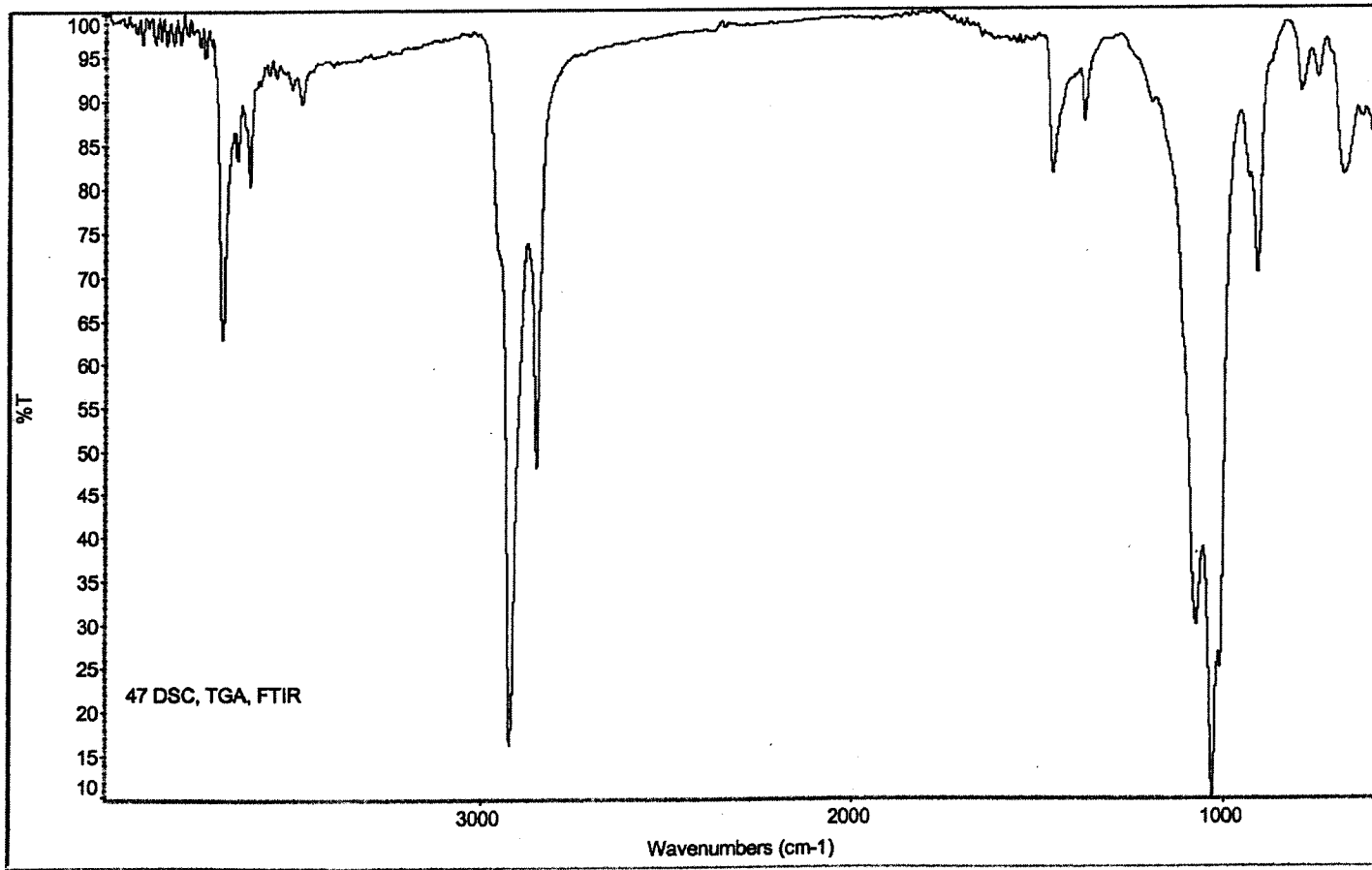


Figura 11C (b). Gráfica de la Prueba DFRIFT del material SBR-1502.

APÉNDICE D- Instrumentación experimental

El equipo utilizado para la medición de fuerzas es:

3-Component Dynamometer F_x, F_y, F_z (Figura 1D)

Modelo: 9257B

Marca: Kistler

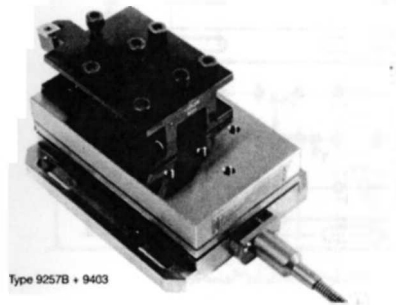
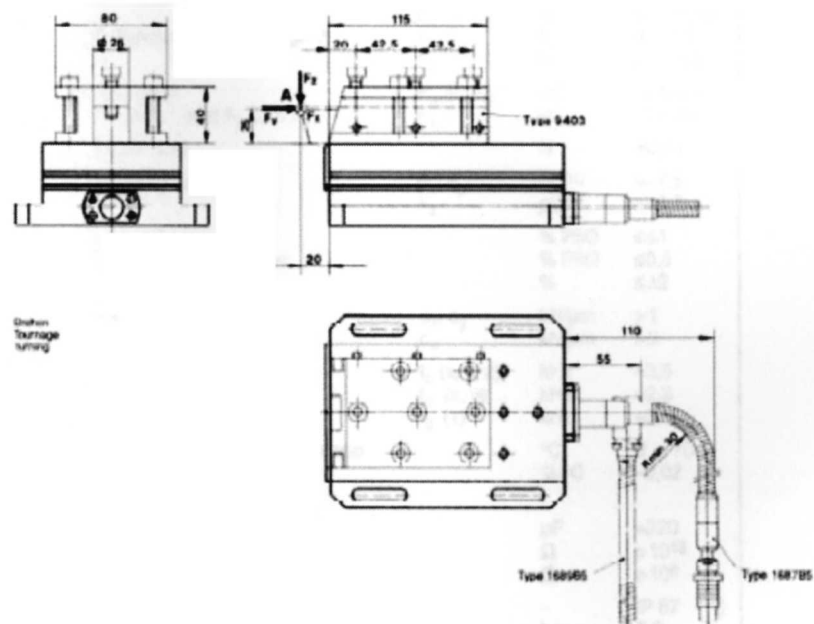


Figura 1D. Montaje de Dinamómetro piezo-eléctrico Kistler con porta herramienta para torno.

En la Figura 2D se muestran las mediciones del Dinamómetro usado durante la experimentación y en la Tabla 1D se observan las especificaciones de sensibilidad y capacidad del dinamómetro.



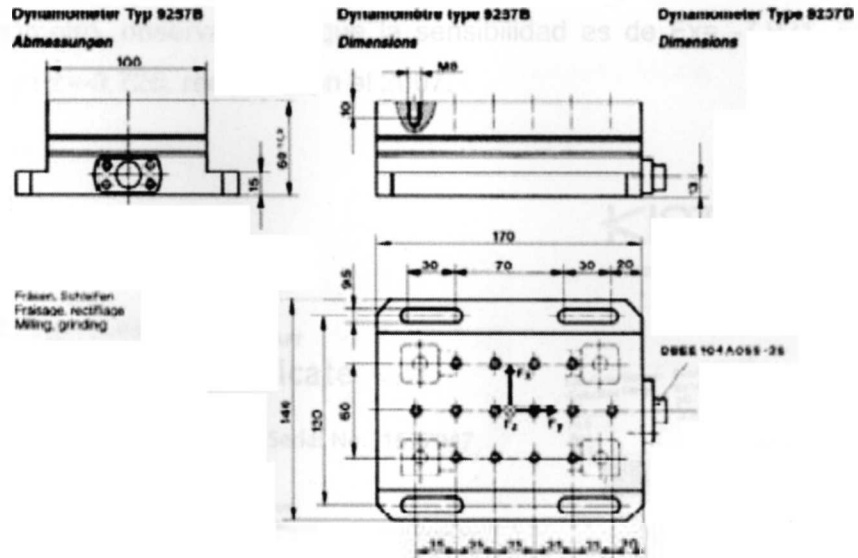


Figura 2D. Dimensiones de dinamómetro.

Tabla 1D. Datos técnicos de Dinamómetro.

Technical Data			
Range	F_x, F_y, F_z	kN	-5 ... 5 (*)
	F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	kN	-5 ... 10 (**)
Calibrated partial range 1	F_x, F_y	N	0 ... 500
	F_z	N	0 ... 1000
Calibrated partial range 2	F_x, F_y	N	0 ... 50
	F_z	N	0 ... 100
Overload	F_x, F_y, F_z	kN	-7,5/7,5
	F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	kN	-7,5/15
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	$\approx -7,5$
	F_z	pC/N	$\approx -3,7$
Linearity, all ranges		% FSO	$\leq \pm 1$
Hysteresis, all ranges		% FSO	$\leq 0,5$
Cross talk		%	$\leq \pm 2$
Rigidity	C_x, C_y	kN/ μ m	>1
	C_z	kN/ μ m	>2
Natural frequency	$f_0(x, y, z)$	kHz	$\approx 3,5$
Natural frequency (mounted on flanges)	$f_0(x, y)$	kHz	$\approx 2,3$
	$f_0(z)$	kHz	$\approx 3,5$
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Temperature coefficient of sensitivity		%/°C	-0,02
Capacitance (of channel)		pF	≈ 220
Insulation resistance (20 °C)		Ω	$> 10^{13}$
Ground insulation		Ω	$> 10^8$
Protection class			IP 67 (***)
Weight		kg	7,3

A continuación en la Figura 3D se muestra la hoja de calibración del dinamómetro, observándose que la sensibilidad es de $F_x = -7.921$, $F_y = -7.935$ y $F_z = -3.725$, realizada en el 2007.

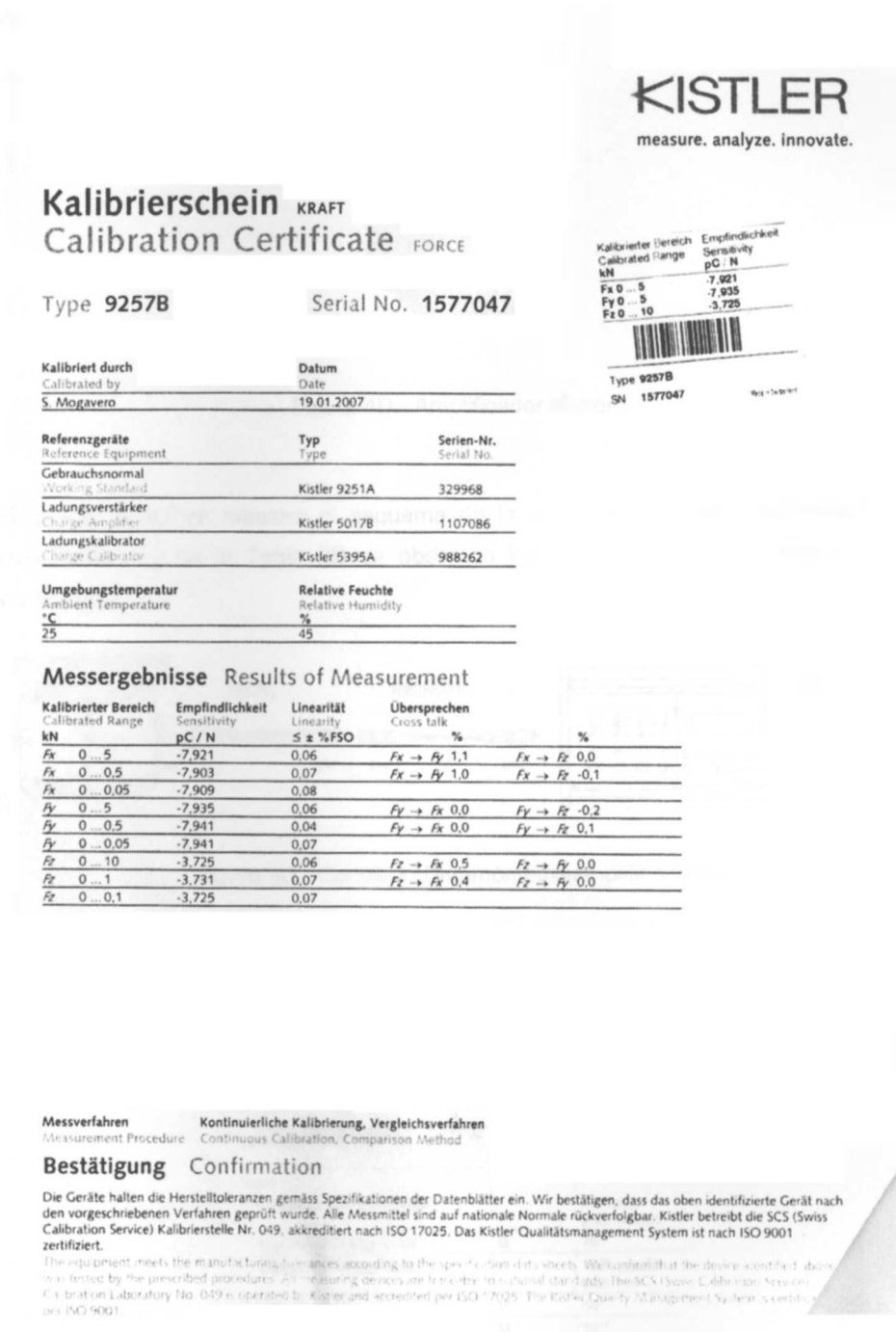


Figura 3D. Especificaciones de la última calibración de Dinamómetro.

Amplificadores de carga (Figura 4D):
Dual Mode Charge Amplifier with Piezotron Operating Mode.
Modelo: 5010B
Marca: Kistler



Figura 4D. Amplificador Kistler.

En la Figura 5D se muestra el esquema de la conexión entre el dinamómetro y el amplificador, y en la Tabla 2D se observan las medidas correspondientes para el amplificador.

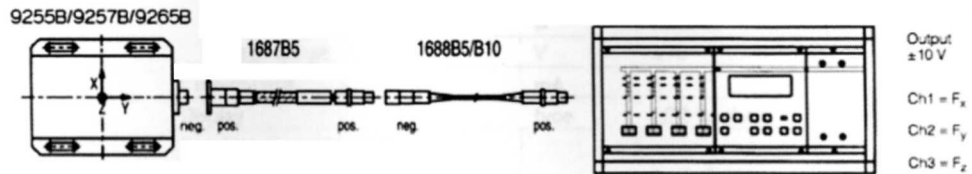


Figura 5D. Conexión Dinamómetro-amplificadores.

Tabla 2. Datos técnicos amplificadores Kistler.

Technical Data		
Type	Unit	5010B...
Measurement Range	pC	±10 ... 999 000
Scale Settings 1,2,3,4,5 sequence	MU/V ²¹	0 0000 10000000
Sensor Sensitivity	pC/MU	0.01 ... 9990
	mV/MU	0.01 ... 9990
input:		
Connector Charge, Voltage		BNC neg., gnd. isolated
Impedance Charge Mode	Ω	70
Impedance Voltage Mode	Ω	100k parallel with 1 nF
Voltage max.	V	50
Insulation Resistance at Input	Ω	10 ¹⁴
Sensor Power Voltage Mode	mA	4 (2 ... 18 optional)

Technical Data

Type	Unit	5010B...
Frequency Response: Standard filter, Type 5311 (3dB)	Hz	180, 000
Accuracy	%	≤ ± 0.50
Time Constant (range dependent):		
Long	s	0 ... 100000
Medium	s	1 ... 10000
Short	s	0.01 ... 100
Time Constant Resistor:		
Long	Ω	>114
Medium	Ω	111
Short	Ω	19
Noise:		
referred to with input shield	pC _{rms}	0.0036
1 pC/V max. ⁽²⁾	μV _{rms}	500
100 pC/V typical ⁽²⁾	μV _{rms}	300
100000 pC/V typical ⁽²⁾	μV _{rms}	200
Drift MOSFET leakage current	pC/s	<±0.03
Zero Offset in Reset typical	mV	0.50
Output:		
Connector		BNC neg., gnd. isolated
Impedance	Ω	100
Voltage Range	V	±10
Current limit	mA	5
Display	type	LCD 16 chars.
Serial Interface (RS-232C)		
Connector		9 pin D-Sub.
Baud Rates		150 ... 9600
Maximum Cable Length	m/ft	20/65 (2500pF)
Remote Control Connector		
		DIN 45322 6-pol neg.
Temperature Range Operating	°F	32 ... 122
Temperature Range Storage	°F	-4 ... 158
Humidity Non-condensing	%	10 ... 90
Power Line:		
Voltage	VAC	89 ... 135
Frequency	Hz	48 ... 62
Power Consumption max.	VA	14
Weight without case	lb	2.8
Dimensions without case	in	2.8 x 5.1 x 7.25

(1) MU = mechanical unit (e.g., psi, lb, g, etc)

(2) Referred to output with input shielded

Sistema de Adquisición de Datos e Instrumentación Virtual

Bloque conector para entradas BNC. (Figura 6D)

Modelo: BNC-2120

Marca: National Instruments

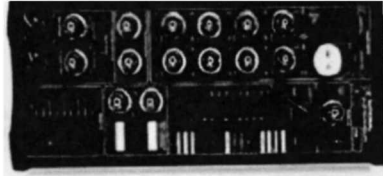


Figura 6D. Bloque conector BNC-2120.

En la Tabla 3D se muestran las especificaciones técnicas del Bloque conector 2120.

Tabla 3D. Datos técnicos Bloque conector 2120.

Parámetros	Equivalencia.
Numero de Canales	8 conectores BNC
Switches:	
Floating source/grounded source:	8
Fuente de Alimentación:	+5 VDC (5%), 200 mA que provee cualquier sistema DAQ.
Dimensiones:	26.7 cm x 11.2 cm x 5.97 cm
I/O connector	68 pines macho SCSI-II
BNC conectores	15
Temperatura de operación	0 a 50 °C

Para la configuración de señales referenciadas a tierra, se utilizó el circuito del bloque conector para una mejor lectura, mostrado en la Figura 7D.

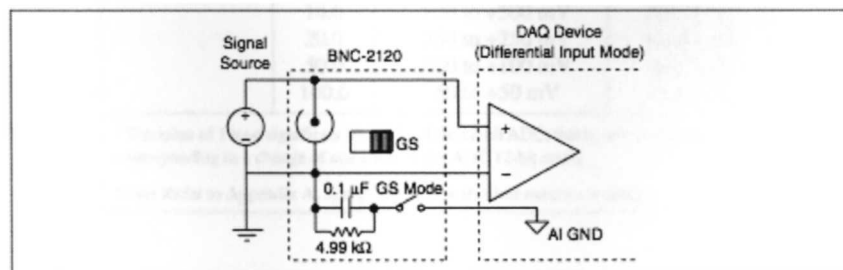


Figura 7D. Circuito para referencias a tierra.

Tarjeta de adquisición de datos (Figura 8D)
 Modelo: *DaqCard-6062E*
 Marca: *National Instruments*



Figura 8D. DaqCard 6062E.

En la Tabla 4D se observan las características de la Tarjeta de Adquisición de Datos 6062-E.

Tabla 4D. Características generales, DaqCard 6062-E.

Range Configuration	Gain	Actual Input Range	Resolution ¹
0 to +10 V	1.0	0 to +10 V	2.44 mV
	2.0	0 to +5 V	1.22 mV
	5.0	0 to +2 V	488.28 μ V
	10.0	0 to +1 V	244.14 μ V
	20.0	0 to +500 mV	122.07 μ V
	50.0	0 to +200 mV	48.83 μ V
	100.0	0 to +100 mV	24.41 μ V
-5 to +5 V	0.5	-10 to +10 V	4.88 mV
	1.0	-5 to +5 V	2.44 mV
	2.0	-2.5 to +2.5 V	1.22 mV
	5.0	-1 to +1 V	488.28 μ V
	10.0	-500 to +500 mV	244.14 μ V
	20.0	-250 to +250 mV	122.07 μ V
	50.0	-100 to +100 mV	48.83 μ V
100.0	-50 to +50 mV	24.41 μ V	

¹ The value of 1 least significant bit (LSB) of the 12-bit ADC; that is, the voltage increment corresponding to a change of one count in the ADC 12-bit count.

Note: Refer to Appendix A, Specifications, for absolute maximum ratings.

Diseño de la sujeción de la pieza de trabajo

A continuación en la Figura 9D se muestra un esquema del diseño que se realizó para el sistema de sujeción de la pieza de trabajo.

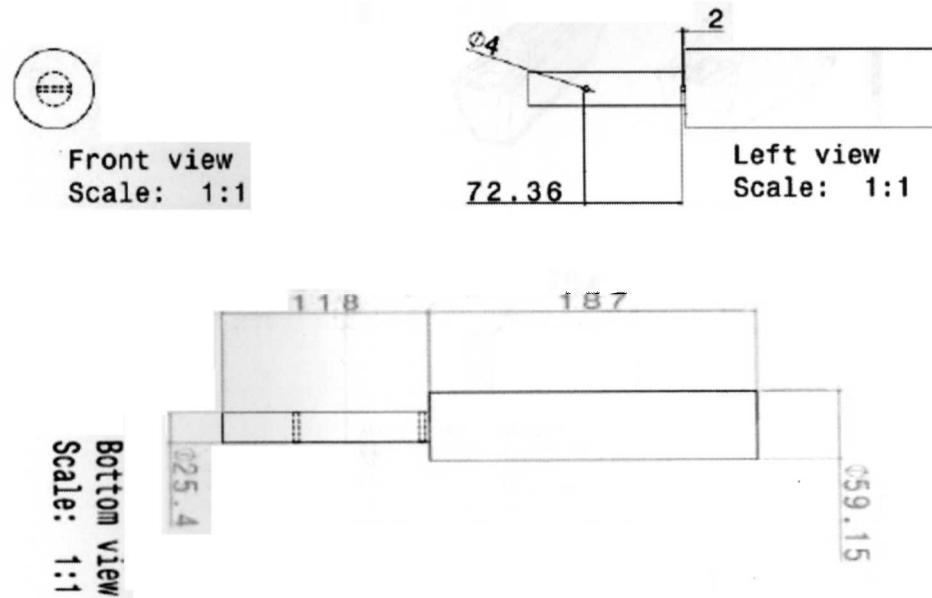


Figura 9D. Diseño de sujeción.

Herramienta de Corte

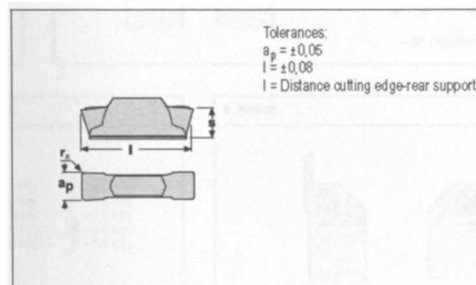
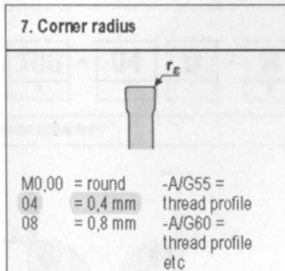
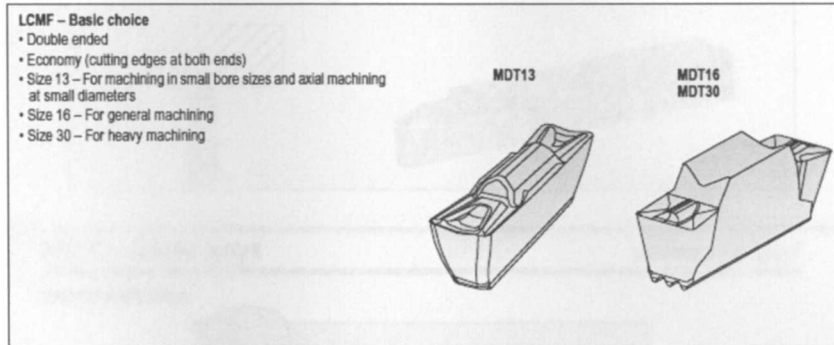
A continuación se muestra la herramienta de corte con la que se realizó la experimentación en este trabajo de investigación, la cual consta de un inserto y un porta-inserto.

Inserto (Figura 10D)

LCMF 160404 – 0400 – MT TP200

MDT – Inserts

SECO

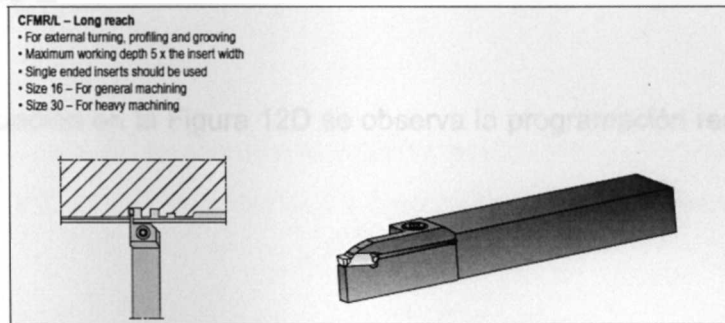


Size	Dimensions in mm			
	a_p	l	s	r_c
mm-version				
1603	3,00	15,90	$4,50 \pm 0,05$	0,2-0,4
1604	4,00	15,90	$4,50 \pm 0,05$	0,2-0,8
1605	5,00	15,90	$4,50 \pm 0,05$	0,4-0,8
1606	6,00	15,90	$4,50 \pm 0,05$	0,4-1,0

Figura 10D. Características generales de inserto.


Portainsero (Figura 11D)

CFMR 075 04B



MDT - Code keys SECO *carbide*


External toolholders



CFIR-100-04D

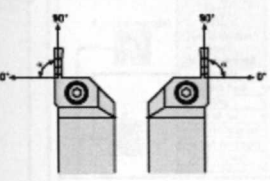
C	F	I	R	- 100 -	04	D - R	4.00	2.75
1	2	3	4	5	6	7	8	9

1. Insert clamping



Clamp


2. Toolholder setting angle



a = 0°	K = 75°
G = 0°	F = 90°
R = 15°	B = 10°
T = 30°	E = 120°
S = 45°	D = 135°
W = 60°	

I = 90° (no offset)

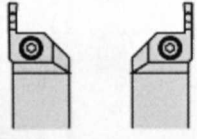
3. Maximum grooving/turning depth



E = 1.0 x b ₁	J = 3.5 x b ₁
F = 1.5 x b ₁	K = 4.0 x b ₁
G = 2.0 x b ₁	L = 4.5 x b ₁
H = 2.5 x b ₁	M = 5.0 x b ₁
I = 3.0 x b ₁	N = 5.5 x b ₁

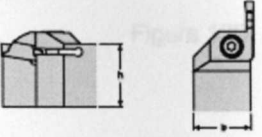
X - Special

4. Version




R L

5. Shank height/width



0x0 - .50"	100 - 1.00"
0x3 - .625"	125 - 1.25"
0x5 - .75"	150 - 1.50"

6. Seat size



Seat Size	Metric Insert	Inch Insert
03	3 mm	.125"
04	4 mm	-
05	5 mm	.187"
06	6 mm	.250"
08	8 mm	-

Figura 11D. Características generales de portainsero.

Interfaz Grafica

A continuación en la Figura 12D se observa la programación realizada en Labview.

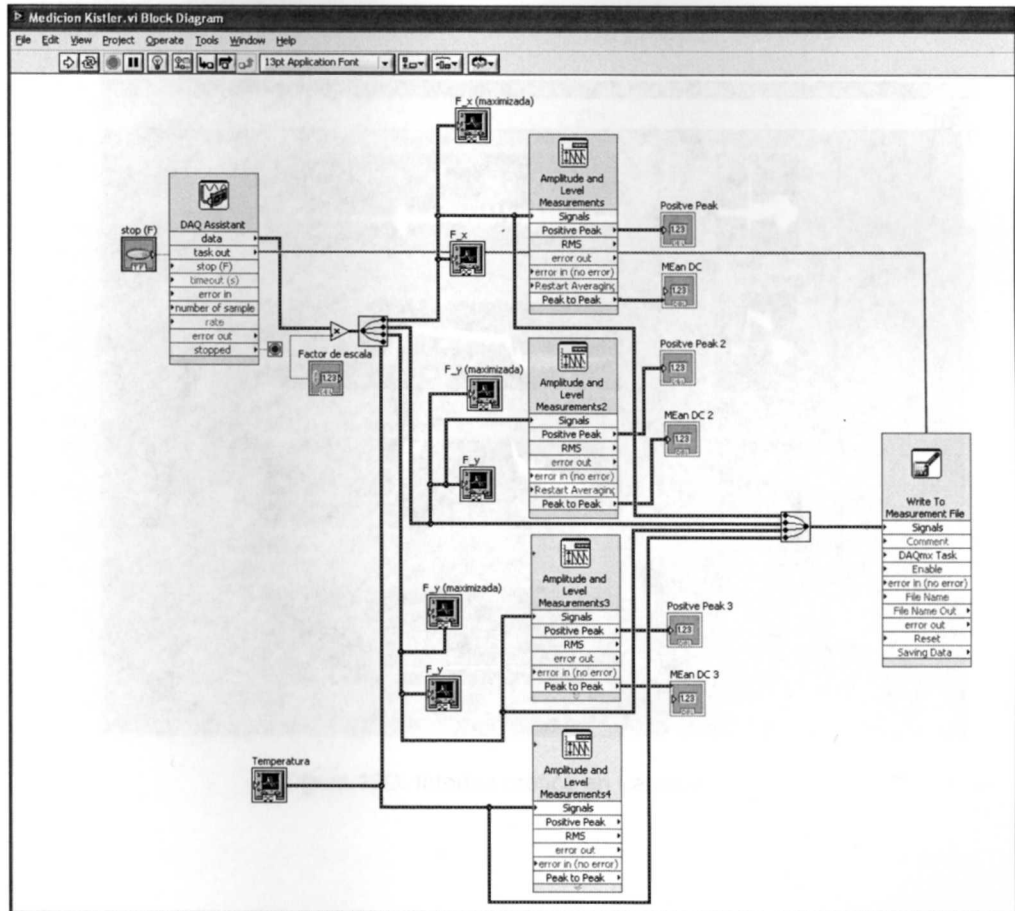


Figura 12D. Programación en Labview.

En la Figura 13D se muestra la interfaz gráfica de la programación en Labview, en la cual se observa las fuerzas de corte y la temperatura de trabajo.

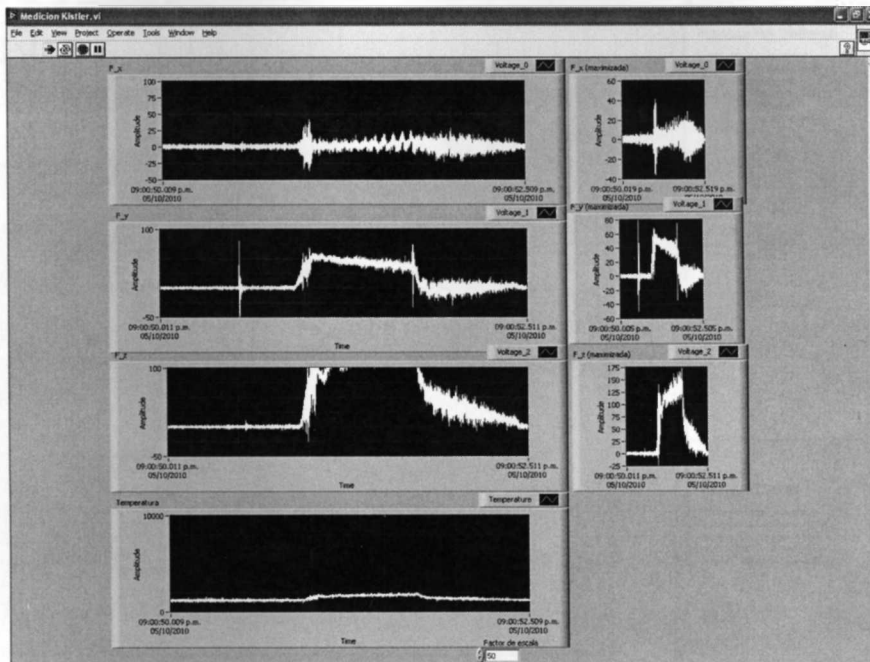


Figura 13D. Interfaz gráfica en Labview.

APÉNDICE E- Medición de las Fuerzas de corte

Las señales se estuvieron registrando con un factor de escala de 50 MU Volt y con una Frecuencia de Muestreo de 4kHz, como se muestra en la Figura 1E.

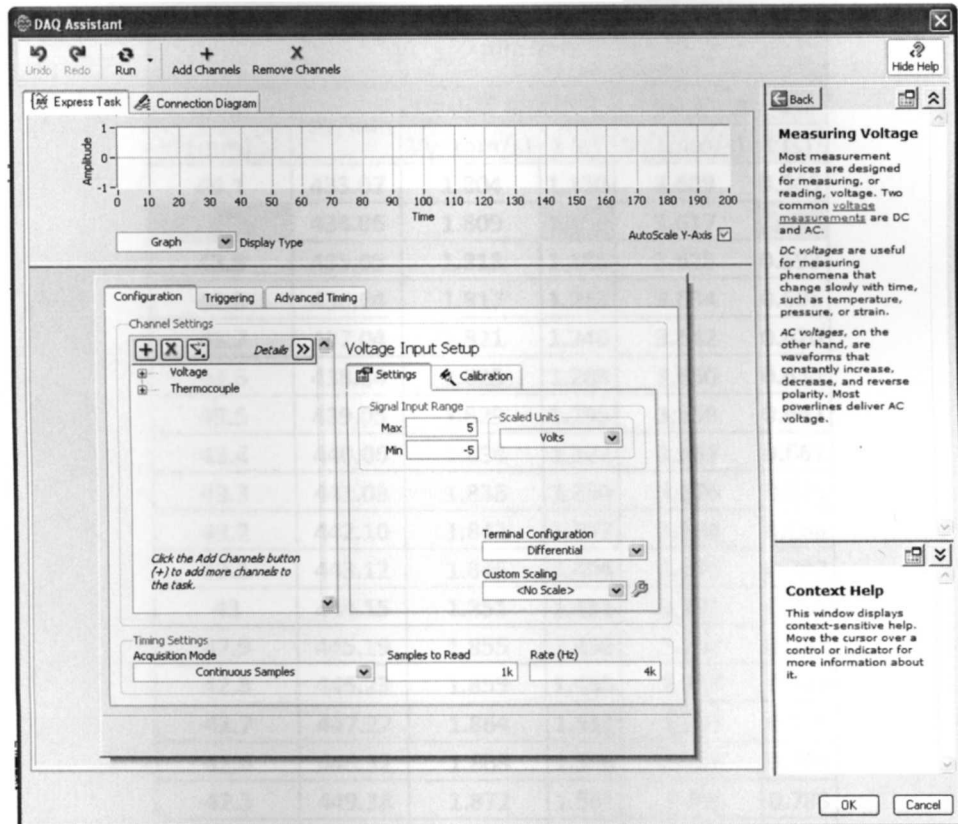


Figura 1E. Especificaciones bajo las cuales se adquirieron las Fuerzas del maquinado.

A continuación en la Tabla 1E (a) y 1E (b) se muestra la selección y el criterio que se tomó para la adquisición de datos y evaluar las fuerzas de corte con los diferentes parámetros de corte.

Tabla 1E (a). Criterio para el análisis de fuerzas de corte.

Vc = 60 mm/min					
diam (mm)	rev/min	f = 0.25 mm/rev		f = 0.5 mm/rev	
		Vy (mm/s)	t (s)	Vy (mm/s)	t (s)
44.1	433.07	1.804	1.130	3.609	0.565
44	434.06	1.809	1.157	3.617	0.579
43.9	435.05	1.813	1.185	3.625	0.593
43.8	436.04	1.817	1.213	3.634	0.606
43.7	437.04	1.821	1.240	3.642	0.620
43.6	438.04	1.825	1.268	3.650	0.634
43.5	439.05	1.829	1.295	3.659	0.647
43.4	440.06	1.834	1.322	3.667	0.661
43.3	441.08	1.838	1.350	3.676	0.675
43.2	442.10	1.842	1.377	3.684	0.688
43.1	443.12	1.846	1.404	3.693	0.702
43	444.15	1.851	1.431	3.701	0.715
42.9	445.19	1.855	1.458	3.710	0.729
42.8	446.23	1.859	1.485	3.719	0.742
42.7	447.27	1.864	1.512	3.727	0.756
42.6	448.32	1.868	1.539	3.736	0.769
42.5	449.38	1.872	1.565	3.745	0.783
42.4	450.44	1.877	1.592	3.754	0.796
42.3	451.50	1.881	1.619	3.763	0.809
42.2	452.57	1.886	1.645	3.771	0.823
42.1	453.65	1.890	1.672	3.780	0.836
	454.73	1.895		3.789	
41.9	455.81	1.899	1.725	3.798	0.862

Tabla 1E (b). Criterio para el análisis de fuerzas de corte.

Vc = 120 mm/min					
diam (mm)	rev/min	f = 0.25 mm/rev		f = 0.5 mm/rev	
		Vy (mm/s)	t (s)	Vy (mm/s)	t (s)
44.1	866.15	3.609	0.565	7.218	0.282
44	868.12	3.617	0.579	7.234	0.289
43.9	870.09	3.625	0.593	7.251	0.296
43.8	872.08	3.634	0.606	7.267	0.303
43.7	874.08	3.642	0.620	7.284	0.310
43.6	876.08	3.650	0.634	7.301	0.317
43.5	878.09	3.659	0.647	7.317	0.324
43.4	880.12	3.667	0.661	7.334	0.331
43.3	882.15	3.676	0.675	7.351	0.337
43.2	884.19	3.684	0.688	7.368	0.344
43.1	886.24	3.693	0.702	7.385	0.351
43	888.30	3.701	0.715	7.403	0.358
42.9	890.38	3.710	0.729	7.420	0.365
42.8	892.46	3.719	0.742	7.437	0.371
42.7	894.55	3.727	0.756	7.455	0.378
42.6	896.65	3.736	0.769	7.472	0.385
42.5	898.76	3.745	0.783	7.490	0.391
42.4	900.87	3.754	0.796	7.507	0.398
42.3	903.00	3.763	0.809	7.525	0.405
42.2	905.14	3.771	0.823	7.543	0.411
42.1	907.29	3.780	0.836	7.561	0.418
42	909.45	3.789		7.579	
41.9	911.63	3.798	0.862	7.597	0.431

Señales Filtradas de Fuerzas a Temperatura Ambiente

A continuación, de la Figura 2E a la 13E, se muestran las señales filtradas de las fuerzas de corte obtenidas a temperatura ambiente, en cada figura se observan las cuatro réplicas para cada condición de trabajo diferente:

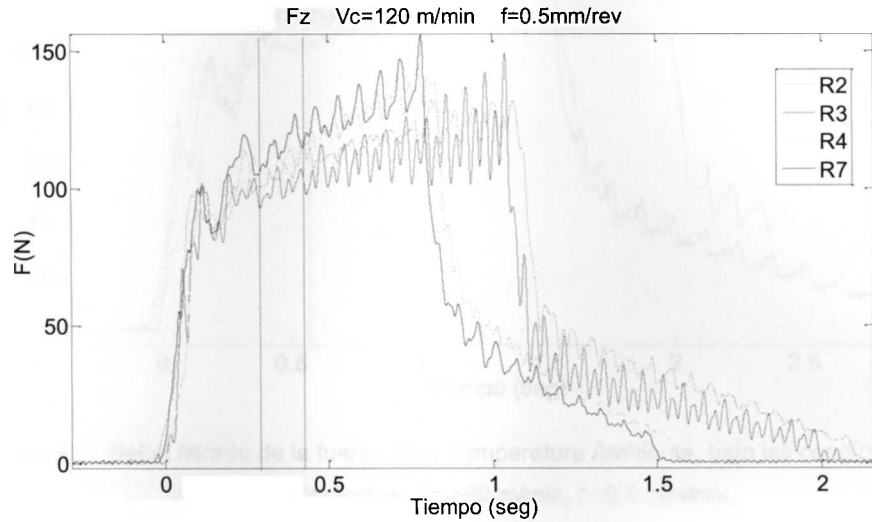


Figura 2E. Señal filtrada de la fuerza F_z a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

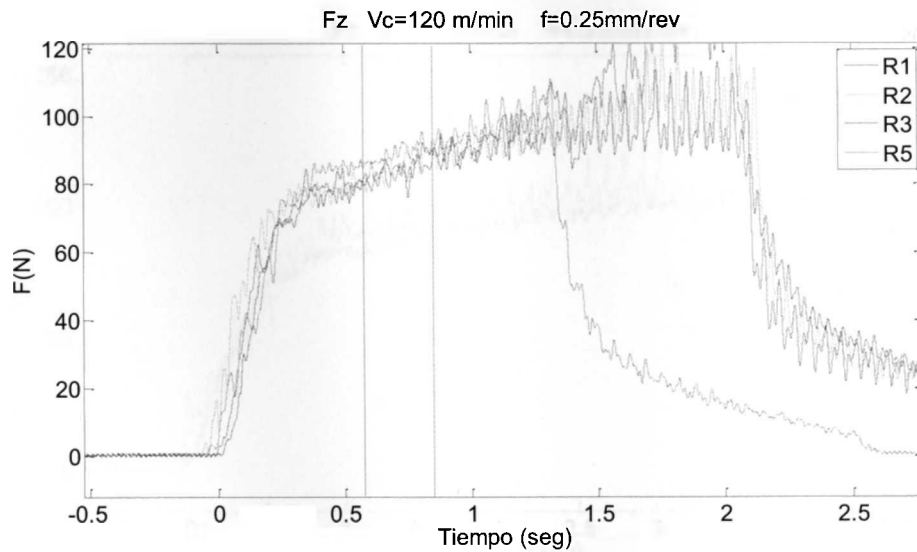


Figura 3E. Señal filtrada de la fuerza F_z a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

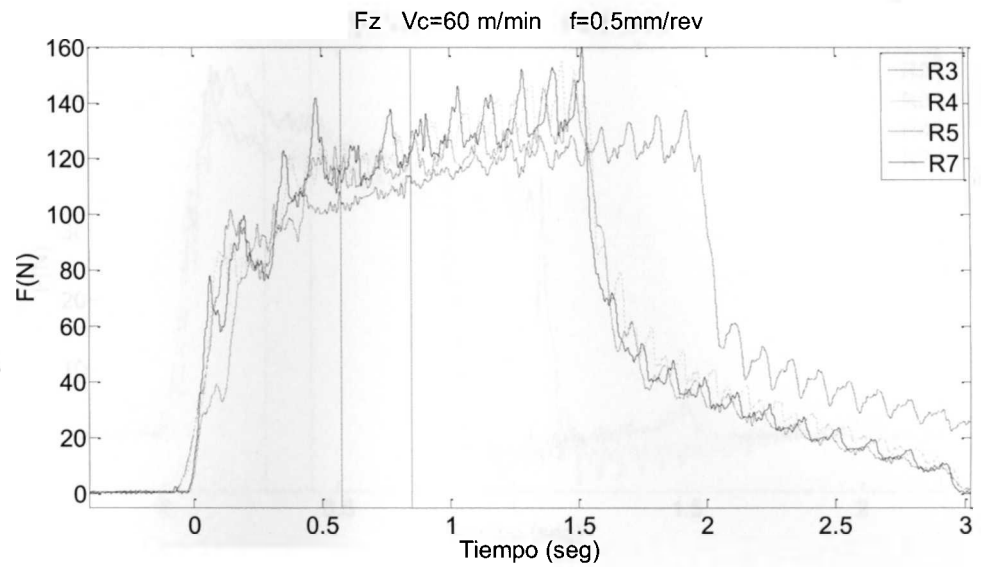


Figura 4E. Señal filtrada de la fuerza F_z a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

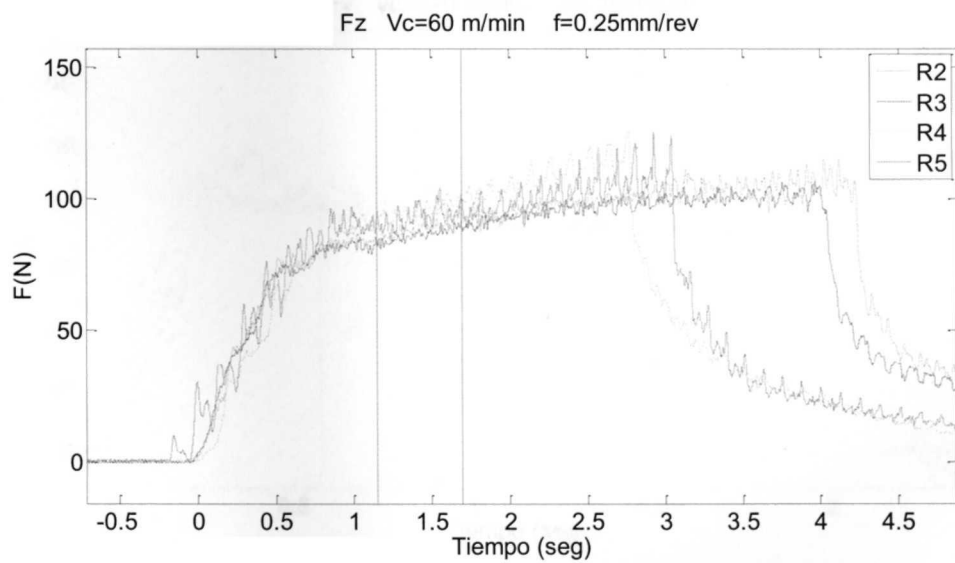


Figura 5E. Señal filtrada de la fuerza F_z a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

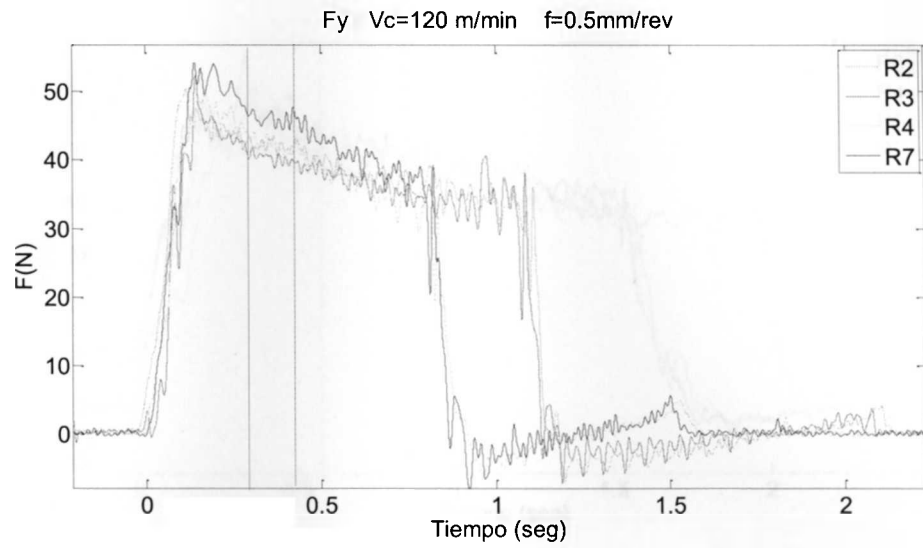


Figura 6E. Señal filtrada de la fuerza F_y a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

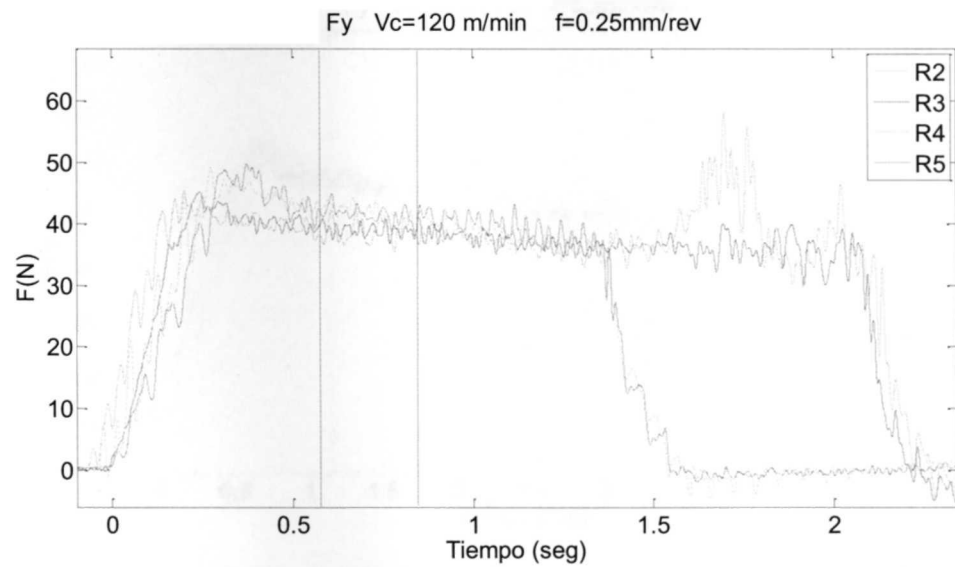


Figura 7E. Señal filtrada de la fuerza F_y a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

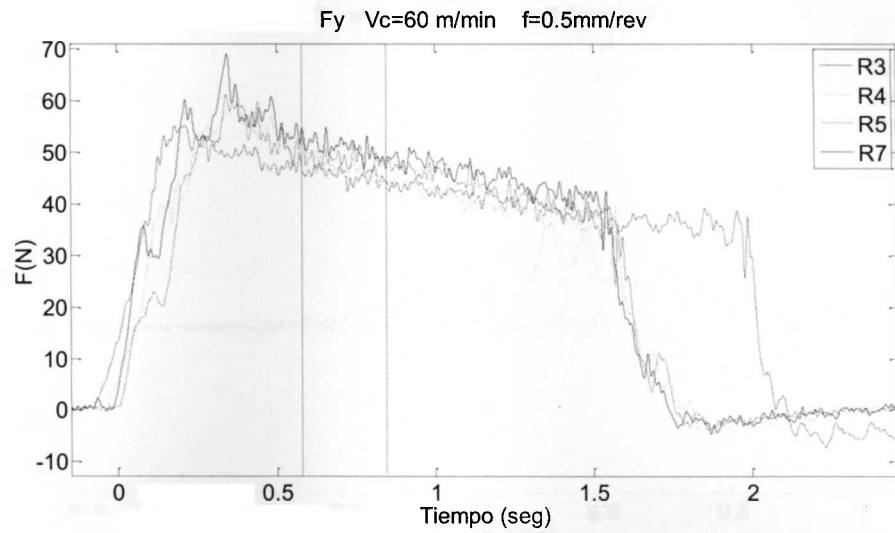


Figura 8E. Señal filtrada de la fuerza F_y a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

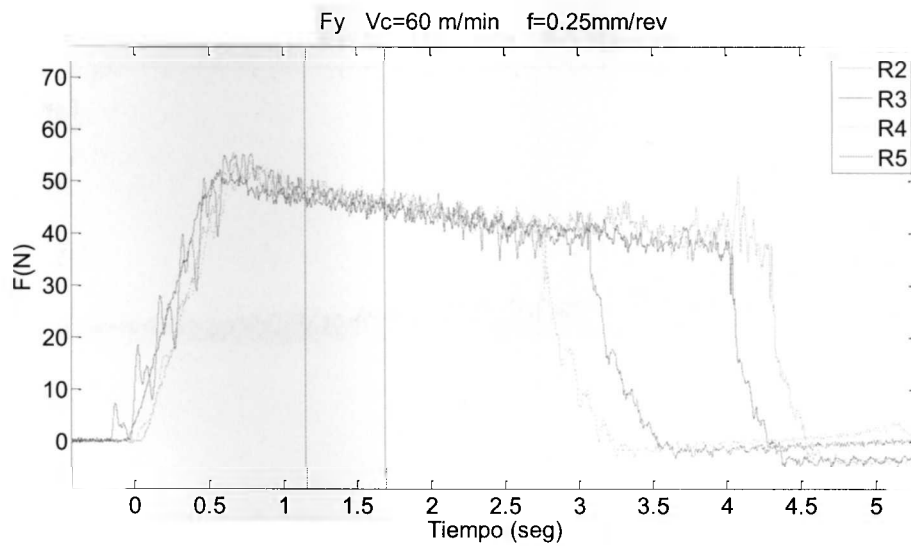


Figura 9E. Señal filtrada de la fuerza F_y a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

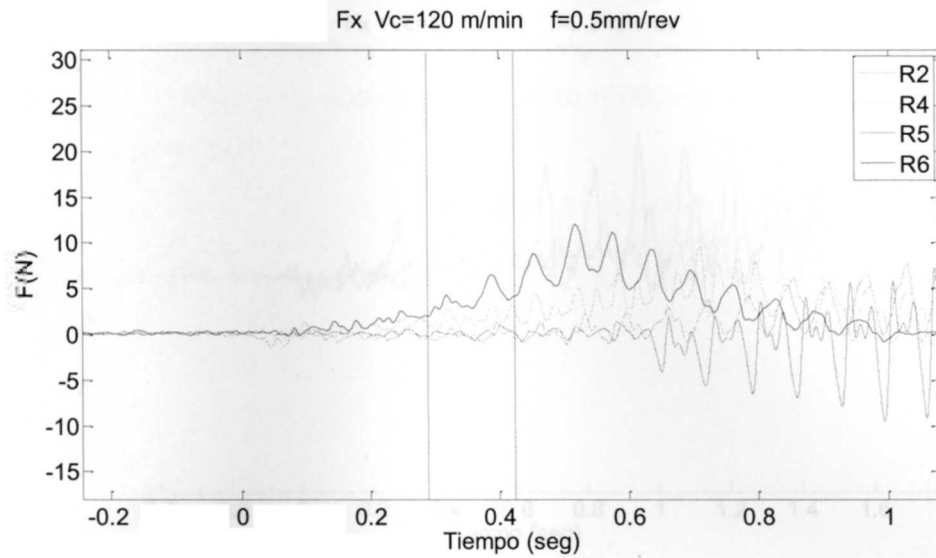


Figura 10E. Señal filtrada de la fuerza F_x a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

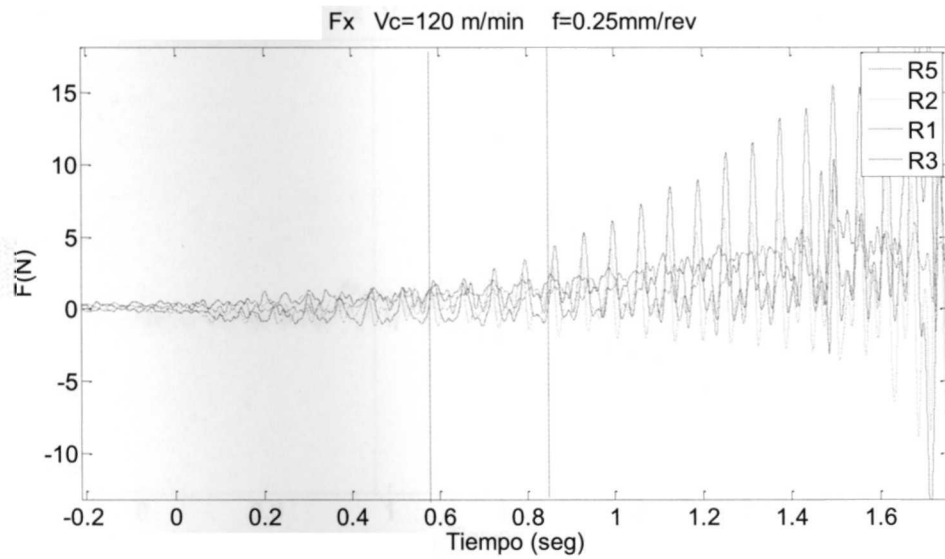


Figura 11E. Señal filtrada de la fuerza F_x a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

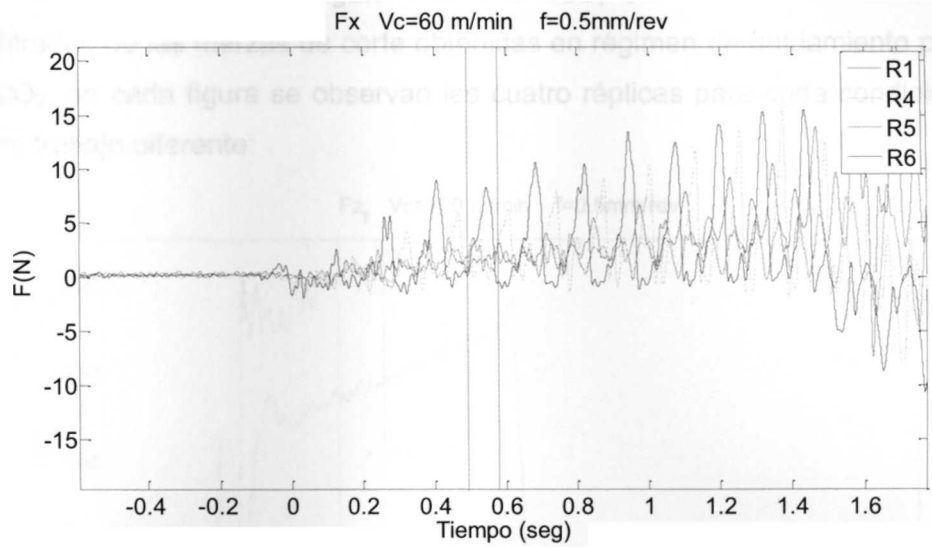


Figura 12E. Señal filtrada de la fuerza F_x a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

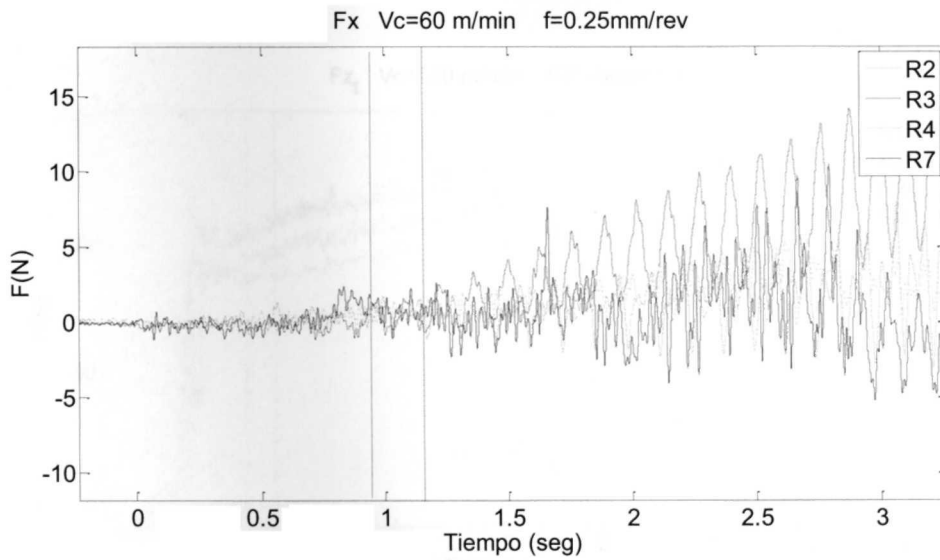


Figura 13E. Señal filtrada de la fuerza F_x a Temperatura Ambiente, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

Señales Filtradas de Fuerzas en régimen de enfriamiento por CO₂

A continuación, de la Figura 14E a la 25E, se muestran las señales filtradas de las fuerzas de corte obtenidas en régimen de enfriamiento por CO₂, en cada figura se observan las cuatro réplicas para cada condición de trabajo diferente:

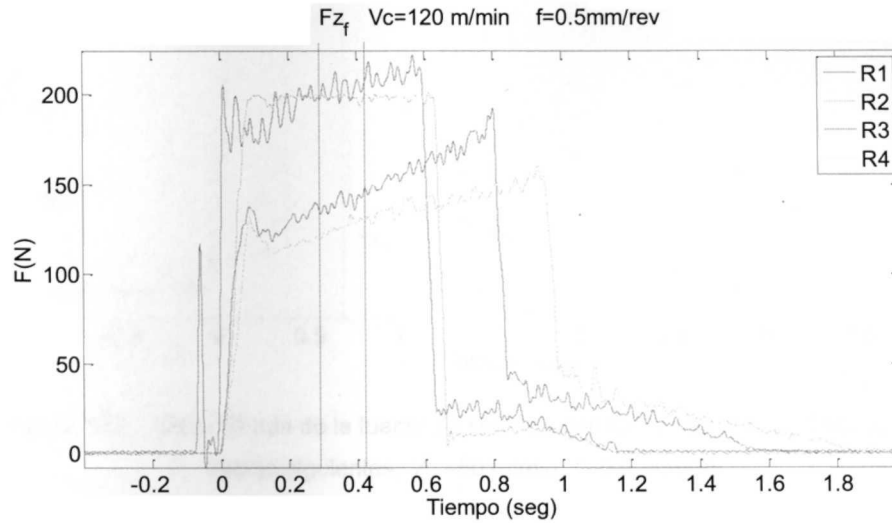


Figura 14E. Señal filtrada de la fuerza F_z enfriada con CO₂, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

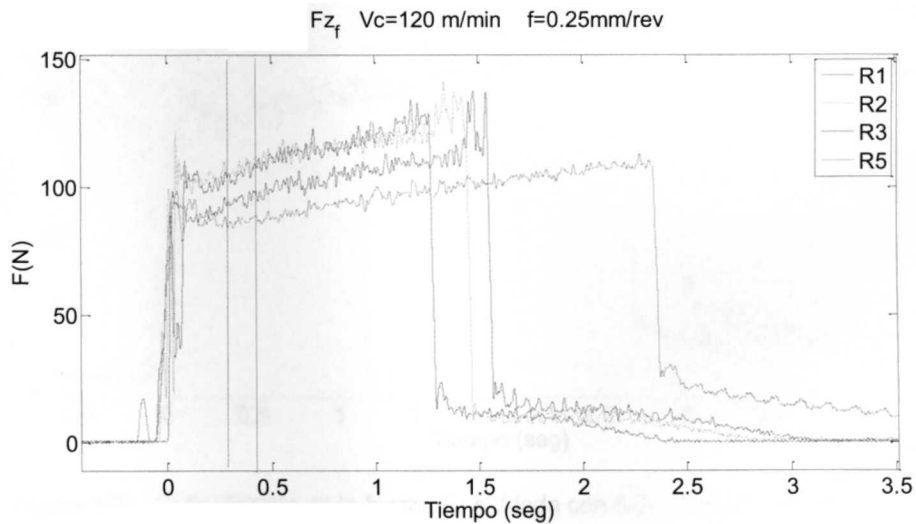


Figura 15E. Señal filtrada de la fuerza F_z enfriada con CO₂, bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

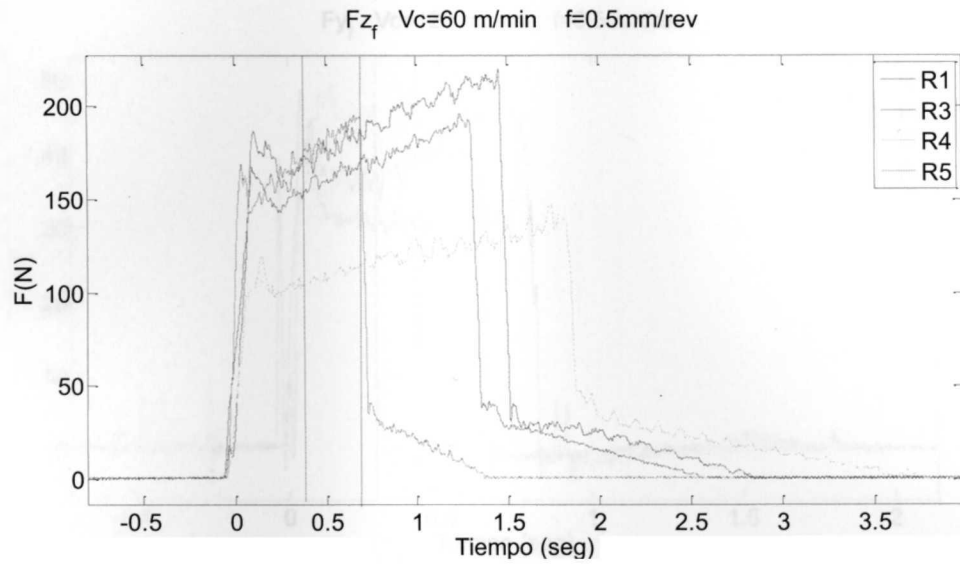


Figura 16E. Señal filtrada de la fuerza Fz enfriada con CO_2 , bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

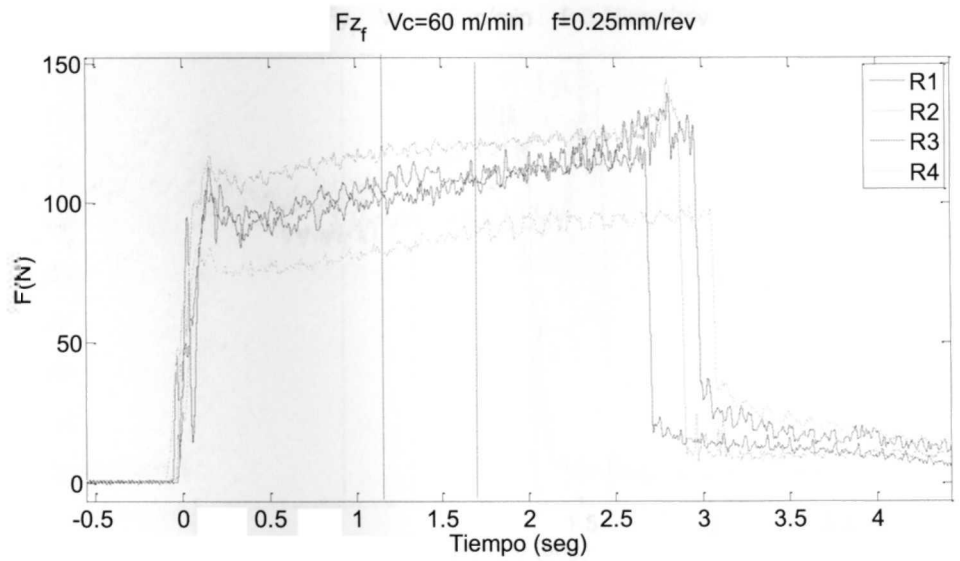


Figura 17E. Señal filtrada de la fuerza Fz enfriada con CO_2 , bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

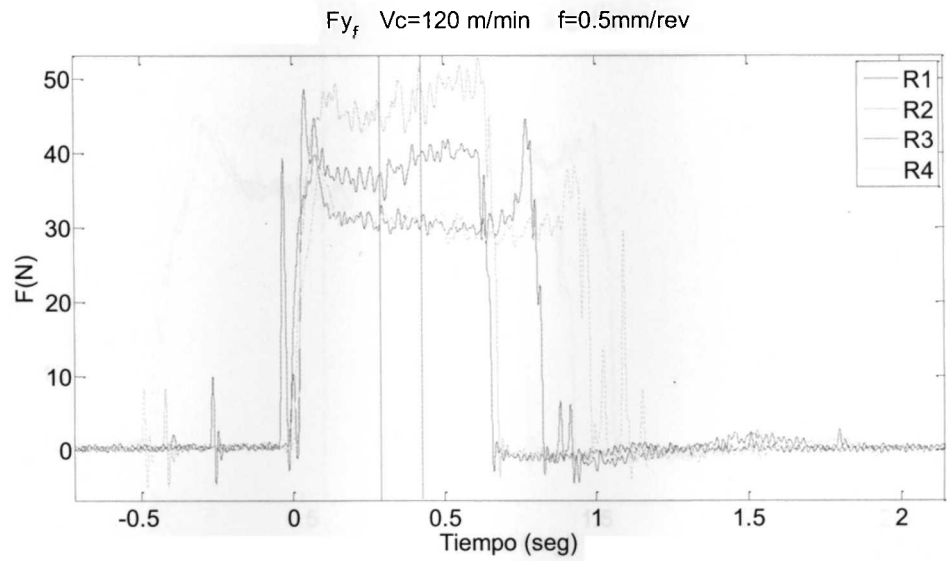


Figura 18E. Señal filtrada de la fuerza F_y enfrida con CO_2 , bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

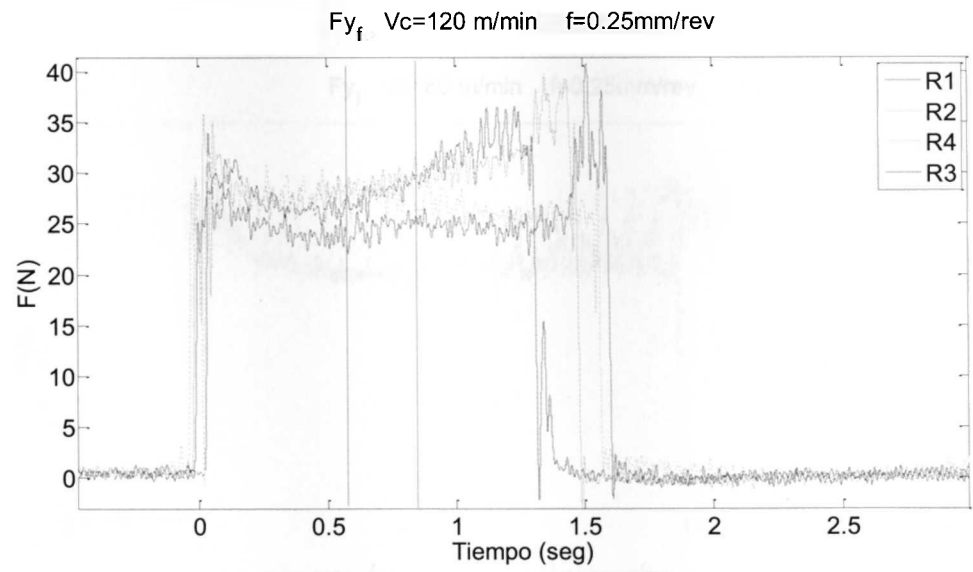


Figura 19E. Señal filtrada de la fuerza F_y enfrida con CO_2 , bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

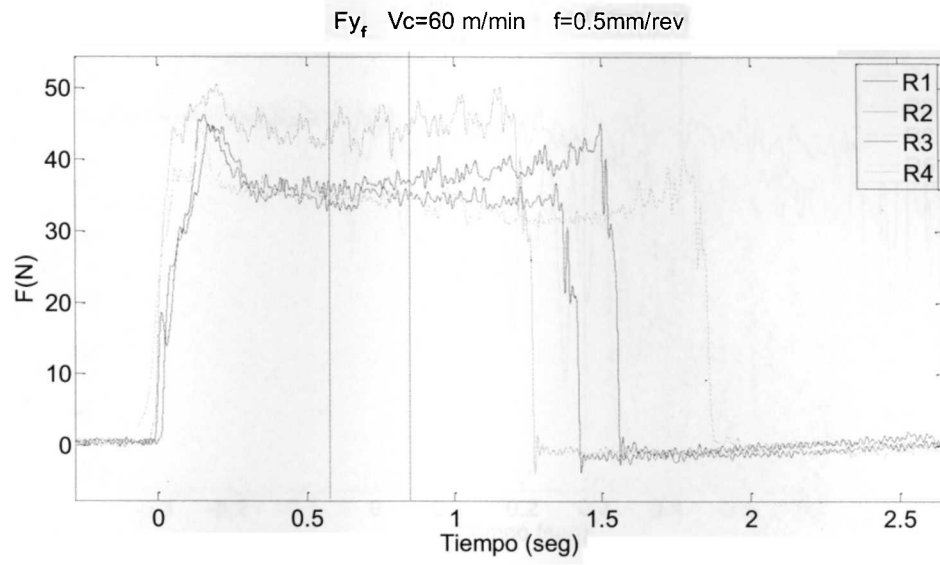


Figura 20E. Señal filtrada de la fuerza F_y enfriada con CO_2 , bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

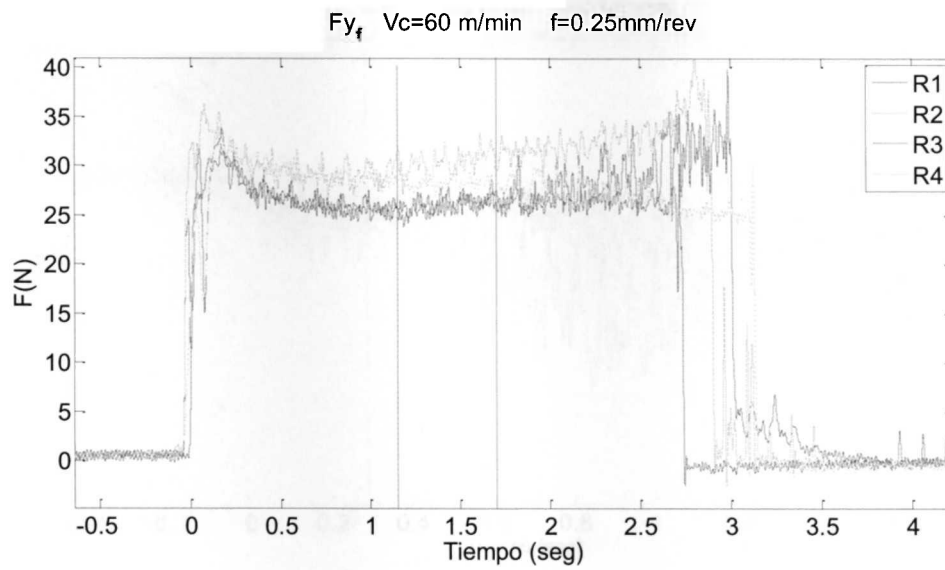


Figura 21E. Señal filtrada de la fuerza F_y enfriada con CO_2 , bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

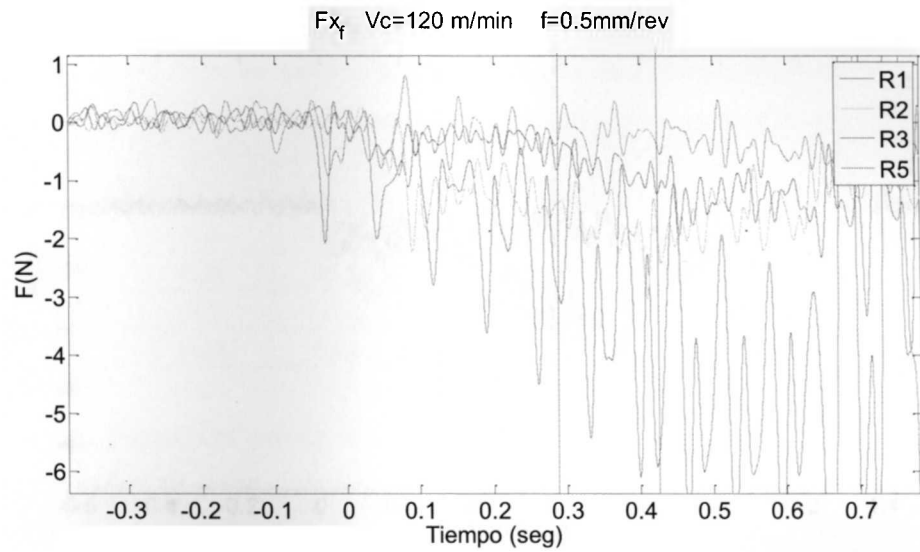


Figura 22E. Señal filtrada de la fuerza F_x enfriada con CO_2 , bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

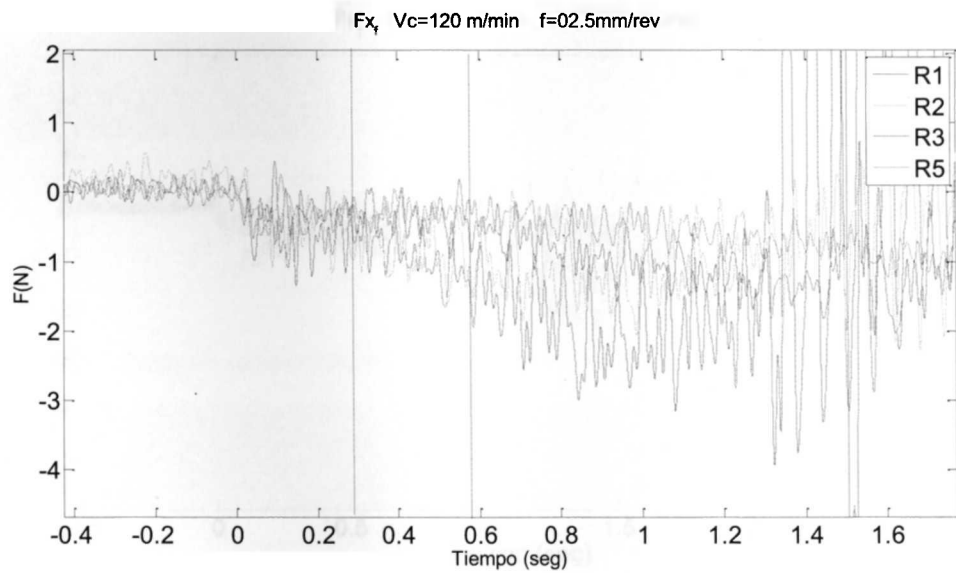


Figura 23E. Señal filtrada de la fuerza F_x enfriada con CO_2 , bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 120$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

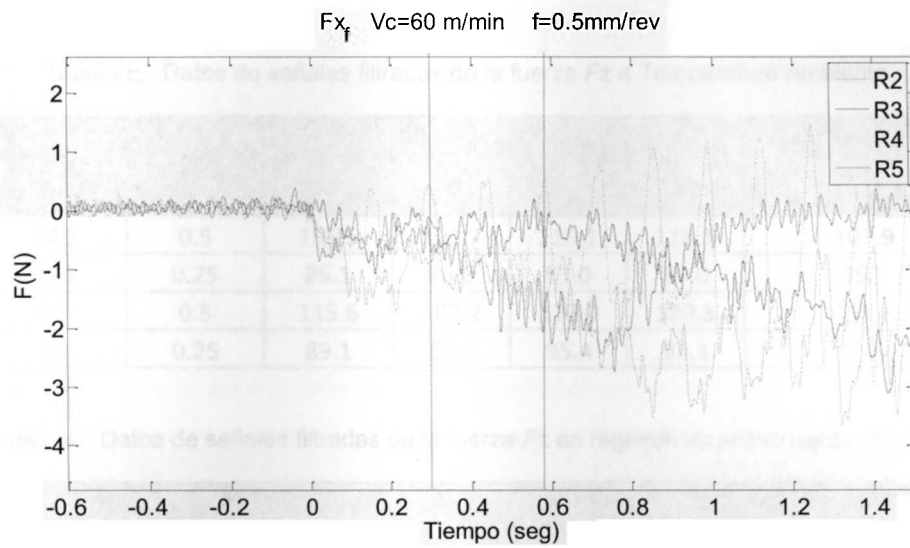


Figura 24E. Señal filtrada de la fuerza F_x enfriada con CO_2 , bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.5$ mm/rev.

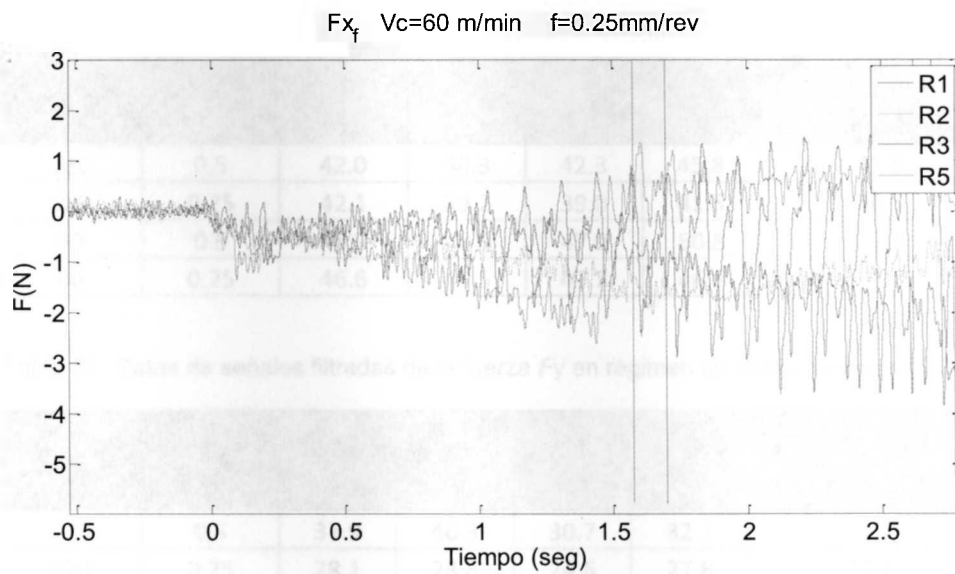


Figura 25E. Señal filtrada de la fuerza F_x enfriada con CO_2 , bajo las condiciones de trabajo siguientes, $V_c = 60$ m/min, $f = 0.25$ mm/rev.

A continuación de la Tabla 2E a 7E se muestran los valores obtenidos de la selección de datos de las señales filtradas:

Tabla 2E. Datos de señales filtradas de la fuerza F_z a Temperatura Ambiente.

Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	4	Promedio_ F_z _1mm (N) Ambiente
120	0.5	105.5	100.7	110.1	115.5	107.9
120	0.25	85.1	85.0	83.0	89.0	85.5
60	0.5	115.6	107.2	120.0	120.5	115.8
60	0.25	89.1	86.3	95.4	93.1	91.0

Tabla 3E. Datos de señales filtradas de la fuerza F_z en régimen de enfriamiento por CO_2 .

Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	4	Promedio_ F_z _1mm (N) Enfriado
120	0.5	203.0	198.3	140.0	126.3	166.9
120	0.25	114.5	115.0	102.3	91.8	105.9
60	0.5	186.4	169.0	115.3	150.2	155.2
60	0.25	103.9	119.8	109.3	86.3	104.8

Tabla 4E. Datos de señales filtradas de la fuerza F_y a Temperatura Ambiente.

Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	4	Promedio_ F_y _1mm (N) Ambiente
120	0.5	42.0	40.3	42.3	45.8	42.6
120	0.25	42.1	39.2	39.0	41.5	40.5
60	0.5	48.5	45.5	47.0	50.8	47.9
60	0.25	46.6	45.5	47.7	46.9	46.7

Tabla 5E. Datos de señales filtradas de la fuerza F_y en régimen de enfriamiento por CO_2 .

Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	4	Promedio_ F_y _1mm (N) Enfriado
120	0.5	37.9	46.3	30.7	32.1	36.7
120	0.25	28.1	28.8	24.6	27.8	27.4
60	0.5	36.4	44.2	34.6	34.7	37.5
60	0.25	26.0	30.4	26.1	28.4	27.7

Tabla 6E. Datos de señales filtradas de la fuerza F_x a Temperatura Ambiente.

Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	4	Promedio_ F_x _1mm (N) Ambiente
120	0.5	-0.025	1.8	0.2	3.9	1.5
120	0.25	0.9	0.2	0.4	0.7	0.6
60	0.5	1.9	2.3	2.5	3.1	2.4
60	0.25	0.5	1.6	1.2	0.5	0.9

Tabla 7E. Datos de señales filtradas de la fuerza F_x en régimen de enfriamiento por CO_2 .

Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	4	Promedio_ F_x _1mm (N) Enfriado
120	0.5	-3.1	-1.8	-0.8	-0.2	-1.5
120	0.25	-1.7	-1.1	-0.6	-0.4	-0.9
60	0.5	-1.8	-2.0	-0.4	-0.6	-1.2
60	0.25	-0.6	-1.3	-0.7	-1.0	-0.9

A continuación en la Tabla 8E se muestran los factores de corte con los cuales se trabajaron en esta investigación, también de la Tabla 9E a la 11E se observan las respuestas de los promedios de fuerzas obtenidas en el maquinado; todo esto con la finalidad de ver de la Figura 26E a la 37E la tendencia de dichos datos obtenidos:

Tabla 8E. Factores de Corte.

F1	Vc	120	0
		60	1
F2	f	0.5	0
		0.25	1

Tabla 9E. Respuestas de la Fuerza F_z

Fz		ambiente	frio
F1	F2	R1	R2
0	0	105.5	203.0
0	0	100.7	198.3
0	0	110.1	140.0
0	0	115.5	126.3
0	1	85.1	114.5
0	1	85.0	115.0
0	1	83.0	102.3
0	1	89.0	91.8
1	0	115.6	186.4
1	0	107.2	169.0
1	0	120.0	115.3
1	0	120.5	150.2
1	1	89.1	103.9
1	1	86.3	119.8
1	1	95.4	109.3
1	1	93.1	86.3

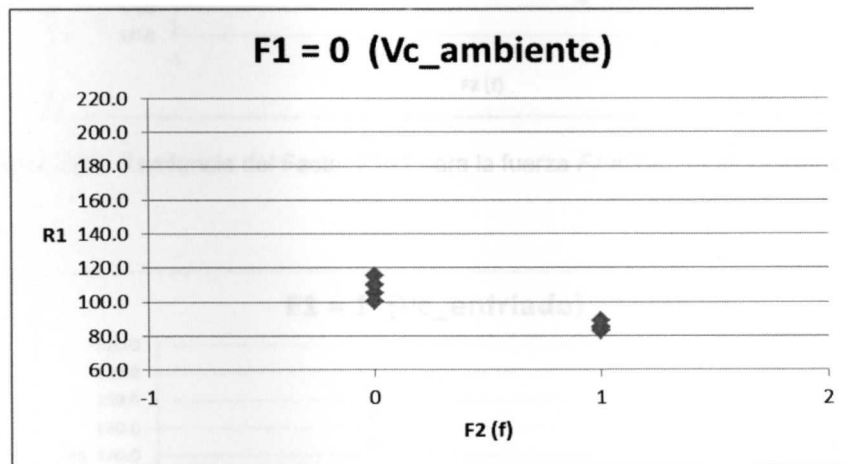


Figura 26E. Tendencia del Factor $F1=0$ para la fuerza F_z a Temperatura Ambiente.

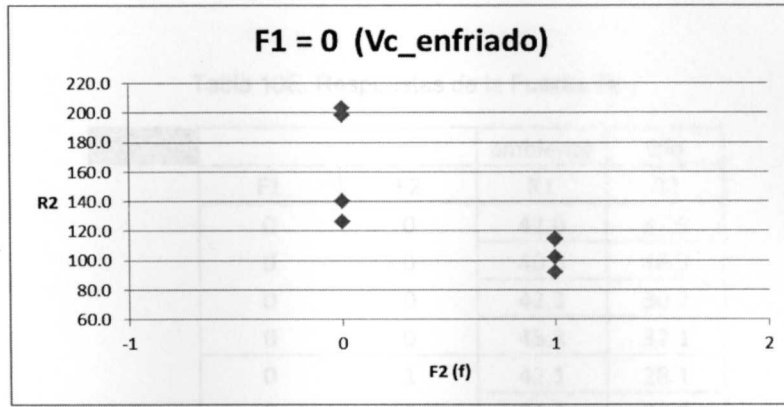


Figura 27E. Tendencia del Factor F1=0 para la fuerza Fz en régimen de enfriamiento por CO_2 .

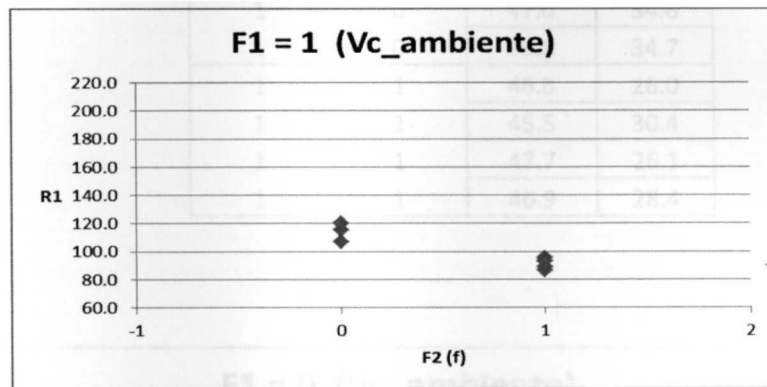


Figura 28E. Tendencia del Factor F1=1 para la fuerza Fz a Temperatura Ambiente.

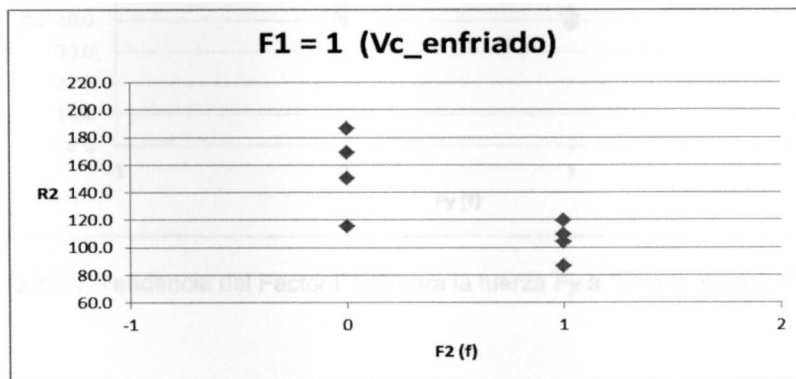


Figura 29E. Tendencia del Factor F1=1 para la fuerza Fz en régimen de enfriamiento por CO_2 .

Tabla 10E. Respuestas de la Fuerza F_y

		ambiente	frio
F1	F2	R1	R2
0	0	42.0	37.9
0	0	40.3	46.3
0	0	42.3	30.7
0	0	45.8	32.1
0	1	42.1	28.1
0	1	39.2	28.8
0	1	39.0	24.6
0	1	41.5	27.8
1	0	48.5	36.4
1	0	45.5	44.2
1	0	47.0	34.6
1	0	50.8	34.7
1	1	46.6	26.0
1	1	45.5	30.4
1	1	47.7	26.1
1	1	46.9	28.4

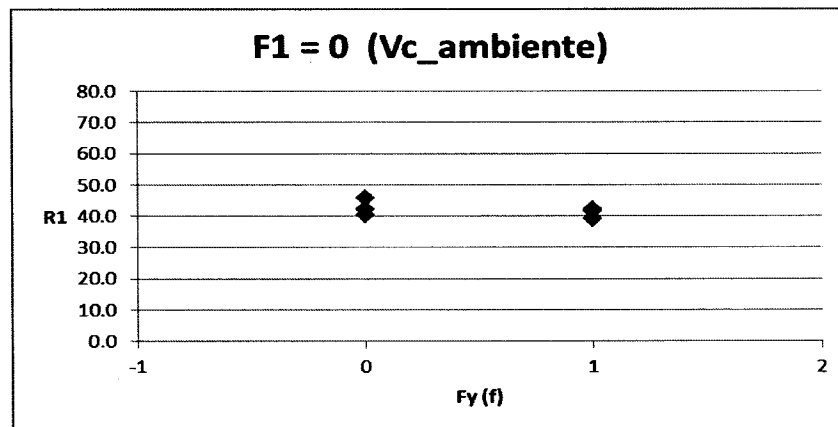


Figura 30E. Tendencia del Factor F1=0 para la fuerza F_y a Temperatura Ambiente.

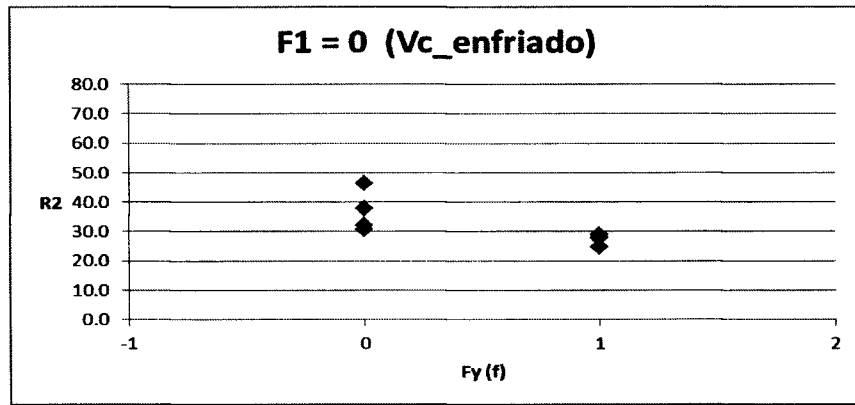


Figura 31E. Tendencia del Factor F1=0 para la fuerza F_y en régimen de enfriamiento por CO_2 .

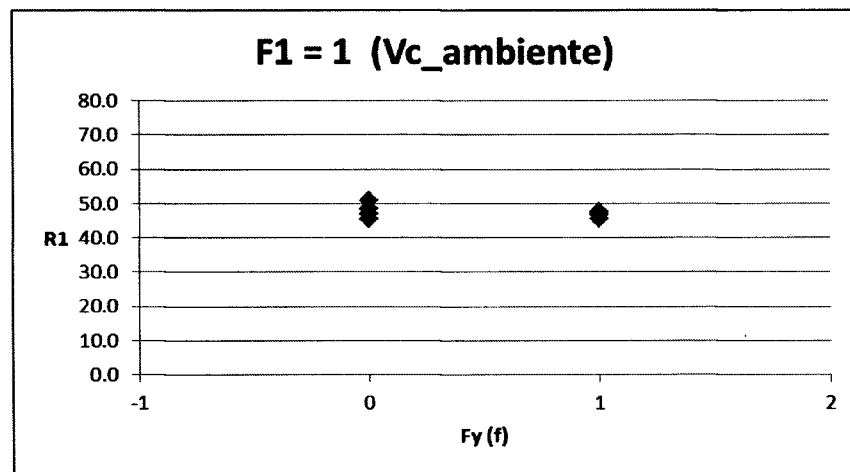


Figura 32E. Tendencia del Factor F1=1 para la fuerza F_y a Temperatura Ambiente.

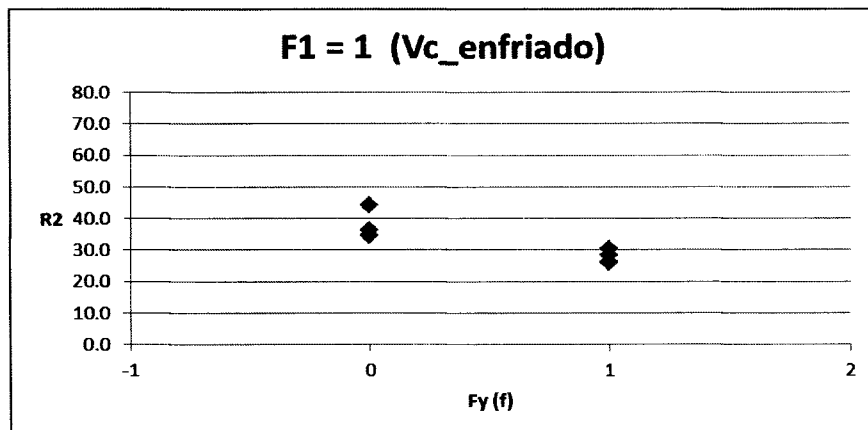


Figura 33E. Tendencia del Factor F1=1 para la fuerza F_y en régimen de enfriamiento por CO_2 .

Tabla 11E. Respuestas de la Fuerza F_x

		ambiente	frio
F1	F2	R1	R2
0	0	-0.025	-3.1
0	0	1.8	-1.8
0	0	0.2	-0.8
0	0	3.9	-0.2
0	1	0.9	-1.7
0	1	0.2	-1.1
0	1	0.4	-0.6
0	1	0.7	-0.4
1	0	1.9	-1.8
1	0	2.3	-2.0
1	0	2.5	-0.4
1	0	3.1	-0.6
1	1	0.5	-0.6
1	1	1.6	-1.3
1	1	1.2	-0.7
1	1	0.5	-1.0

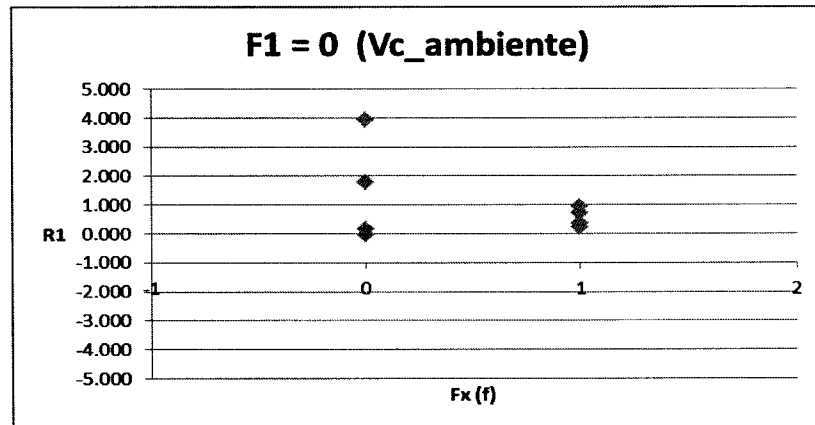


Figura 34E. Tendencia del Factor F1=0 para la fuerza F_x a Temperatura Ambiente.

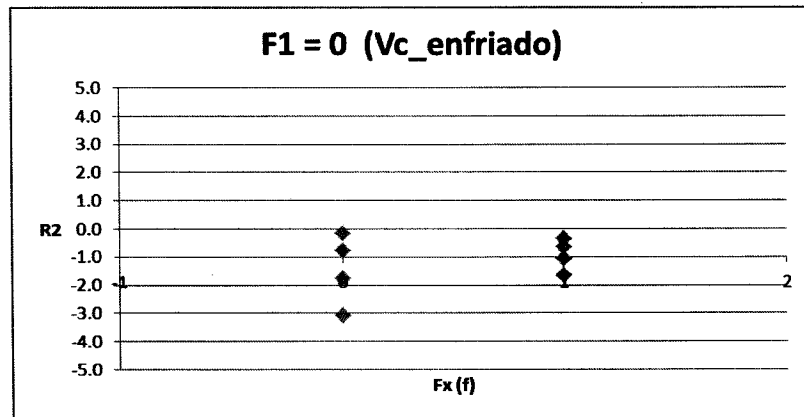


Figura 35E. Tendencia del Factor F1=0 para la fuerza F_x en régimen de enfriamiento por CO_2 .

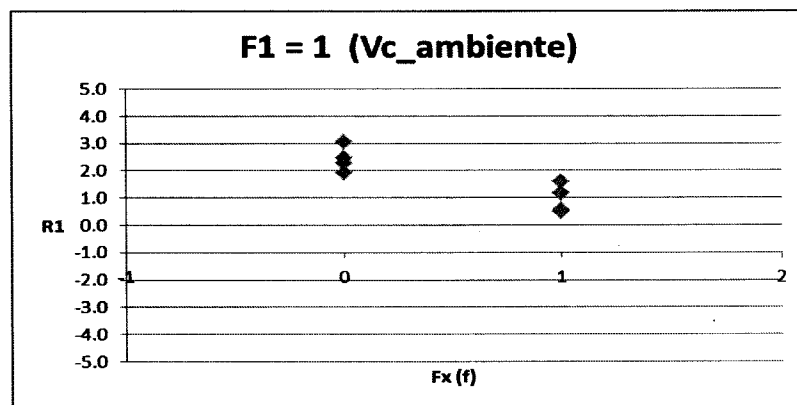


Figura 36E. Tendencia del Factor F1=1 para la fuerza xy a Temperatura Ambiente.

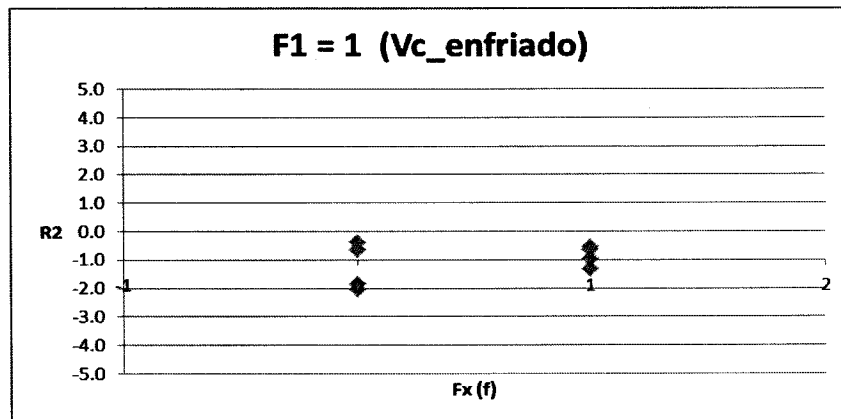


Figura 37E. Tendencia del Factor F1=1 para la fuerza F_x en régimen de enfriamiento por CO_2 .

APÉNDICE F- Medición de Rugosidad

La medición de la rugosidad se hizo bajo el Estándar ISO-97, en la Figura 1F se muestran las especificaciones con las cuales se realizaron las mediciones, en la Figura 2F se muestra una de las señales obtenidas.

Figura 1F. Especificaciones de la medición de Rugosidad.

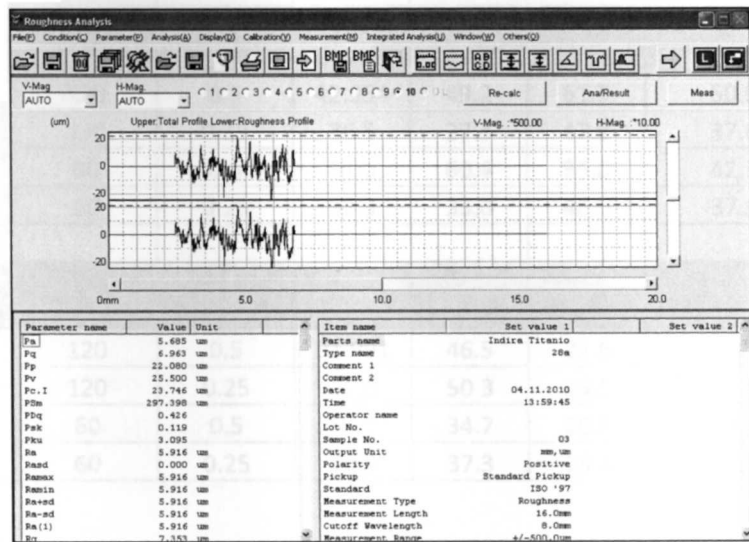


Figura 2F. Señal de la medición de Rugosidad.

Se realizaron tres mediciones para obtener el valor de la rugosidad del material y después se calculó un promedio, los resultados se muestran en la Tabla 1F y 2F.

Tabla 1F. Mediciones de rugosidad a Temperatura Ambiente.

Probeta	Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	Promedio (μm)
R1	120	0.5	48.4	54.2	36.3	46.29
	120	0.25	70.5	45.4	75.1	63.68
	60	0.5	36.1	44.8	58.9	46.58
	60	0.25	55.7	43.4	44.3	47.82
Probeta	Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	Promedio (μm)
R2	120	0.5	28.8	29.6	39.3	32.56
	120	0.25	22.1	27.3	36.1	28.49
	60	0.5	33.8	34.7	28.3	32.26
	60	0.25	70.8	64.3	37.8	57.63
Probeta	Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	Promedio (μm)
R3	120	0.5	42.354	49.2	61.3	50.93
	120	0.25	36.5	27.3	47.2	37.00
	60	0.5	31.6	60.4	35.0	42.32
	60	0.25	32.3	33.0	48.6	37.98
Probeta	Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	Promedio (μm)
R7	120	0.5	31.991	46.5	22.6	33.72
	120	0.25	27.8	50.3	35.5	37.88
	60	0.5	64.0	34.7	26.6	41.74
	60	0.25	16.9	37.3	25.4	26.53

Tabla 2F. Mediciones de rugosidad en régimen de enfriamiento por CO₂.

Probeta	Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	Promedio (μm)
R1f	120	0.5	7.1	4.8	6.8	6.22
	120	0.25	5.9	5.0	7.4	6.10
	60	0.5	16.4	6.9	6.9	10.05
	60	0.25	5.7	4.5	4.9	5.02
Probeta	Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	Promedio (μm)
R2f	120	0.5	5.2	7.9	6.1	6.40
	120	0.25	6.7	7.9	11.1	8.55
	60	0.5	6.4	5.6	15.0	9.01
	60	0.25	7.9	8.6	5.4	7.31
Probeta	Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	Promedio (μm)
R4f	120	0.5	9.0	7.3	9.3	8.52
	120	0.25	6.5	13.9	19.7	13.35
	60	0.5	7.9	8.8	20.3	12.35
	60	0.25	6.3	11.9	12.7	10.30
Probeta	Vc (m/min)	f (mm/rev)	1	2	3	Promedio (μm)
R5f	120	0.5	12.143	6.1	7.2	8.48
	120	0.25	5.0	5.9	6.9	5.92
	60	0.5	7.3	7.5	13.0	9.28
	60	0.25	7.9	5.4	6.4	6.56

A continuación en la Figura 3F se muestran las probetas maquinadas y se puede observar el acabado superficial de cada una de ellas a temperatura ambiente y enfriando con CO₂.

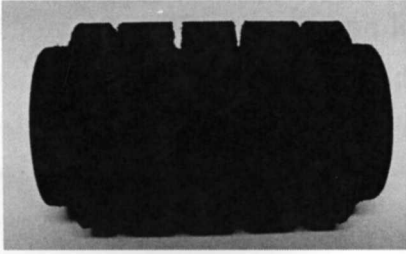
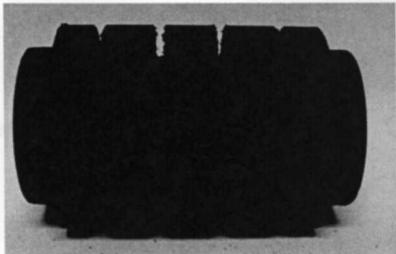
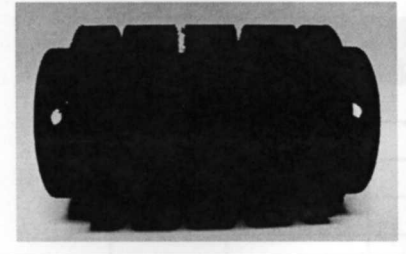
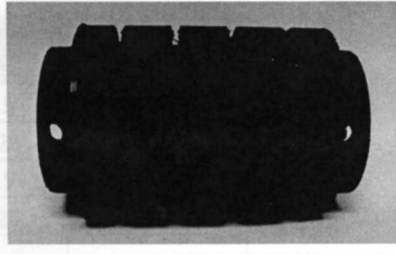
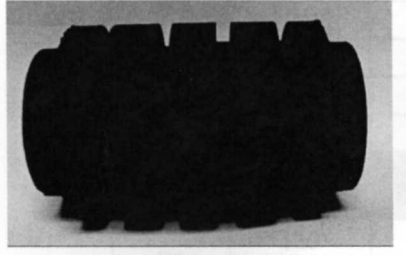
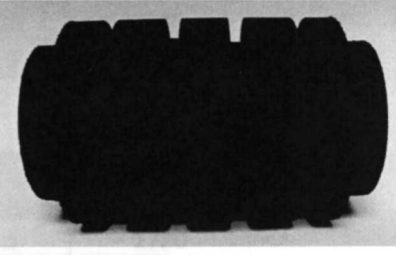
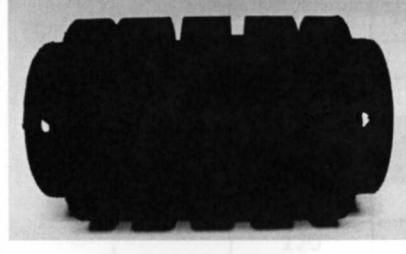
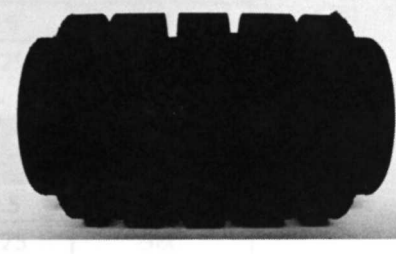
Condición: Ambiente	
Probeta: R1 	Probeta: R2 
Probeta: R3 	Probeta: R7 
Condición: Enfriado con CO ₂	
Probeta: R1f 	Probeta: R2f 
Probeta: R4f 	Probeta: R5f 

Figura 3F. Probetas maquinadas.

APÉNDICE G- Medición de la Longitud de virutas

En la Tabla 1G y 2G se muestran los valores de las mediciones de la longitud de virutas de cada uno de los experimentos realizados, a temperatura ambiente y en régimen por enfriamiento por CO₂ respectivamente:

Tabla 1G. Mediciones de Longitud de Viruta a Temperatura Ambiente.

R1	Vc (m/min)	f (mm/rev)	Longitud (mm)
	120	0.5	825
	120	0.25	300
	60	0.5	1140
R2	Vc (m/min)	f (mm/rev)	longitud (mm)
	120	0.5	1830
	120	0.25	2040
	60	0.5	1560
R3	Vc (m/min)	f (mm/rev)	longitud (mm)
	120	0.5	1720
	120	0.25	2390
	60	0.5	1650
R7	Vc (m/min)	f (mm/rev)	longitud (mm)
	120	0.5	1000
	120	0.25	960
	60	0.5	1200
	60	0.25	1250

Tabla 2G. Mediciones de Longitud de Viruta en régimen de enfriamiento por CO₂.

	Vc (m/min)	f (mm/rev)	longitud (mm)
R1f	120	0.5	1200
	120	0.25	2460
	60	0.5	1460
	60	0.25	2610
	Vc (m/min)	f (mm/rev)	longitud (mm)
R2f	120	0.5	1230
	120	0.25	2780
	60	0.5	1210
	60	0.25	2790
	Vc (m/min)	f (mm/rev)	longitud (mm)
R4f	120	0.5	2910
	120	0.25	2940
	60	0.5	1320
	60	0.25	2620
	Vc (m/min)	f (mm/rev)	longitud (mm)
R5f	120	0.5	2300
	120	0.25	2280
	60	0.5	1480
	60	0.25	1440

APÉNDICE H- Medición de la Continuidad de virutas

En la Tabla 1H se muestra las medición de la continuidad de las virutas:

Tabla 1H. Mediciones de Continuidad de Viruta.

		Continuidad de viruta	
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Ambiente	Semienfriado
120	0.5	si	si
120	0.25	no	si
60	0.5	si	si
60	0.25	no	si
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Ambiente	Semienfriado
120	0.5	si	si
120	0.25	no	si
60	0.5	si	si
60	0.25	no	si
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Ambiente	Semienfriado
120	0.5	si	si
120	0.25	no	si
60	0.5	si	si
60	0.25	no	si
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Ambiente	Semienfriado
120	0.5	si	si
120	0.25	no	si
60	0.5	si	si
60	0.25	no	si

De la figura 1H a la Figura 4H se observa la continuidad de las virutas generadas durante el corte, estas fotografías fueron tomadas con una cámara de 10x de zoom óptico como máximo.

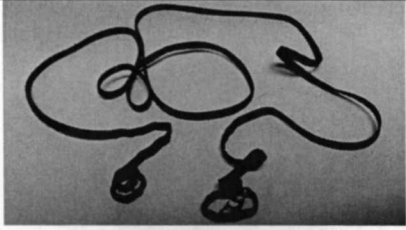
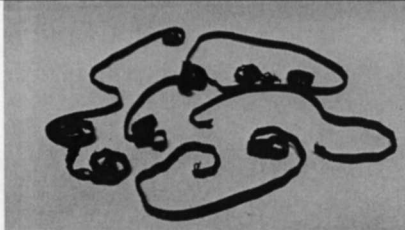
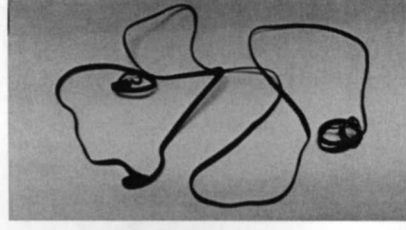

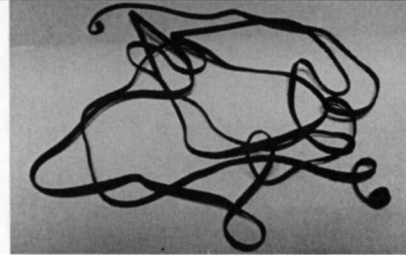

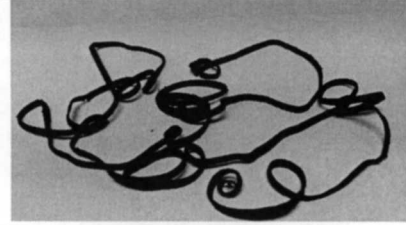
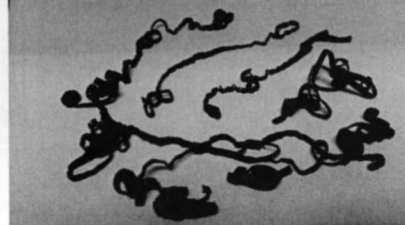
Condicion: Ambiente		Probeta: R1	
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
120	0.5	120	0.25
			
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
60	0.5	60	0.25
			
Condicion: Ambiente		Probeta: R2	
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
120	0.5	120	0.25
			
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
60	0.5	60	0.25
			

Figura 1H. Virutas generadas de probeta R1 y R2 a Temperatura Ambiente.

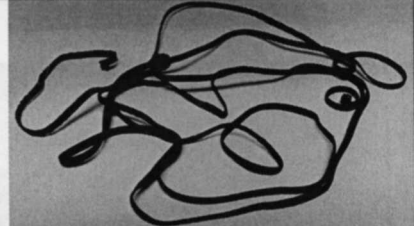
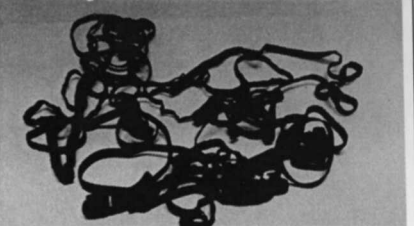
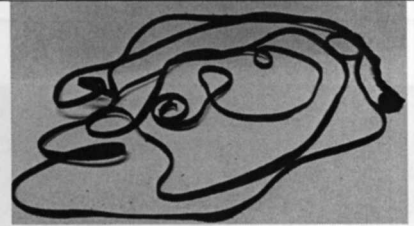
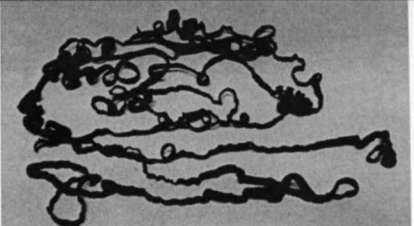
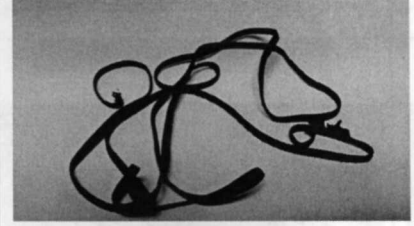
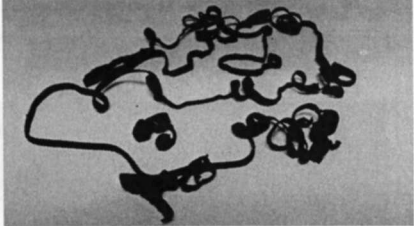
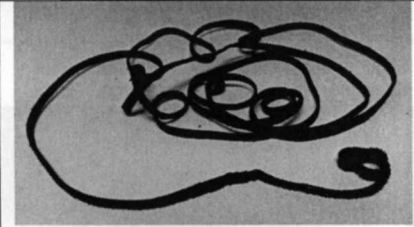
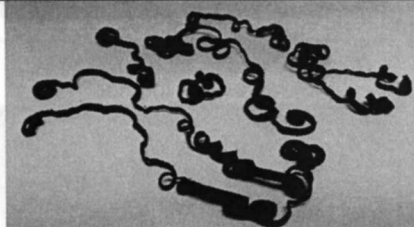
Condicion: Ambiente		Probeta: R3	
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
120	0.5	120	0.25
			
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
60	0.5	60	0.25
			
Condicion: Ambiente		Probeta: R7	
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
120	0.5	120	0.25
			
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
60	0.5	60	0.25
			

Figura 2H. Virutas generadas de probeta R3 y R7 a Temperatura Ambiente.

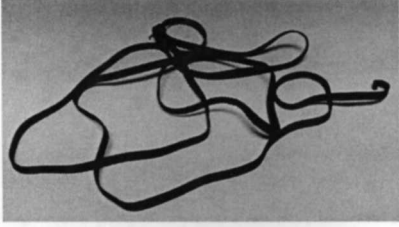
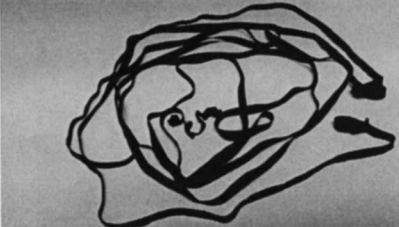
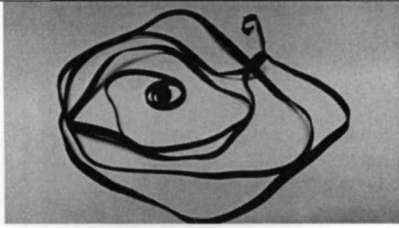

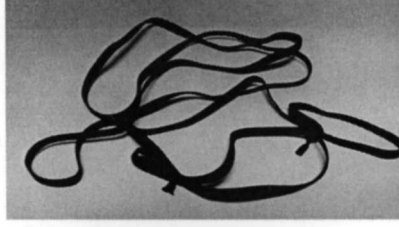
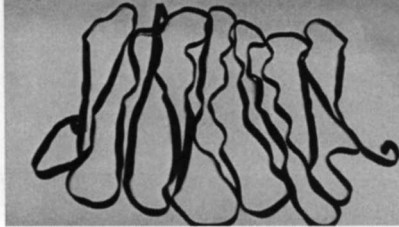

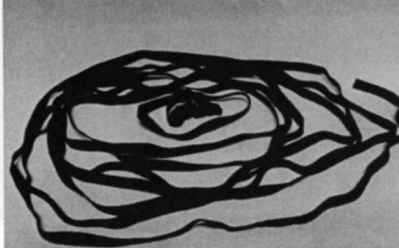
Condicion: Frio		Probeta: R1	
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
120	0.5	120	0.25
			
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
60	0.5	60	0.25
			
Condicion: Frio		Probeta: R2	
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
120	0.5	120	0.25
			
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
60	0.5	60	0.25
			

Figura 3H. Virutas generadas de probeta R1 y R2 en régimen de enfriamiento por CO₂.

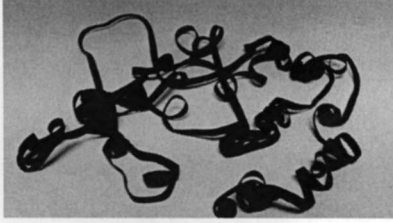

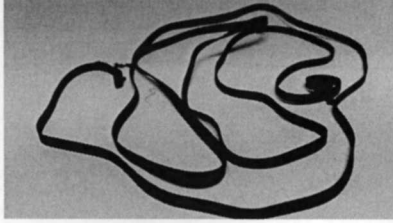

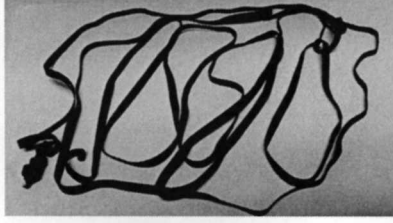

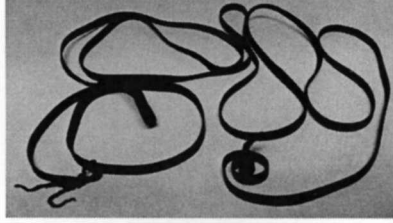
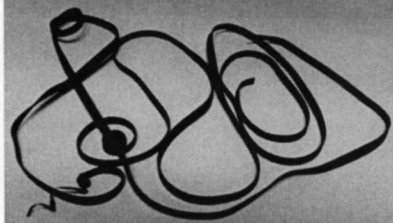
Condicion: Frio		Probeta: R4	
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
120	0.5	120	0.25
			
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
60	0.5	60	0.25
			
Condicion: Frio		Probeta: R5	
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
120	0.5	120	0.25
			
Vc (m/min)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	f (mm/rev)
60	0.5	60	0.25
			

Figura 4H. Virutas generadas de probeta R4 y R5 en régimen de enfriamiento por CO₂.

Tecnológica de Monterrey, Campus Monterrey



30002007368152

<http://biblioteca.mty.itesm.mx>