

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**



**VALIDACIÓN DE PROGRAMA ANALÍTICO Y MODELO
DE FEM PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES EN EL
TORNEADO EN DURO**

**POR
ING. PABLO ERNESTO TAPIA GONZÁLEZ**

**TESIS
EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA DE MANUFACTURA CON
ESPECIALIDAD EN DISEÑO DE PRODUCTOS**

CIUDAD UNIVERSITARIA

AGOSTO 2005

DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido realizar esta meta y dejarme vivir hasta este momento, ya que sin Él, no hubiera logrado nada.

A mis padres, Manuel Tapia López y Juana Lucrecia González Preciado, quienes me escuchan, me aconsejan y me alientan en todo momento; a ellos que me han apoyado anímica y económicamente para este logro.

A mis hermanas, Norma Elizabeth y Lilia Maribel, y a mi hermano Emmanuel, quienes han soportado mi ausencia, sin olvidarse de su hermano mayor; reconozco la falta de atenciones y el tiempo que a ellos he dejado de dedicarles, lo que trataré de compensar con el mismo apoyo y comprensión que mis padres han demostrado hacia mí.

A mis familiares allegados Felicitas Tapia López, Marina Tapia López y Martín Tapia López, que no dejan de apoyarme y alojarme en su hogar; sin su aliento diario y el alimento constante de alegría, no hubiese logrado esta meta.

A mi novia, Edna Guadalupe Ávila Villarreal y a su familia, por su aliento incondicional y el gran amor necesario para mantenerse vivo; a ella que llena mi vida y mi corazón de ese algo que solamente una pareja te puede dar.

A mis amigos, tan queridos, ni el deporte ni la diversión y mucho menos sus buenos consejos hubiesen sido posibles de no conocerlos; ellos saben bien quienes son y sabrán que este trabajo les ha sido dedicado.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis ha sido realizada en colaboración con el Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing (ERC/NSM), el cual desde Mayo de 1986 ha trabajado con compañías interesadas en la investigación avanzada en manufactura y, a la vez, entrena a estudiantes en el ramo de la investigación y desarrollo de tecnología dentro de la Ohio State University (OSU) en Columbus Ohio, EUA.

Extiendo mis más sinceros agradecimientos a todos y cada uno de aquellos que me alentaron y contribuyeron para la realización de esta tesis y para la obtención del grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería de Manufactura con especialidad en Diseño Mecánico.

Principalmente a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Ohio State University (OSU), instituciones que me dieron su apoyo, así como a las autoridades que facilitaron la obtención de este grado, el Dr. Rogelio Garza Rivera, director de la FIME; al Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez, Subdirector de la División de Estudios de Posgrado; y cada uno de los maestros de la División de Estudios de Posgrado, en especial a mis maestros y amigos M.C. Guadalupe E. Cedillo Garza, Dr. Francisco Eugenio López Guerrero, M.C. Francisco Ramírez Cruz, M.C. José Luis Castillo Ocañas, M.C. Francisco Javier de la Garza Salinas, Dra. Martha Patricia Guerrero Mata, Dr. Igor Litvinchev Semionovich y a mi compañera de estudios Claudia Patricia González Espinosa.

Un agradecimiento especial y exclusivo a la Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo, asesora, revisora, maestra y amiga; quien confió en mi persona al incluirme en sus proyectos de investigación dando origen al desarrollo de esta tesis en la OSU, ella que me ha apoyado desde mi obtención del grado de licenciatura hasta ahora en la maestría y en mi vida diaria. Gracias.

A todos aquellos que contribuyeron con su apoyo y ánimo, al M.C. Fernando Montemayor, revisor de esta tesis; al Dr. Moisés Hinojosa Rivera, a la M.C. Índira Gary Escamilla Salazar revisora de esta tesis y al M.C. Bernardo González Ortiz.

A mis compañeros y amigos que me apoyaron, al M.C. José de Jesús Villalobos Luna, Ing. Carlos Armando Lara Ochoa, Ing. Diego Francisco Ledezma Ramírez, M.C. Pedro López Cruz, M.C. Adrián García Mederez, M.C. Dante Alberto Jiménez Domínguez, M.C. Miguel Carrola González, Ing. Patricia González Guajardo, Ing. Cuauhtémoc Muñoz Arellano, Ing. Mario Alberto Saldaña García, M.C. María de Jesús Nández Rodríguez, M.C. Eleazar Sánchez Hernández, M.C. Jesús Herrera Bocanegra, Ing. José Ismael Portales Torres, Ing. José Antonio Rabelo Petruzza, Ing. Edith Miritza Ramírez Alvarado, Ing. Nelda Johana Gámez Treviño, M.C. Lilia Nelda Treviño Lara, M.C. Sergio Alberto Ramírez Guzmán, M.C. Ramiro Robledo Monsivais, M.C. Fernando Javier Elizondo Garza, Ing. Miguel Cúpich Rodríguez, M.C. Rolando Francisco Campos Rodríguez y M.C. César Guerra Torres.

A las señoritas secretarias Guadalupe Mata Alfaro, Rosa Nelly Robledo Cubillos y Josefina Cuevas Contreras por su apoyo y ánimo diario, su incondicional ayuda ante trámites académicos y administrativos semestre tras semestre; también al personal no docente que facilitó y sustentó anímica y culinariamente cada día de estudio, Jesús Mendoza Reyes y Luis Ernesto Cervantes Rojas (el Sr. Lonol y el Sr. Roedor).

Por último, y no menos importante, a mis compañeros, amigos y profesores en Columbus Ohio, con quienes conviví durante mi estancia en la OSU, Dr. José Castro y su apreciable familia, Dr. Taylan Altan, Dr. Mauricio Cabrera Ríos y esposa, Linda Anastasi, Ibrahim Al-Zkeri, Yingyot Aue-u-lan, Partchapol (Jay) Sartkulvanich, Siri Pan, Abelardo Garza Delgado, Francisco Jasso Lucio, José Saucedo, Claudia María López, Tania Treviño, Verónica Choroco, Luca D'Anna, Giovanni Spampinnato, Fabio Di Pietro, Paolo Bortot, Gianluca Buffa, Generoso Paolillo, Thashvin Muckatira, Ninad Nargundkar, Satish John, Hariarasudan Palanisawami, Vandana Vavilikolane, Anurag Jain, Akansha Misra, Manas Shirgaokar, Ajay Yadav, Vipul, Chandra, Mrinal Munshi, Sravani Vinapamula, Chirag Poojara, Cho, Hyunok Kim, Timo Ott, Marcus Dora, Meinhard Braedel, Hans-Jürgen Schöpp, Ed Morris, Andrea Aguinagalde, Aitor Uribexebarria, Edurne Iriondo, Jon Ander Esnaola y Serhat Kaya.

ÍNDICE

SÍNTESIS	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 Descripción del Problema	4
1.2 Objetivo de la Tesis.....	4
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Justificación del Estudio	5
1.5 Límites del Estudio	5
1.6 Metodología	6
CAPÍTULO 2 TORNEADO EN DURO	7
2.1 Ventajas del Torneado en Duro.....	8
2.2 Limitaciones del Torneado en Duro.....	8
2.3 Variables envueltas en el Torneado en Duro	8
2.3.1 Fuerzas en el Corte.....	9
2.3.2 Tipos y Mecanismos del Desgaste de la Herramienta	10
2.3.3 Rugosidad de la Superficie Maquinada	12
2.3.4 Esfuerzos Residuales.....	13
2.3.5 Capa Blanca	14
CAPÍTULO 3 MODELADO EN FEM DEL CORTE DE METALES.....	16
3.1 Métodos Experimentales para Procesos de Corte Ortogonal en 2D	16
3.2 Modelado del Corte en 2D usando FEM.....	18

3.3	Predicción de la Capa Blanca.....	19
CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....		23
4.1	Programa Ga101	23
4.1.1	Estructura del Programa.....	23
4.1.2	Ventajas y Limitantes.....	26
4.2	Datos Experimentales para la Validación del Ga101.....	27
4.3	Mecánica de la Formación de Capa Blanca	31
4.4	Predicción de la Formación de Capa Blanca usando FEM.....	34
4.5	Datos de Entrada para las Simulaciones en FEM	36
4.5.1	Materiales de la Herramienta y la Pieza de Trabajo	37
4.5.2	Condiciones de Corte	39
4.5.3	Condiciones Frontera	41
4.5.4	Condiciones de Contacto Herramienta-Pieza de Trabajo	43
4.5.5	Condiciones Térmicas de Estado Estable	44
CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN		46
5.1	Validación del Programa Ga101	46
5.1.1	Fuerzas en el Corte.....	47
5.1.2	Desgaste de Flanco de Herramienta.....	61
5.1.3	Rugosidad.....	63
5.1.4	Esfuerzos Residuales.....	65
5.1.5	Capa Blanca	70
5.2	Validación de las Predicciones Utilizando el Modelo de FEM	71
5.2.1	Predicción de Fuerzas en el Corte.....	71
5.2.2	Predicción de Capa Blanca.....	74
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		77
6.1	Conclusiones	77
6.2	Recomendaciones.....	80

REFERENCIAS	82
LISTADO DE FIGURAS	87
LISTADO DE TABLAS	91
LISTADO DE ECUACIONES	92
GLOSARIO	93
AUTOBIOGRAFÍA	95

SÍNTESIS

Este trabajo es parte de una investigación para desarrollar una manera precisa y manejable de predecir las variables envueltas en el torneado en duro. Un programa computacional llamado Ga101 ha sido previamente desarrollado para predecir y optimizar las variables del torneado en duro. Este programa es un avance para lograr el objetivo de dicha investigación, haciéndose necesario validarlo para ser utilizado en la práctica dentro de alguna compañía.

El objetivo de esta tesis es validar las capacidades del Ga101 (versión 1.0), que predice las variables envueltas en el corte (fuerzas, desgaste de flanco, rugosidad, capa blanca y esfuerzos residuales), utilizando datos experimentales encontrados en la literatura revisada. El trabajo de validación fue hecho a través de cuatro fases: (1) comprensión del programa y especificar sus limitaciones generales, (2) revisión de datos experimentales reportados en la literatura para formar una matriz de evaluación, (3) correr el programa usando las condiciones especificadas en los experimentos de la literatura, y (4) comparación y análisis de los resultados.

Aquí se incluye una breve descripción de la estructura del programa Ga101, sus ventajas y limitantes. También, los resultados y discusiones para cada una de las variables del torneado en duro predichas por el Ga101 se encuentran incluidas.

Así mismo, se reporta el estudio de la predicción de la capa blanca usando el método de elemento finito en dos dimensiones. El desarrollo y la validación del modelo de elemento finito se explican detalladamente para dar una mejor idea del mecanismo y las condiciones donde la capa blanca aparece; se incluyen los problemas encontrados en las simulaciones y la manera como se resolvieron.

Al final, se reportan los resultados y conclusiones, además del trabajo necesario para continuar apropiadamente con esta investigación.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El corte de metales es uno de los procesos de manufactura más frecuentemente utilizados para producir partes de formas y dimensiones requeridas, al remover el material no deseado utilizando herramientas con punta afilada. Este proceso puede ser considerado como un proceso de deformación, el cual está mayormente concentrado en una pequeña zona [Özel, 2000a].

Las compañías manufactureras, alrededor del mundo, constantemente buscan reducir costos para mantener la competitividad en la producción de componentes torneados. Globalmente, la calidad de los productos se ha mantenido en niveles aceptables y continúa mejorando, mientras que la presión en el costo por pieza es enorme y constantemente es influenciado negativamente por la competencia y estrategias de los compradores.

La tendencia es hacia la alta calidad, el bajo costo y un reducido inventario. Para poder competir contra países con mano de obra barata, es necesario buscar soluciones con nueva y apropiada tecnología que pueda ayudar a nivelar la competencia.

La tecnología juega un rol muy importante en el avance de la industria del corte de metal, y crea oportunidades para reducir costos y aumentar calidad. Considerando este rol que la tecnología ha jugado transformando las operaciones rutinarias del corte de metales, que antes eran críticas y completamente dependientes de las habilidades del operador; ahora, gracias a la tecnología, la maquinaria de control numérico computarizado (CNC) ofrece una mayor consistencia y confiabilidad en los procesos de corte de metales y es pieza clave en la calidad de las piezas terminadas y en los costos de producción.

Recientemente herramientas como sistemas de diseño asistido por computadora (CAD) en 3D, programación computarizada, paquetes de simulación, y por supuesto la maquinaria de CNC, son un común denominador en los talleres de corte de metal en los países industrializados. Una rápida adopción de estas nuevas tecnologías y de técnicas de costos de manufactura más efectivas, serán constantemente requeridas para poder mantener la competitividad de las operaciones de manufactura.

Debido a la importancia industrial y su amplio uso, la mecánica del corte ortogonal en el plano (el cual representa una muy buena aproximación a los procesos del corte de metales) comenzó a ser estudiado en los 40's [Mamalis, 2001], y desde entonces se han hecho considerables esfuerzos para desarrollar modelos capaces de predecir el comportamiento de las variables envueltas en el corte de metales.

La mayor barrera que enfrenta el torneado en duro, para ser aceptado ampliamente en la industria manufacturera, es la presencia de imperfecciones encontradas en la superficie terminada. Estas imperfecciones son frecuentemente llamadas "capa blanca" en la literatura, ya que aparece de color blanco después de ser pulida y revelada metalúrgicamente. Se cree que estas imperfecciones son causadas por el rápido calentamiento y enfriamiento de la pieza de trabajo a altos índices de deformación particulares de las operaciones de maquinado.

Se creó que la capa blanca tiene efectos negativos en la vida por fatiga de la pieza terminada. Esto debido a que tradicionalmente esfuerzos residuales a tensión son relacionados con operaciones de acabado. Pero, en el torneado en duro, los esfuerzos residuales han sido encontrados a tensión y a compresión, dependiendo de las condiciones en que se realiza la operación.

Usualmente el estudio de los procesos de corte se lleva a cabo realizando experimentos y examinando las variaciones en los resultados al variar los parámetros utilizados en el corte. Para esto, es necesario contar con una máquina libre para conducir los experimentos, lo cual no es siempre posible. Las máquinas son utilizadas para producción y no para estudio e investigación. Solamente las grandes compañías, con capital suficiente, tienen la capacidad de reservar una máquina e incluso para financiar una división de investigación en sus propias instalaciones.

Es por esta razón que resultados de experimentos y simulaciones realizados en otras instituciones han sido utilizados para comparar y validar el trabajo realizado en la presente tesis. Y, al mismo tiempo, se intenta motivar a la investigación y realización de experimentos en instituciones educativas apoyadas por la industria, quienes serían el principal beneficiario de los resultados que se obtengan.

1.1 Descripción del Problema

Un programa computacional llamado Ga101 ha sido previamente desarrollado para predecir y optimizar las variables del torneado en duro. Es necesario validar este programa para lograr, correctamente, su objetivo y poder ser utilizado en la práctica dentro de alguna compañía.

Así mismo, se ha reportado el estudio de la predicción de la capa blanca, usando el método de elemento finito, generada al torneado en duro con materiales específicos de la herramienta y de la pieza de trabajo.

1.2 Objetivo de la Tesis

En esta tesis se validarán las capacidades del Ga101 (versión 1.0), que predice las variables envueltas en el corte (fuerzas, desgaste de flanco, rugosidad, capa blanca y esfuerzos residuales), utilizando datos experimentales encontrados en la literatura revisada.

Se desarrollarán y validarán modelos de elemento finito, para predecir la formación de capa blanca y fuerzas en el corte, en el torneado en duro.

1.3 Hipótesis

Con base en resultados de experimentos y simulaciones es posible comparar y validar el programa Ga101 y los modelos de elemento finito que se desarrollen para evaluar las variables envueltas en el maquinado en duro.

El programa analítico Ga101, que predice las variables envueltas en el torneado en duro (fuerzas, desgaste de flanco, rugosidad, capa blanca y esfuerzos residuales), debe ser validado antes de ser comercializado o implementado en alguna compañía de torneado en duro. Dado que los valores que predice están basados en relaciones empíricas

y estadísticas entre las condiciones de corte y las variables de proceso obtenidas en experimentos previos de torneado en duro, estos valores experimentales previos pudieren no ser suficientes en el ajuste de las curvas estadísticas, haciéndolo insensible a cambios en algunos de los datos, arrojando así resultados erróneos en sus predicciones.

Los modelos de elemento finito y de esfuerzo de flujo, utilizados en simulaciones de arranque de viruta, deben de ser capaces de comportarse correctamente en altos rangos de esfuerzos, razones de deformación y deformaciones concentradas en una pequeña área. Al reproducir simulaciones validadas con resultados experimentales, pero calibradas con los mismos resultados experimentales, será posible validar los modelos de elemento finito.

1.4 Justificación del Estudio

El corte de metales es uno de los procesos de manufactura más frecuentemente utilizados para producir partes de formas y dimensiones requeridas.

Las condiciones del torneado así como los materiales y geometría de la herramienta y la pieza de trabajo utilizados, afectan las variables envueltas como las fuerzas en el corte, temperaturas, desgaste en el flanco de la herramienta, rugosidad de la superficie maquinada, esfuerzos residuales y capa blanca.

Un buen avance, para predecir estas variables de una manera fácil y rápida, ha sido logrado con el programa Ga101, el cual usa modelos empíricos para predecir dichas variables del torneado en duro. Este programa necesita ser evaluado y actualizado para lograr predicciones más exactas.

Esta investigación beneficiará directamente a la industria manufacturera del área de torneado de metales duros, facilitando la programación de sus procesos en la línea de producción. Así como también a la producción y desarrollo de nuevos materiales para herramientas de corte, capaces de soportar el desgaste y de ofrecer un mejor acabado en las piezas terminadas.

1.5 Límites del Estudio

Usualmente el estudio de los procesos de corte se lleva a cabo realizando experimentos y examinando las variaciones en los resultados al variar los parámetros

utilizados en el corte. Para esto, es necesario contar con una máquina libre para conducir los experimentos, lo cual no es siempre posible, ya que regularmente las máquinas son utilizadas para producción y no para estudio e investigación.

En esta tesis se tratarán exclusivamente las variables del proceso de torneado utilizando resultados experimentales, encontrados en la revisión de literatura disponible, para validar el programa Ga101 y apoyar el desarrollo de los modelos de elemento finito en DEFORM 2D ® (comparados con los modelos en ABAQUS ®).

1.6 Metodología

El trabajo de validación del programa Ga101 se hará a través de cuatro fases:

- 1) comprensión del programa y especificación de sus limitaciones generales,
- 2) revisión de datos experimentales reportados en la literatura para formar una matriz de evaluación,
- 3) probar el programa usando las condiciones especificadas en los experimentos de la literatura, y
- 4) comparación y análisis de los resultados

Para las simulaciones en elemento finito se realizará una investigación teórica sobre la formación de capa blanca y resultados experimentales obtenidos previamente. Así mismo, se diseñarán los modelos más adecuados para las simulaciones, comparando finalmente los resultados obtenidos con resultados de otras simulaciones y resultados experimentales encontrados en la literatura.

CAPÍTULO 2

TORNEADO EN DURO

El torneado en duro ha comenzado una evolución en el campo del maquinado. Se define como el proceso de corte con filo de piezas de trabajo hechas con materiales con valores de dureza superiores a 45 HRC (escala Rockwell “C”), pero típicamente los valores de durezas están en el rango de 58-68 HRC, sin ser previamente esmeriladas. Normalmente el torneado en duro se realiza con herramientas de corte de nitruro de boro cúbico (CBN) y/o cerámicas. Este proceso permite a los fabricantes incrementar la calidad del producto y su eficiencia, al mismo tiempo que se reducen los costos y el tiempo de procesamiento.

Relativamente, el torneado en duro es una tecnología nueva, la cual hace uso de maquinaria y herramientas avanzadas. Comparado con el esmerilado, como proceso de acabado de piezas, el torneado en duro es muy competitivo debido a su precisión y a que no necesita refrigerantes, lo cual da potenciales beneficios (el corte en seco es benéfico, ya que se elimina el costo del refrigerante así como el de su manejo como desecho [Gillibrand, 1996]). De cualquier manera, aún y con los numerosos beneficios que ofrece el torneado en duro, aún no ha sido bien aceptado por la industria manufacturera para realizar operaciones de acabado [Chou, 2003]. Esto se puede atribuir a la existencia de la capa blanca, debido a que se presume que afecta la vida de los componentes torneados [Guo, 2004], y a la corta vida y alto costo de las herramientas de corte utilizadas en el proceso.

Consecuentemente, la aplicación efectiva de esta tecnología en cuanto a costos, requiere de un entendimiento fundamental de la relación entre las variables envueltas y la vida de la herramienta, además de los tiempos-máquina involucrados [Fallböhmer, 2000].

2.1 Ventajas del Torneado en Duro

El torneado de materiales con alta dureza ofrece diversas ventajas, como la eliminación de distorsiones en la pieza acabada después del tratamiento térmico, bajas fuerzas en el corte, bajos costos de corte y una integridad de la superficie mejorada [Fallböhmer, 2000].

Otra de las principales ventajas al utilizar el torneado en duro es la reducción de la complejidad y de los tiempos requeridos para la manufactura de partes. En el proceso tradicional, después del desbaste la pieza es tratada térmicamente (endurecida) y después es acabada con un esmerilado (el esmerilado toma hasta 3 veces la complejidad y el tiempo que se requiere en el torneado en duro para maquinar una pieza), además, antes del desbaste, la pieza debe ser recocida para permitir el torneado de la pieza blanda (torneado en suave). Así, el acabado con torneado en duro elimina dos pasos complejos del proceso (recocido y esmerilado) y reduce el costo de procesamiento por pieza terminada.

2.2 Limitaciones del Torneado en Duro

En el torneado de metales duros se presentan altas temperaturas y esfuerzos en la interfase herramienta-pieza de trabajo. Las limitaciones más comunes en el torneado en duro son el desgaste de la herramienta, la necesidad de costosa maquinaria especial con varios ejes y controles, mantenimiento de la maquinaria, balanceo del portaherramientas y finalmente la más importante que es la necesidad de herramientas de corte con materiales avanzados dispuestos regularmente en capas y el alto costo de éstas [Fallböhmer, 2000].

Claramente, para las aplicaciones que envuelven una tolerancia muy reducida, trabajos complicados propensos a distorsiones o con materiales poco comunes, el esmerilado sigue siendo aún el proceso más adecuado.

2.3 Variables envueltas en el Torneado en Duro

Diversas variables están envueltas en el proceso del torneado en duro, estas variables afectan la fiabilidad del proceso mismo, y pueden ser controladas para alcanzar una buena calidad a bajo costo en los productos terminados. De cualquier manera, en el

torneado en duro, todas estas variables pueden ser manejadas modificando las condiciones de corte y la geometría de la herramienta de corte.

Después de revisar la literatura, se ha encontrado que diversos factores afectan las fuerzas y temperaturas en el corte, esfuerzos residuales, capa blanca, desgaste de la herramienta y rugosidad en el torneado en duro usando herramientas de CBN; estos factores y su influencia en las variables se muestran en el esquema de la Figura 2.1. En este esquema, los parámetros situados sobre las líneas punteadas son considerados los factores o entradas del proceso de torneado en duro que pueden ser seleccionadas al inicio del proceso (con excepción de la vibración de la herramienta). Los demás parámetros que se encuentran debajo de las líneas punteadas son considerados como variables o salidas del proceso de torneado en duro.

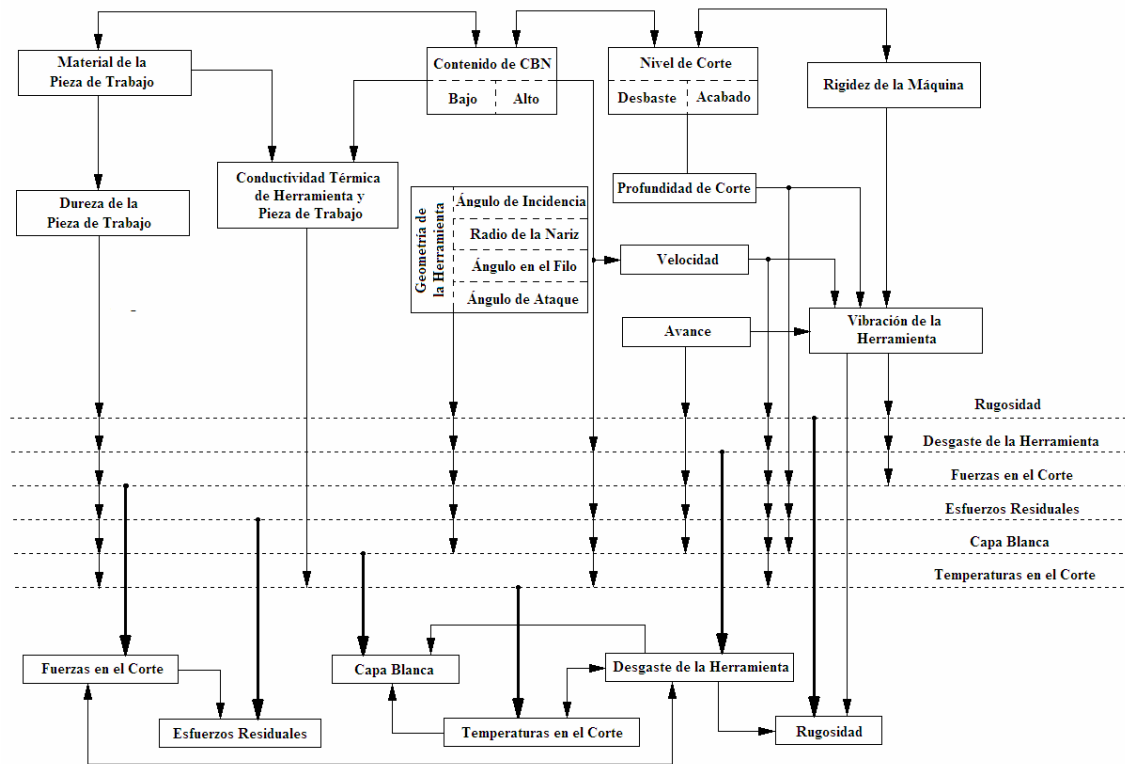


Figura 2.1 Esquema que ilustra la relación entre los factores y las variables en el torneado en duro.

2.3.1 Fuerzas en el Corte

En el torneado en duro de una barra sólida, a lo largo de la barra se encuentran las tres componentes de fuerza en el corte, como se muestra en la Figura 2.2. Estas fuerzas son: la fuerza de corte (F_C) en la dirección tangencial a la barra, la fuerza axial (F_{axial}) y

la fuerza radial (F_{radial}). La fuerza de empuje (F_T), corresponde a las fuerzas correspondientes a la condición analizada en 2D, y puede ser calculada con ayuda de la Ecuación 2.1.

$$F_T = \sqrt{F_{radial}^2 + F_{axial}^2} \quad (2.1)$$

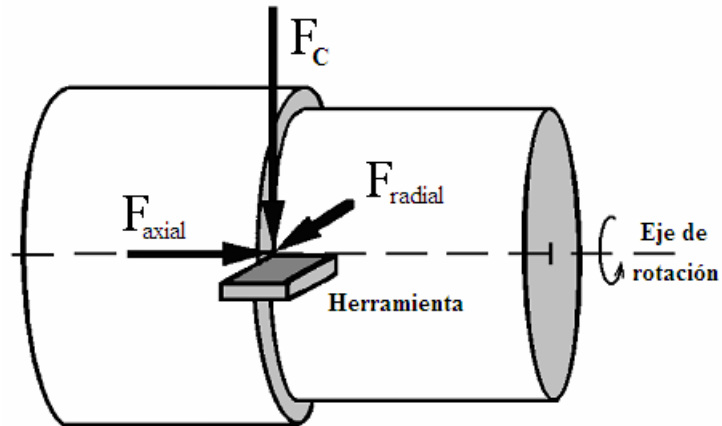


Figura 2.2 Componentes de las fuerzas en el corte producidas en el torneado convencional [Stephenson, 1997].

Ha sido demostrado, a través de experimentos y de simulaciones utilizando el FEM, que la fuerza de corte (F_C) tiene mayor magnitud que la fuerza de empuje (F_T); además, que estas fuerzas decrecen al incrementar la velocidad en el corte [Ng, 1999]. Al incrementar la velocidad, la temperatura en la zona de corte también aumenta; reduciendo así la resistencia del material de la pieza de trabajo lo que resulta en menores fuerzas en el corte.

2.3.2 Tipos y Mecanismos del Desgaste de la Herramienta

El desgaste de la herramienta está definido como la pérdida progresiva de material en la superficie de contacto que resulta de un movimiento relativo entre la herramienta y la pieza de trabajo y/o la viruta en sus respectivas interfaces [Chandrashekar, 2001]. El desgaste de la herramienta es uno de los problemas más comunes que se encaran durante las operaciones del corte de metales.

Los principales tipos de desgaste en la herramienta son el desgaste de flanco presente en el filo y el desgaste de cráter localizado en la cara de ataque. Hay otras formas de desgaste de la herramienta las cuales son menos importantes y poco comunes

ante condiciones normales de corte en el torneado en duro (como el borde acumulado que se muestra en la Figura 2.3).

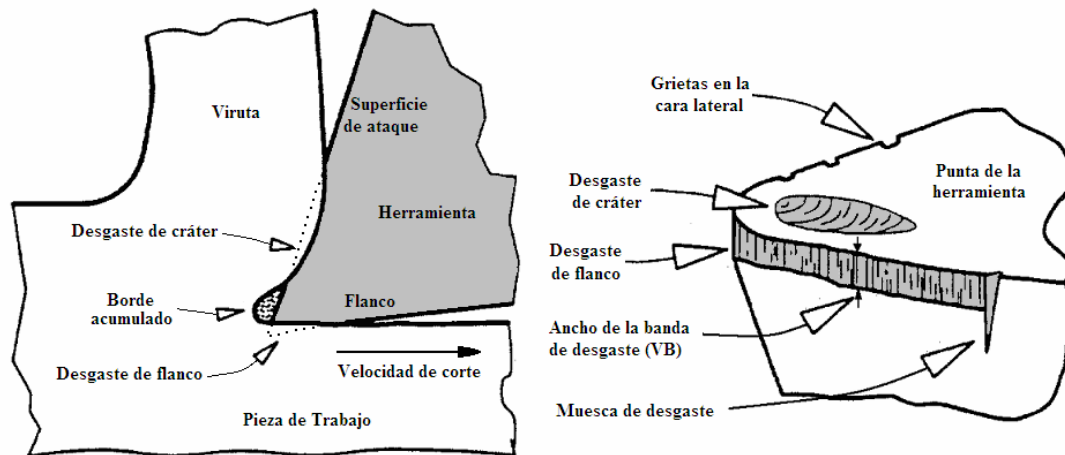


Figura 2.3 Localización típica de los desgastes de cráter y de flanco de la herramienta [Chandrashekar, 2001].

El desgaste de flanco es causado principalmente por abrasión ocasionada por el movimiento relativo entre la herramienta y la pieza de trabajo. Se mide en términos del ancho de la banda de desgaste (VB) mostrada en la Figura 2.3, la cual es a menudo el criterio utilizado para estimar el desgaste total de la herramienta.

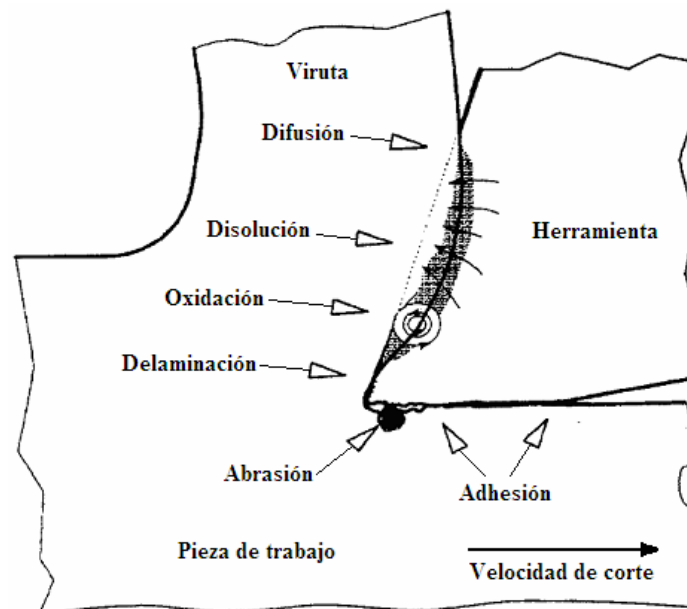


Figura 2.4 Diferentes mecanismos de desgaste de la herramienta [Chandrashekar, 2001].

El desgaste de cráter es la formación de una grieta que evoluciona en forma de cráter sobre la cara de ataque de la herramienta (Figura 2.3). Es causado por el movimiento relativo a alta temperatura entre la herramienta y la viruta.

En el proceso de corte están presentes diferentes mecanismos de desgaste, y todo el desgaste no puede ser atribuido a un simple y único mecanismo, todos estos mecanismos se combinan para resultar en el desgaste total de la herramienta.

De cualquier manera, en la práctica, se simplifica la estimación del desgaste de la herramienta considerando un mecanismo dominante que afecta mayormente al desgaste. Los diferentes mecanismos de desgaste mostrados en la Figura 2.4 son: abrasión, adhesión, delaminación, disolución, difusión y oxidación.

2.3.3 Rugosidad de la Superficie Maquinada

La rugosidad resultante después del corte es muy importante para determinar la calidad del producto terminado. En manufactura, el grado exacto de rugosidad puede ser considerado de gran importancia dado que afecta la funcionalidad del componente, su resistencia a la fatiga, tolerancias de ensamble, coeficiente de fricción, grado de desgaste, resistencia a la corrosión, estética y muy probablemente su costo [Feng, 2002].

Los valores de rugosidad son una consideración importante en el diseño de un componente y su uso en los dibujos ingenieriles ha ido creciendo. Un acabado preciso de un componente lo puede llevar a una mayor vida, y mejora su eficiencia entre otros beneficios.

La velocidad de corte, el desgaste de flanco y la geometría de la herramienta tienen un impacto significativo en la calidad superficial. También se ha observado que la dureza del material es importante, se ha encontrado que el comportamiento de la rugosidad cambia dramáticamente al cortar materiales con dureza sobre y bajo 50 HRC [Liu, 2002]. Para materiales bajo 50 HRC, la rugosidad decrece al bajar la dureza del material. Por su parte, sobre 50 HRC, la rugosidad decrece al aumentar la dureza del material. Así, hay algún efecto, ya sea una interacción o un fenómeno físico no visible, que hace de 50 HRC una dureza crítica en el torneado.

De acuerdo con Gillibrand, los valores experimentales de rugosidad a veces difieren de los valores teóricos hasta en un $100-300\%$, y también muestran una considerable variabilidad inherente [Gillibrand, 1996]. Existen dos causas primarias de esta variación: primeramente, el incremento en la rugosidad a bajas velocidades se debe al borde acumulado, el cual resulta de la adhesión entre la pieza de trabajo y la

herramienta como se puede ver en la Figura 2.4 (el borde acumulado puede ser evitado al usar altas velocidades de corte, resultando en una rugosidad baja); finalmente, la rugosidad puede ser reducida al incrementar el avance de la herramienta.

Este segundo punto fue obtenido al comparar resultados de rugosidad teóricos con resultados prácticos, Gillibrand obtuvo, al cortar acero de alto contenido de carbono, valores mínimos de rugosidad a un avance específico y dicha rugosidad aumentaba al reducir el avance. La razón del incremento en la rugosidad eran los pequeños valores de espesor de la viruta sin cortar, resultado del avance tan pequeño que se aplica.

También, se ha demostrado que, la vibración de la herramienta puede ser un factor que revele el cambio en la rugosidad del elemento acabado [Abouelatta, 2001] y, por lo tanto, dicha vibración puede ser utilizada para establecer el final de la vida de la herramienta en las operaciones de torneado.

Finalmente, se han desarrollado diversos modelos empíricos utilizando regresión no lineal con transformación logarítmica de datos para estimar la rugosidad del componente a específicas condiciones de corte en el torneado [Feng, 2002]. Dichos modelos han mostrado mejores resultados que cuando se utiliza la Ecuación 2.2.

$$R_a = \frac{1}{32} \frac{(\text{avance})^2}{\text{radio de nariz}} \quad (2.2)$$

2.3.4 Esfuerzos Residuales

Los esfuerzos residuales, por definición, son aquellos que están presentes en un cuerpo aún y cuando no tiene ninguna fuerza externa aplicada. Son producidos por un flujo plástico no homogéneo causado por factores externos como efectos estructurales, aleación, cambios de fase, efectos térmicos, causando así expansiones diferenciales entre diferentes elementos constituyentes del mismo material [Ramesh, 2002].

Debido a su naturaleza y a como pueden ser creados, los esfuerzos residuales pueden ser a tensión o a compresión, a diferentes profundidades desde la superficie maquinada. La penetración en la profundidad de un esfuerzo residual a compresión producido en el esmerilado es menor que el producido en el torneado en duro [Guo, 2004].

En el maquinado, los esfuerzos residuales son el resultado de interacciones de efectos mecánicos y térmicos. Se cree que tres distintos fenómenos contribuyen a la formación de esfuerzos residuales durante el maquinado en duro:

- 1) deformaciones plásticas no homogéneas de la pieza de trabajo (inherentes al proceso de corte que llevan a esfuerzos residuales a compresión),
- 2) flujo de material y cargas causadas por fuentes térmicas (gran cantidad de calor generada en la primera y segunda zonas de corte, Figura 2.5, debida a la deformación plástica), y
- 3) cambio de fase (llevando a una expansión volumétrica durante el torneado).

La vida útil de los componentes torneados se relaciona con los esfuerzos residuales. Así, la resistencia a la fatiga, el deslizamiento y el esfuerzo de ruptura por corrosión son influidos por la naturaleza y magnitud de los esfuerzos residuales presentes en el componente.

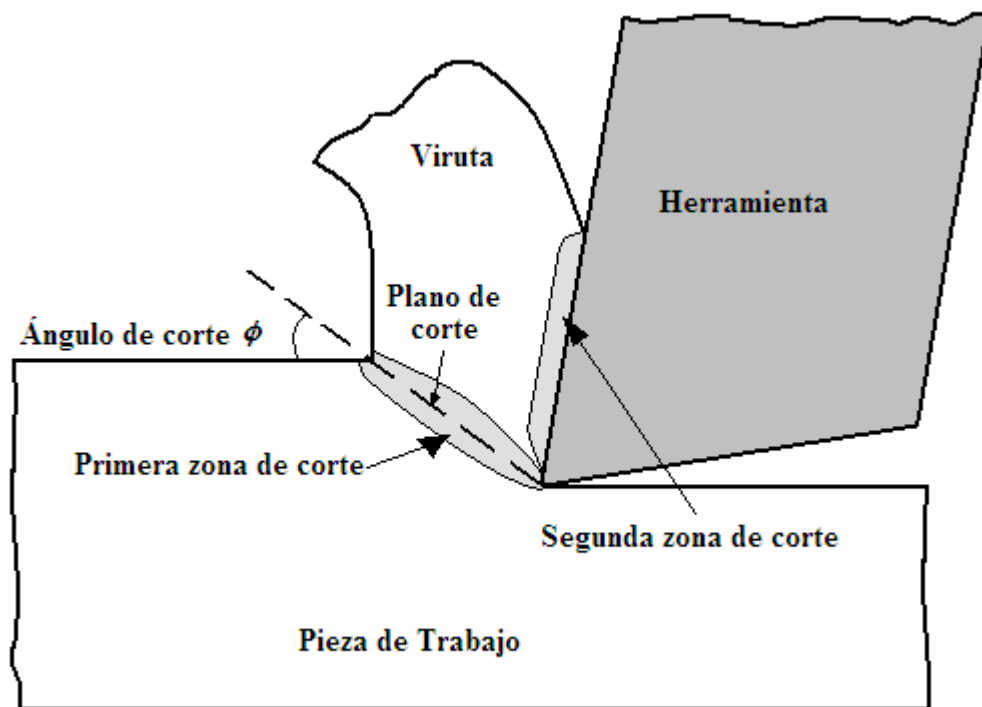


Figura 2.5 Localización de la primera y segunda zonas de corte.

2.3.5 Capa Blanca

La capa blanca es una banda delgada de material que se extiende desde unos cuantos micrones hasta varias decenas de micrones a partir de la superficie maquinada y

es el resultado de una alteración microestructural en una estructura martensítica. Se le llama “blanca” debido a que aparece de este color bajo el microscopio óptico después de haber sido preparada y atacada para revelar la microestructura.

La capa blanca no es solamente más dura que el resto del material de la pieza de trabajo, sino que también es frágil y con una buena resistencia a la corrosión, e invariablemente acompañada de esfuerzos residuales a tensión [Barry, 2002]. Puede ser encontrada en varios procesos de corte como el torneado en duro, escariado, esmerilado, taladrado, fresado y maquinado por descarga eléctrica; y en procesos de formado (laminado) y de impacto (forjado) [Guo, 2004].

De acuerdo con Poulachon, el espesor de la capa blanca es un indicador de la cantidad de la energía que se aplica en la pieza de trabajo; la capa blanca puede extenderse hasta $50\mu m$ en operaciones de desbaste con herramientas desgastadas [Poulachon, 2005], de cualquier manera, el maquinado en duro raramente se lleva a cabo en estas condiciones, sino bajo condiciones de acabado; de esta manera, en condiciones de acabado y con herramientas afiladas, el espesor de la capa blanca se reduce a menos de $1\mu m$.

La formación de capa blanca en el maquinado en duro, puede ser causada por una severa deformación que causa un refinamiento en el grano, una reacción de la superficie con el ambiente, o una serie de cambios de fase resultado del rápido calentamiento y enfriamiento de la superficie [Griffiths, 1987b].

La capa blanca se considera un problema debido a su fragilidad y a que su espesor aumenta al incrementar el desgaste de flanco de la herramienta. De acuerdo a la formación de capa blanca en ciertos materiales, estos se dividen en dos tipos [Poulachon, 2005]: materiales con una microestructura fina que generan una gran formación de capa blanca; y los materiales con una microestructura burda, que generalmente incrementan la rugosidad de la superficie, los cuales generan una capa blanca muy pequeña.

Ha sido establecido que en las superficies endurecidas, la alta resistencia al desgaste y la estabilidad térmica de la capa blanca deben considerarse como ventajas tribológicas [Poulachon, 2005]. De cualquier manera, la dureza y la fragilidad de la capa blanca facilitan la formación y propagación de microgrietas, lo cual afecta directamente la resistencia al desgaste y a la fatiga en el componente torneado.

CAPÍTULO 3

MODELADO EN FEM DEL CORTE DE METALES

3.1 Métodos Experimentales para Procesos de Corte Ortogonal en 2D

El proceso del corte ortogonal en 2D puede llevarse a cabo siguiendo cualquiera de los siguientes tres métodos [Chandrashekar, 2001]:

- 1) El torneado de un tubo de pared delgada: la operación de corte se lleva a cabo en todo el espesor de un tubo, a partir de uno de sus extremos y avanzando longitudinalmente, como se muestra en la Figura 3.1.

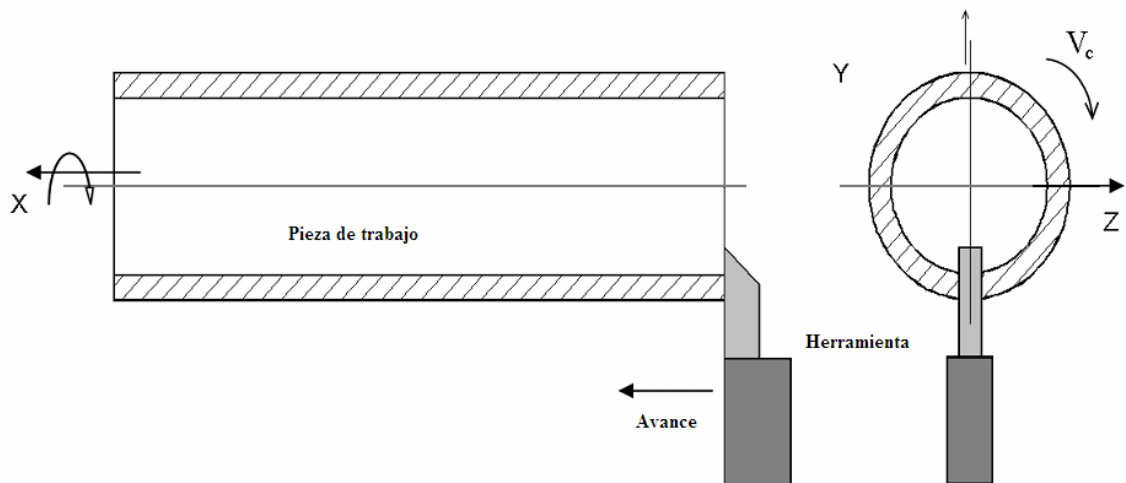


Figura 3.1 Condición de corte ortogonal del torneado de un tubo de pared delgada.

- 2) El torneado de un disco sujeto en una barra sólida: la operación de corte se lleva a cabo en el disco, avanzando radialmente, como se muestra en la Figura 3.2.

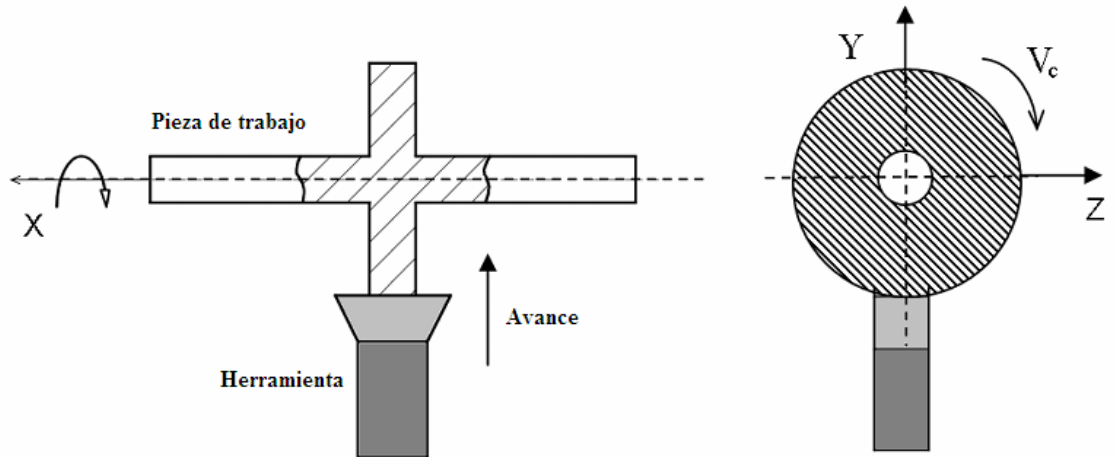


Figura 3.2 Condición de corte ortogonal del torneado de un disco en una barra sólida.

- 3) El corte convencional de una barra sólida (corte en 3D): se utiliza la barra sólida a velocidad de corte (V_c) especificada por las revoluciones por minuto (N) para realizar experimentos en tres dimensiones. A diferencia del proceso de corte ortogonal en 2D del tubo de pared delgada, en el torneado convencional de barra sólida, el proceso de corte se realiza a lo largo del diámetro con la ventaja de que se pueden hacer varias pasadas en la misma pieza de trabajo para las mismas o para diferentes condiciones de corte. El proceso de corte convencional de una barra sólida se muestra en la Figura 3.3.

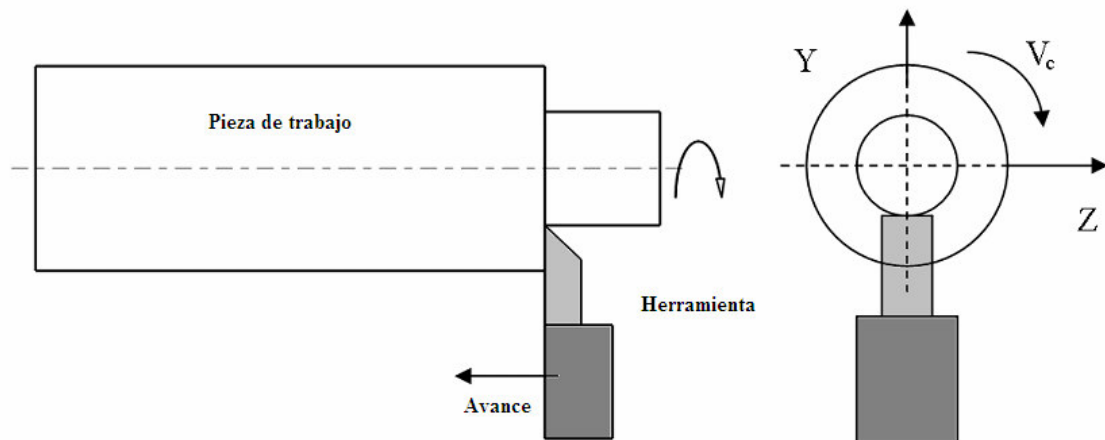


Figura 3.3 Condición del corte convencional de una barra sólida.

3.2 Modelado del Corte en 2D usando FEM

Si el filo de la herramienta es perpendicular a la dirección de corte en 3D, o a la velocidad de corte, y también si el avance de la herramienta es muy pequeño comparado con la profundidad de corte, entonces la deformación plástica se encuentra en la condición de deformación en el plano. Este tipo de operación es conocida como corte ortogonal en 2D.

El proceso de corte ortogonal sigue los siguientes requerimientos [Chandrashekar, 2001]: (1) el filo es una línea recta perpendicular al plano de movimiento, (2) la viruta solamente se mueve en la dirección del plano de movimiento, y (3) el ancho de la herramienta es más grande que la porción cortada de la pieza de trabajo.

El corte convencional de una barra sólida se puede aproximar al corte ortogonal por el modelo de deformación en el plano mostrado en la Figura 3.4, siguiendo las siguientes acepciones [Jain, 2001]: (1) la profundidad de corte (d_c) es lo más grande que el avance de la herramienta (f) $d_c > f$, (2) el radio de la nariz es muy pequeño comparado con la profundidad de corte d_c , (3) la inclinación de la herramienta es mantenida a cero grados, y (4) el ancho de corte w_c es mayor que la profundidad de corte d_c ($w_c > d_c$).

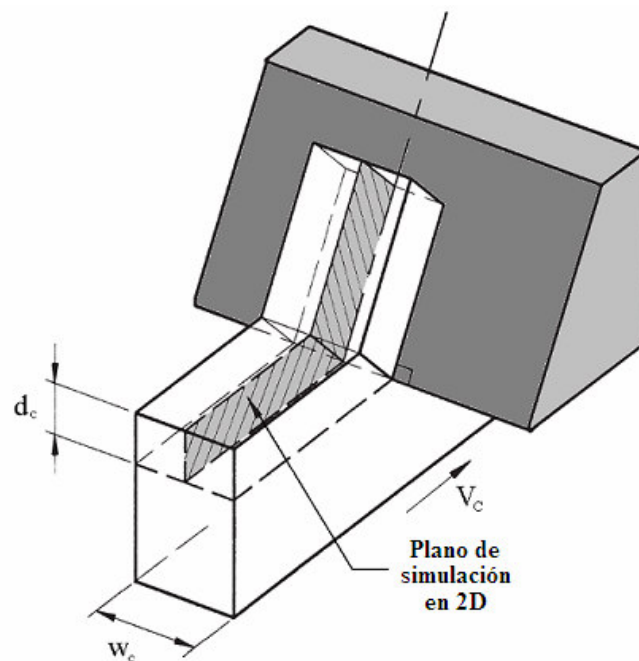


Figura 3.4 Modelo de deformación en el plano.

Los parámetros importantes en la operación del torneado son el ángulo de ataque y el ángulo de incidencia. La representación esquemática del proceso de corte en 2D se muestra en la Figura 3.5 y los parámetros envueltos se listan en la Tabla 3.1.

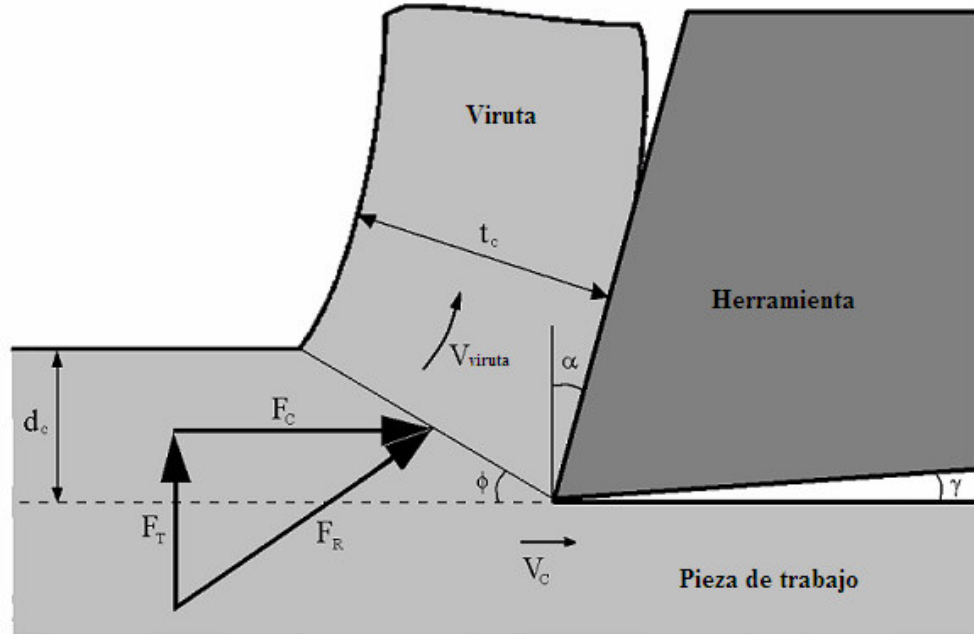


Figura 3.5 Diagrama de fuerzas en el corte ortogonal en 2D [Chandrashekar, 2001].

Tabla 3.1 Parámetros presentes en el modelo de deformación en el plano.

F_C = Fuerza de corte	V_C = Velocidad de corte
F_T = Fuerza de empuje	d_c = Profundidad de corte (f)
F_R = Fuerza resultante	ϕ = Ángulo de corte
t_c = Espesor de la viruta	α = Ángulo de ataque
V_{viruta} = Velocidad de la viruta	γ = Ángulo de incidencia

Las acepciones de deformación en el plano constituyen una aproximación razonable, ya que en la práctica el ancho del corte es al menos cinco veces más grande que la profundidad de corte [Mamalis, 2001], por lo tanto, la viruta es producida bajo condiciones muy cercanas a las de deformación en el plano.

3.3 Predicción de la Capa Blanca

El modelado de la formación de capa blanca usando el método de elemento finito (FEM) no ha tenido un desarrollo significativo. El FEM es una herramienta muy llamativa para la obtención de fuerzas en el corte, distribución de esfuerzos, **F.I.M.E.** **U.A.N.L**

deformaciones y temperatura en la herramienta y pieza de trabajo. De cualquier manera, para modelar la formación de la capa blanca, primero necesita construirse un modelo termomecánico.

Por lo tanto se intenta simular la formación de capa blanca asegurando los efectos térmicos con condiciones de corte a alta velocidad y alto desgaste de la herramienta.

Los paquetes de simulación de FEM, actualmente, no cuentan con la capacidad de introducir el modelo de cambio de fase. Es por esto que el cambio de fase en la pieza de trabajo se debe de suponer a una cierta temperatura [Ramesh, 2002], como se describe en los siguientes párrafos.

En la Figura 3.6, A_s y M_s se refieren a las temperaturas a las cuales el cambio de fase a austenita y martensita, respectivamente, comienzan.

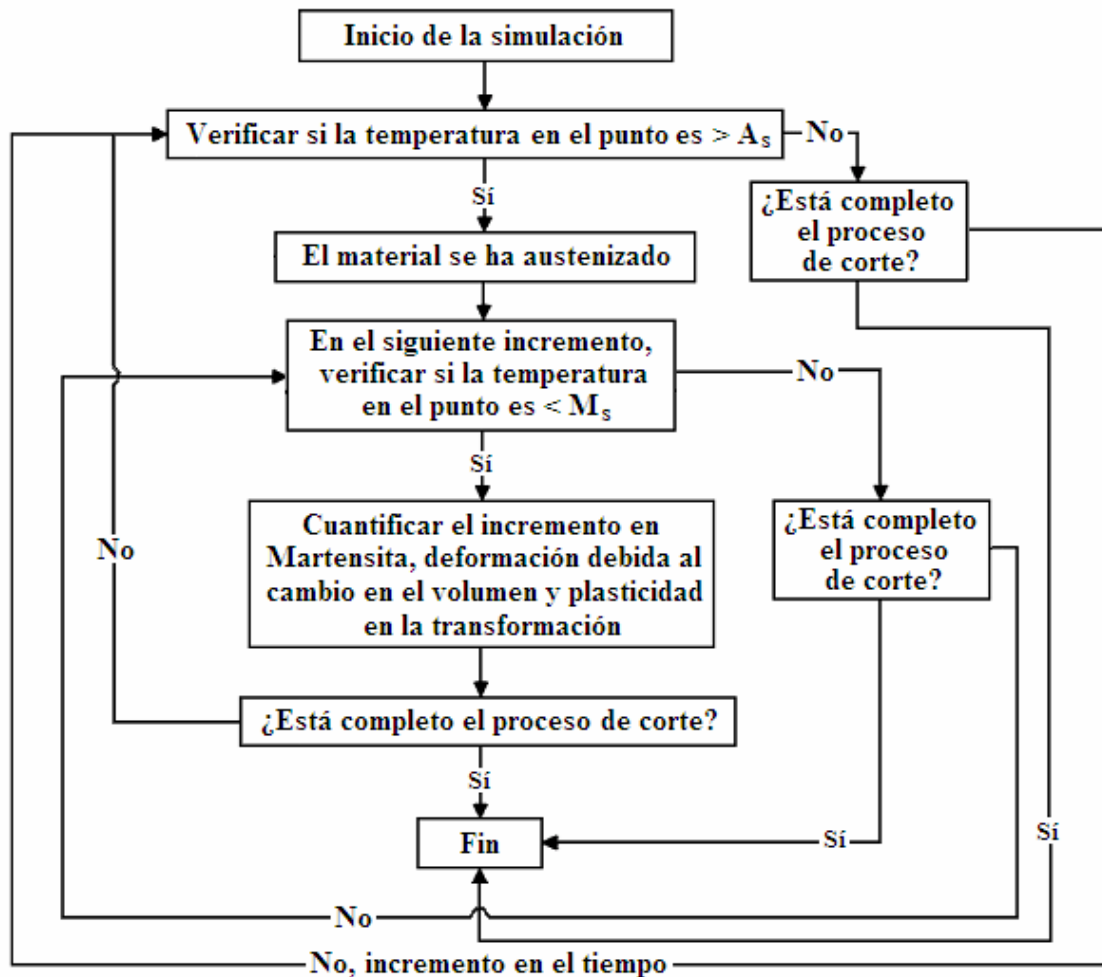


Figura 3.6 Procedimiento para la predicción del cambio de fase en el torneado en duro [Ramesh, 2002].

experimental de la capa blanca con el perfil de temperaturas obtenido en las simulaciones de FEM a las mismas condiciones [Ramesh, 2002]. Así, se encontró que las temperaturas a las que la capa blanca se forma serían 570.77°C y 547.79°C para avances de 0.127 mm/rev y 0.178 mm/rev , respectivamente; siendo estas temperaturas, las que se utilizaron para predecir la formación de capa blanca en los casos donde las velocidades de corte fueron 213.36 m/min y 274.32 m/min .

CAPÍTULO 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Programa Ga101

El programa Ga101 fue desarrollado por la Ing. Jing Ying Zhang y el Dr. Steven Y. Liang en el Georgia Institute of Technology (Ga Tech), como parte de un proyecto apoyado por el gobierno norteamericano. Este programa analítico predice y optimiza las variables involucradas en el torneado en duro. En este reporte se incluye la validación de la parte de predicción de variables, comparadas con resultados experimentales encontrados en la revisión bibliográfica de la literatura disponible.

4.1.1 Estructura del Programa

La estructura del programa Ga101 versión 1.0 se ilustra en el diagrama de la Figura 4.1. El programa requiere información acerca de la herramienta, la pieza de trabajo y las condiciones de corte. La información acerca de herramienta de corte incluye el grado de CBN (nitruro de boro cúbico) y su geometría (radio de la nariz, ángulo de ataque, ángulo en el filo y ángulo de incidencia). Los insertos de la herramienta incluidos en el programa se limitan a cinco:

- 1) Kennametal KB5625 (recubierta, bajo CBN 65%),
- 2) Kennametal KD050 (bajo CBN 50%),
- 3) Kennametal KD120 (alto CBN 93%),
- 4) Sumitomo BN250 (bajo CBN 60%), y
- 5) KY4400 (cerámico mixto).

El material y los coeficientes del desgaste son la información necesaria con relación a la pieza de trabajo. El usuario puede escoger entre tres diferentes materiales

de trabajo (AISI 52100, AISI 1053, AISI 1070) previamente especificados en el programa, o utilizar la opción de material “definido por el usuario” en la cual el usuario tendrá que introducir los datos de las propiedades del material (calor específico, conductividad térmica, densidad, punto de fusión y los parámetros de Johnson-Cook).

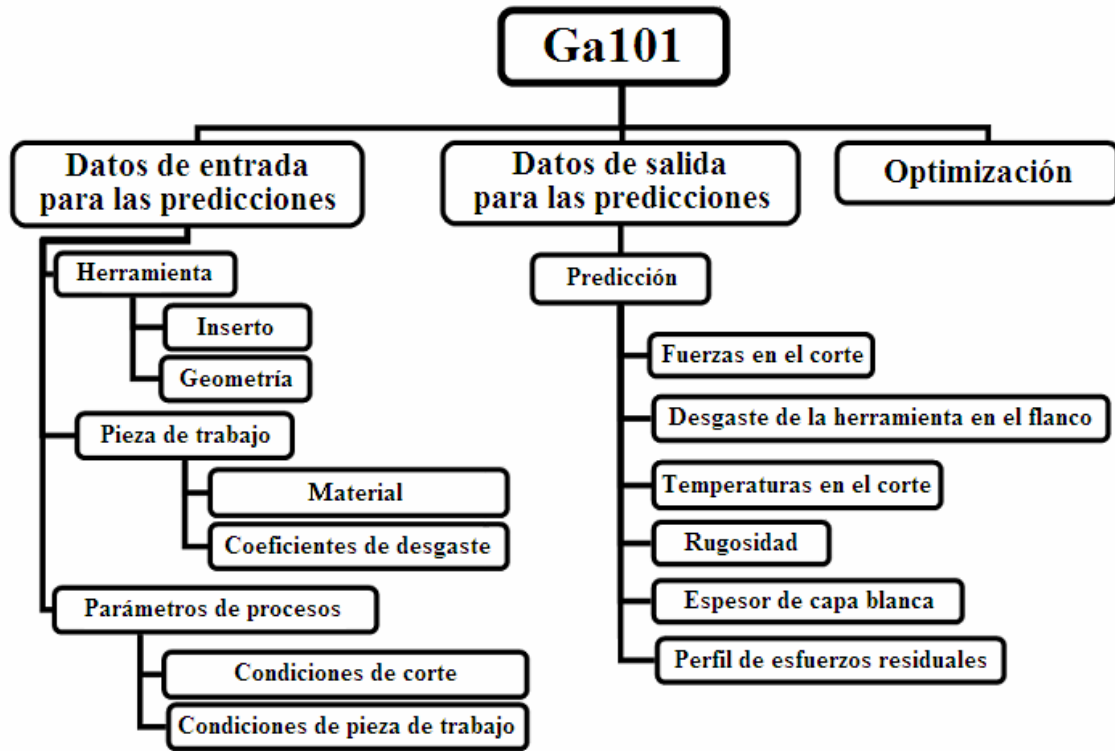


Figura 4.1 Diagrama del programa Ga101.

Los coeficientes de desgaste (constantes), requeridos para el cálculo de desgaste de flanco y de su influencia en otras variables del proceso, son $K_{abrasión}$, $K_{adhesión}$, a , K_{diff} y K_Q . Estas constantes son partes del modelo de desgaste de flanco en el que se representan tres mecanismos de desgaste (abrasión, adhesión y difusión). La Ecuación 4.1 representa este modelo.

$$\frac{dVB}{dt} = \frac{(\cot \gamma + \tan \alpha)R}{VB(R - R \tan \gamma)} \left\{ \begin{array}{l} K_{abrasión} K \left(\frac{P_a^{n-1}}{P_t^n} \right) V_c VB \sigma \\ + K_{adhesión} e^{aT} V_c \sigma \\ + K_{diff} \sqrt{V_c VB} e^{-\frac{K_Q}{T+27}} \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

Aquí $\frac{dVB}{dt}$ es la razón de desgaste de flanco (m/s), γ es el ángulo de incidencia, R es el radio de la nariz (m), VB es el desgaste de flanco en la herramienta (m), T es la temperatura ($^{\circ}K$), σ es el esfuerzo de cedencia del material (N/m^2), K es una constante adimensional, V_c es la velocidad de corte (m/s), $K_{abrazión}$ es un coeficiente relativo al desgaste abrasivo (m^2/N), $K_{adhesión}$ y a son coeficientes relativo al desgaste adhesivo (m^3/N y $1/^{\circ}K$ respectivamente), K_{diff} es un coeficiente relativo al desgaste por difusión (m/s^2), K_Q es un coeficiente relativo a la activación de energía por difusión ($^{\circ}K$), n es una constante adimensional, P_a es la dureza de la partícula abrasiva (N/mm^2), y P_t es la dureza de la herramienta (N/mm^2).

Después de introducir la información de la pieza de trabajo, se deben de introducir los parámetros del proceso. Los parámetros del proceso incluyen las condiciones de corte (velocidad de corte, avance y profundidad de corte) y de la pieza de trabajo (longitud de corte, diámetro y número de partes). En las Figura 4.2 y Figura 4.3 se muestra la definición de las condiciones de corte y de la pieza de trabajo, respectivamente, con sus unidades como se especifican en el programa Ga101.

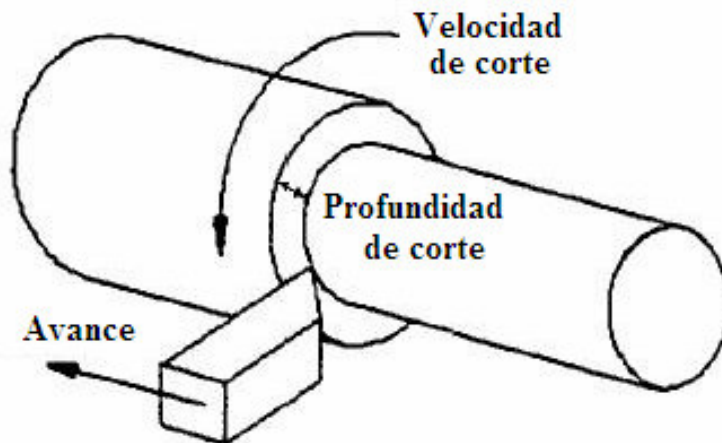


Figura 4.2 Velocidad de corte (m/min), avance (mm/rev) y profundidad de corte (mm).

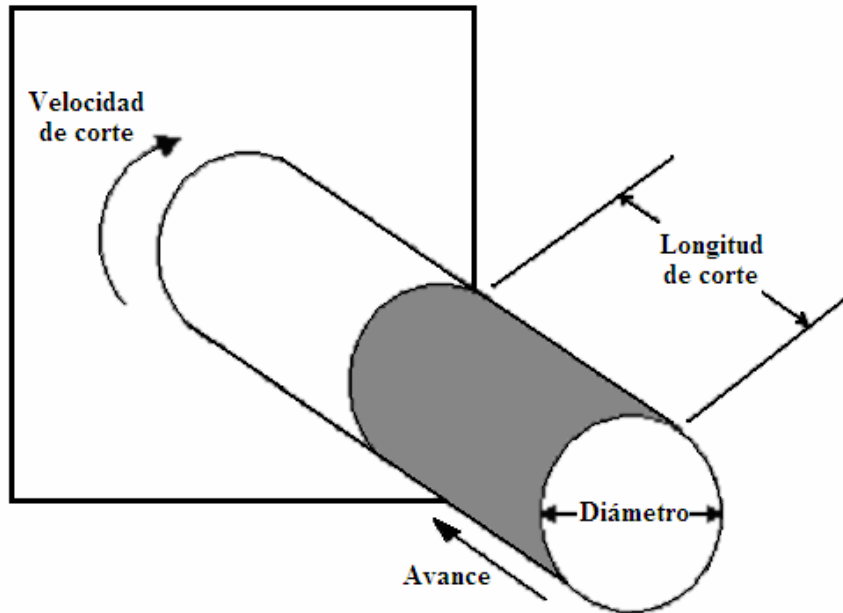


Figura 4.3 Definición de longitud de corte y diámetro en la pieza de trabajo, ambos en mm.

4.1.2 Ventajas y Limitantes

Algunas de las ventajas del Ga101 son:

- 1) Su simplicidad y facilidad de uso,
- 2) Tiene un amigable ambiente de ventanas,
- 3) El tiempo de cálculo es corto (menos de 5 segundos),
- 4) Permite el uso de geometrías de herramienta y condiciones de corte personalizadas,
- 5) Predice las variables del proceso de torneado en duro más utilizadas en la práctica, y
- 6) Genera los resultados en un formato organizado y con gráficas en el caso de las predicciones de los perfiles de esfuerzos residuales (esfuerzo vs. profundidad).

Por otro lado, las limitantes o desventajas del programa son:

- 1) Los tipos de inserto de la herramienta se limita a 5 predefinidos en el programa (la opción de herramienta definida por el usuario aún no esta activa),
- 2) No se especifica el material de los insertos ni la dureza y composición química de los materiales de la pieza de trabajo predefinidos en el programa,
- 3) La opción de pieza de trabajo definida por el usuario no funciona,
- 4) Las unidades utilizadas para definir los datos de entrada son inconsistentes obligando al usuario a convertir valores entre los sistemas internacional e inglés lo que puede llevar a posibles errores humanos,

5) Las condiciones de corte están limitadas a un rango muy estrecho:

Velocidad de corte	$91.44 - 182.88 \text{ m/min}$
Avance	$0.051 - 0.152 \text{ mm/rev}$
Profundidad de corte	$0.102 - 0.305 \text{ mm}$

6) El modelo de desgaste de la herramienta utilizado por el Ga101 es muy complejo lo que obliga a realizar un enorme trabajo experimental para definir los parámetros necesarios ($K_{\text{abrasión}}$, $K_{\text{adhesión}}$, K_{diff} y K_Q) ya que no son fáciles de encontrar en la literatura.

4.2 Datos Experimentales para la Validación del Ga101

Se llevó a cabo una revisión de la literatura disponible para recolectar datos experimentales que pudiesen ser utilizados para la evaluación y validación de los resultados obtenidos en el programa Ga101 (fuerzas en el corte con herramienta nueva y desgastada, desgaste de flanco de la herramienta, rugosidad, esfuerzos residuales y capa blanca). Las referencias encontradas contienen solamente datos del torneado en duro de AISI 52100, ya que no se encontró información acerca de los otros dos materiales (AISI 1053 y AISI 1070) incluidos en el programa.

Thiele reportó resultados experimentales del corte de AISI 52100 (con diferentes durezas: 41, 47 y 57 HRC) torneadas con insertos KD050 y Valentine (VC722) [Thiele, 1999a]. La rugosidad y fuerzas de corte, que fueron medidas después de maquinar piezas de AISI 52100 (57 HRC) con una herramienta afilada ($< 25.4 \mu\text{m}$), son consideradas en este trabajo. En otro reporte, Thiele presenta mediciones de perfiles de esfuerzos residuales al cortar aleaciones con dureza de 57 HRC [Thiele, 1999b]. Un caso experimental en el que se utiliza el inserto con un cierto ángulo en el filo, es considerado en dicho reporte. Un año más tarde, el mismo Thiele reportó mediciones adicionales de esfuerzos residuales al cortar AISI 52100 (57 HRC) usando dos geometrías en los insertos (afilado y con ángulo en el filo) a diferentes avances [Thiele, 2000]. También, se incluyeron algunos resultados de la formación de capa blanca para las mismas condiciones pero usando solamente insertos con ángulo en el filo. Thiele usó el método de difracción de rayos X para medir los esfuerzos residuales presentados en las últimas dos referencias mencionadas.

Dawson torneó piezas de trabajo de AISI 52100 (62 HRC) con cuatro insertos con diferentes grados de CBN, variando las condiciones de corte tratando de optimizar el proceso de maquinado en duro en términos de vida de la herramienta [Dawson, 2001]. Adicionalmente al estudio de las tendencias del desgaste de flanco, Dawson incluyó datos experimentales que muestran el efecto del avance en la rugosidad de la superficie torneada con una herramienta afilada. Debido a la falta de coeficientes de desgaste de las herramientas que usó Dawson, en el presente estudio se utilizarán sólo las relaciones entre avance y rugosidad, al cortar con una herramienta afilada.

Posteriormente, en su tesis, Dawson presentó resultados experimentales donde usó diversas combinaciones de AISI 52100 (62 HRC) y diferentes insertos de CBN (KD120, KD050, BN600, BN250, BNC200, BNC80, BNX10, KB5625 y Sandvik 7020), reportando fuerzas en el corte con herramienta afilada y desgastada [Dawson, 2002]. Solamente una combinación (AISI 52100 con KD050) fue seleccionada y usada para validar las predicciones del Ga101, debido a la falta de coeficientes de desgaste para el resto de los materiales de las herramientas de corte.

Chou condujo experimentos de maquinado en duro en acero AISI 52100 (61-63 HRC) usando cuatro insertos de CBN: GE BZN6000 (alto CBN), BZN81000 (bajo CBN), Sumitomo BN200 (bajo CBN) y BN300 (bajo CBN) [Chou, 2002]. Los últimos dos insertos fueron probados a rangos limitados de condiciones de corte. Los resultados experimentales de rugosidad de la pieza de trabajo y de desgaste en el flanco de la herramienta presentados en dicha referencia fueron obtenidos con un avance de 0.013 mm/rev el cual es mucho menor al rango definido en el programa Ga101 ($0.051 - 0.152\text{ mm/rev}$).

Mas tarde, el mismo Chou llevó a cabo experimentos con el mismo material en la pieza de trabajo, pero utilizando insertos de carburo de titanio [Chou, 2004]. Debido a la falta de los parámetros de desgaste para la herramienta utilizada, en este trabajo sólo se utilizaron los resultados experimentales de fuerzas en el corte con herramienta afilada. Otros resultados experimentales fueron por Chou, como capa blanca, pero no fueron utilizados en esta validación porque el rango de avances utilizados ($0.305 - 0.584\text{ mm/rev}$) son mayores que los especificados en el programa Ga101 ($0.051 - 0.152\text{ mm/rev}$).

Huang, en su tesis presenta resultados de fuerzas al torneear AISI 52100 (62 HRC) con insertos KD050 afilados y desgastados [Huang, 2002]. También incluyó un modelo de desgaste de flanco similar al que se utiliza en el programa Ga101 con coeficientes obtenidos de experimentos donde se utilizaron las mismas combinaciones de herramienta pieza de trabajo. Estos coeficientes son utilizados para cálculos del desgaste de la herramienta siempre que se utilicen insertos KD050. Posteriormente, Huang condujo experimentos de torneado de AISI 52100 (62 HRC) usando insertos KD050, reportando mediciones de desgaste de flanco las cuales fueron utilizadas en esta validación de las predicciones del programa Ga101 [Huang 2004]. En adición, se encontraron estimaciones de la temperatura promedio de la herramienta en la interfaz con el inserto, pero no fueron utilizadas debido a que el método analítico utilizado no era lo suficientemente robusto.

Ramesh en su tesis determinó un modelo de esfuerzo de flujo para acero AISI 52100 usando experimentos de corte ortogonal [Ramesh, 2002]. Este modelo fue utilizado para evaluar el funcionamiento de la opción de material de la pieza de trabajo definida por el usuario del programa Ga101. Posteriormente, Ramesh usó insertos KD050 para torneear AISI 52100 (62 HRC) y, entonces, midió los perfiles de esfuerzos residuales usando el método de difracción de rayos X y reportó la existencia de capa blanca [Ramesh, 2005]. Una sola de las condiciones de corte (velocidad de corte de 91.44m/min) fue utilizada en este trabajo ya que era la única que se ajustaba al rango del programa Ga101 ($91.44 - 182.88\text{ m/min}$).

Diniz reportó los resultados experimentales de rugosidad y desgaste de flanco al torneear acero AISI 52100 (58-60 HRC) con insertos Sandvik clase CB 7020 desgastados [Diniz, 2003]. Pero no fueron utilizados en esta validación, ya que no se encontraron los coeficientes de desgaste del inserto CB 7020 y su geometría no estaba claramente definida.

En trabajos experimentales más recientes hechos por Dahlman, piezas de trabajo de acero AISI 52100 (62 HRC) fueron torneadas usando insertos de Seco (CBN100) con mediciones de perfiles de esfuerzos residuales usando el método de difracción de rayos X [Dahlman, 2004]. Se estudió el efecto del ángulo de ataque en los perfiles de esfuerzos residuales obtenidos. Una gran cantidad de perfiles de esfuerzos residuales

fueron reportados para diferentes avances de la herramienta; de cualquier manera, muchos de ellos no fueron utilizados en esta validación debido a que el avance era mayor al máximo valor especificado en el programa Ga101 ($> 0.152 \text{ mm/rev}$). Adicionalmente, el uso de estos perfiles experimentales de esfuerzos residuales se vio limitado a los generados con herramienta afilada ya que no se tienen datos de los parámetros de desgaste para el inserto utilizado.

Dessoly reportó mediciones de fuerzas en el corte y temperaturas al torneear barras de acero AISI 52100 (58 HRC) usando herramientas rotatorias y fijas [Dessoly, 2004]. De cualquier manera, estas mediciones no pudieron ser utilizadas en esta validación debido a que las profundidad de corte (0.05 mm) y las velocidades de corte ($10 - 25 \text{ m/min}$) utilizadas en los experimentos son menores a los rangos del programa Ga101 ($0.102 - 0.305 \text{ mm}$ y $91.44 - 182.88 \text{ m/min}$, respectivamente).

Kurt reportó el torneado de piezas de trabajo de AISI 52100 (60 HRC) con insertos de CBN (DCMW 11T308) [Kurt, 2005]. Aunque reportó una gran diversidad de resultados experimentales, ninguno de ellos fueron utilizados en esta validación debido a que todos los experimentos fueron llevados a cabo con un avance de la herramienta de 0.03 mm/rev y una profundidad de corte de 0.05 mm , las cuales están fuera de los rangos del programa Ga101 ($0.051 - 0.152 \text{ mm/rev}$ y $0.102 - 0.305 \text{ mm}$, respectivamente).

Un resumen de las referencias encontradas en la literatura, y el tipo de información que de ellas se utiliza en este trabajo, se ilustran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resumen de referencias utilizadas para la validación del programa Ga101.

Referencia	Fuerzas en el Corte	Desgaste en el Flanco	Rugosidad	Capa Blanca	Esfuerzos Residuales
[Chou, 2004]	●				
[Dahlman, 2004]					●
[Dawson, 2001]			●		
[Dawson, 2002]	●				
[Huang, 2002]	●				
[Huang, 2004]		●			
[Ramesh, 2002]	●				
[Ramesh, 2005]				●	●
[Thiele, 1999a]	●		●		
[Thiele, 1999b]					●
[Thiele, 2000]				●	●

4.3 Mecánica de la Formación de Capa Blanca

Para entender la mecánica del proceso de formación de capa blanca, es importante y necesario conocer las diferentes teorías que explican este fenómeno. De acuerdo con Poulachon, actualmente prevalecen tres teorías que explican la estructura de la formación de capa blanca [Poulachon, 2005]:

- 1) El alto grado de austenita contenido en la superficie de la capa blanca claramente confirma la existencia de la inversión de martensita durante el maquinado (un rápido incremento en la temperatura, combinado con alta presión generada por la acción de la herramienta, transforman la superficie maquinada al estado austenítico), cuando la herramienta pasa, la superficie se enfría y la velocidad crítica de formación de martensita es alcanzada por convección con el aire y por conducción con la pieza de trabajo;
- 2) Como resultado de la alta velocidad, la razón de enfriamiento de la superficie maquinada en duro se ha estimado en el orden de 10^4 °C/s, algo de austenita no tiene el tiempo suficiente para cambiar de fase pudiendo así encontrar algunos indicios de austenita retenida en la capa superficial; y
- 3) Se ha demostrado que el recuperación dinámico es el proceso dominante en la formación de capa blanca y de bandas blancas internas, las cuales son bandas blancas internas grabadas en aceros, deformaciones a altos índices de deformación (de 10^{-3} a 10^6 s⁻¹), el recuperación dinámico puede ser explicado simplemente como el inicio de las dislocaciones en las fronteras de grano y es asistido por el incremento local de la temperatura, debido a la rápida deformación localizada, las dislocaciones se concentran dentro de los nodos, produciendo regiones de alta y baja densidad de dislocaciones, formando así subfronteras de grano.

Una nueva hipótesis se ha desarrollado, donde se postula que hay una casi completa disolución de carburos debido a las altas temperaturas presentes en la deformación plástica: entre más se incremente la cantidad de carbón en la matriz, más disminuye el punto de fusión en el acero; al pasar la herramienta por el material, la capa blanca se enfría rápidamente, esto induce la solidificación de la microestructura; una

pequeña cantidad de martensita sin templar o austenita retenida puede desarrollarse en capa blanca.

Hay diversos problemas concernientes a la microestructura de la capa blanca; la microestructura de la capa blanca es reconocida como una “martensita anormal” compuesto de material nanocristalino transformado parcialmente con una alta densidad de dislocaciones considerada como una capa de martensita muy fina (células desorientadas entre 30 y 100nm) con carburos dispersos finamente y con gran cantidad de austenita retenida [Poulachon, 2005]. Se han propuesto dos principales teorías al respecto:

- 1) La estructura de la capa blanca está constituida principalmente de austenita retenida, aunque aún no se ha demostrado experimentalmente, se tiene la certeza de que la fracción de austenita retenida es la de mayor presencia en la capa blanca;
- 2) La evolución microestructural durante la formación de la capa blanca parece ser desconocida, pero se cree que la capa blanca es una mezcla estructural de martensita α y austenita γ , la martensita en el acero es metaestable y un calentamiento moderado podría conducir a una descomposición en cementita y ferrita; si se alcanza la temperatura de inicio de cambio de fase a austenita, la martensita se podría convertir en austenita por inversión de martensita; en el subsiguiente enfriamiento rápido (una vez que la superficie maquinada abandonó el contacto con el flanco de la herramienta), la austenita puede transformarse nuevamente en martensita, si la temperatura de inicio de formación de martensita es alcanzado.

La existencia de la capa blanca no es algo nuevo, Griffiths hizo una revisión de literatura que incluye todo el trabajo hecho hasta 1987, referente a la capa blanca, y encontró una referencia de 1921 (Stead, J. W., 1912, “Micro-Metallographic & Its Practical Application,” J. West. Scot. Iron & Steel Inst., Vol. 19, pp. 169-204), donde la capa blanca fue identificada en cables de acero [Griffiths, 1987b]. Griffiths también encontró algunas referencias donde se asume que la capa blanca es un producto de la transformación convencional de martensita debido a la alta dureza; finalmente, concluyó que hay una gran variedad de estructuras de capa blanca, y tantas formas y tipos como situaciones de formación posibles. Antes de dicha revisión de literatura, Griffiths realizó experimentos de torneado en duro de barras de acero 817M40 (EN24T) usando insertos

de carburo con desgaste artificial de flanco, donde demostró algunas ventajas tribológicas de la capa blanca [Griffiths, 1987a].

Chou torneó en duro AISI 52100 con herramientas cerámicas, encontrando que la capa blanca aumenta con el incremento del desgaste de flanco así como con el aumento de la velocidad de corte, alcanzando una asíntota a altas velocidades; por otra parte, variaciones en la profundidad de corte y avance no mostraron ningún efecto en la profundidad de la capa blanca [Chou, 1998]. Adicionalmente, concluyó que la capa negra debajo de la capa blanca, y con una estructura más suave, debería ser considerada al estudiar efectos superficiales en el comportamiento de la pieza terminada.

Chou también desarrolló un modelo térmico para simular la distribución de temperaturas en las superficies torneadas y para estimar la profundidad de la capa blanca en términos de la penetración de una cierta temperatura crítica [Chou, 1999]. Y demostró la misma tendencia del efecto de las velocidades de corte en el espesor de la capa blanca al predecirlas en el modelo térmico. Concluyendo que, la formación de capa blanca es predominantemente un proceso rápido de calentamiento y enfriamiento.

Años después, el mismo Chou realizó experimentos para evaluar el comportamiento de la capa blanca formada a diferentes condiciones de corte y de desgaste de flanco de las herramientas [Chou, 2004]. Concluyendo que, para herramientas afiladas, la capa blanca solamente aparecía a velocidades de avance muy agresivas y que, usar radios de nariz pequeños, resulta en capas blancas de mayor espesor; por su parte, las herramientas desgastadas generaban capa blanca en avances medianos de la herramienta pero, en contraste, radios de nariz grandes dejaban las capas blancas más profundas.

Akcan estudió el torneado en duro de tres materiales de la pieza de trabajo (aceros AISI 52100, AISI 4340 y AISI M2) con insertos de CBN a diferentes condiciones de corte y de desgaste de la herramienta [Akcan, 2002]. Concluyendo que la formación de la capa blanca está relacionada a las altas velocidades y al desgaste de flanco de la herramienta de corte, también se remarcó que, la deformación en el material al ser cortado es el principal factor del refinamiento de grano de la capa blanca.

En otra investigación, se examinaron las estructuras de las capas blancas usando un microscopio de transmisión de electrones [Barry, 2002]. Se maquinó acero BS

817M40 y un acero de baja aleación con insertos cerámicos afilados y desgastados. Las estructuras de las superficies maquinadas en ambos aceros fueron caracterizadas como muy finas, con celdas desorientadas, con un tamaño menor a $100nm$. El área adyacente seleccionada, del patrón de difracción de electrones, indica la presencia de austenita retenida, la cual aumenta en volumen al incrementar el desgaste de flanco de la herramienta. También era evidente un refinamiento en el tamaño de las partículas de cementita. En la superficie torneada, con herramienta desgastada, del acero BS 817M40 hubo evidencia suficiente para sugerir un cierto grado de recristalización. Esto puede deberse a una transición de “recuperamiento dinámico” a una “recristalización dinámica” durante la generación de la superficie; un fenómeno que es favorecido por la reducción de energía acumulada en los materiales de las piezas de trabajo como resultado de la inversión de martensita.

Guo condujo experimentos de maquinado en duro y de esmerilado cilíndrico para generar grandes espesores de capa blanca para facilitar su localización y medición [Guo, 2004]. Enfocándose en la comprensión de las propiedades de la capa blanca antes de investigar sus efectos en el producto terminado, encontrando que las propiedades de las capas blanca y negra (capa de martensita recalentada debajo de la capa blanca) en el torneado en duro y en el esmerilado son fundamentalmente diferentes en cuatro aspectos: características de las estructuras cristalinas, la microdureza, la microestructura y la composición química. Esto, con la idea final de comparar estos dos procesos.

Poulachon enfocó su estudio en la evolución de la capa blanca producida durante el desgaste progresivo en el torneado en duro con insertos de CBN [Poulachon, 2005]. Torneando aceros: AISI D2, AISI H11, 35NiCrMo16 y AISI 52100. Mostró que, la capa blanca llega a ser un problema debido a su fragilidad y que el espesor de dicha capa aumenta junto con el desgaste de flanco de la herramienta, dependiendo también de la microestructura de la pieza de trabajo y del incremento gradual del contenido de carbono, lo que resulta en carburos no disueltos.

4.4 Predicción de la Formación de Capa Blanca usando FEM

El proceso del corte de metales puede ser considerado como un proceso de deformación donde la deformación esta altamente concentrada en una pequeña zona; así,

el corte puede ser considerado como un proceso de arranque de viruta y simulado usando técnicas de FEM [Özel, 2000b]. La principal ventaja de estas simulaciones es la obtención de predicciones de fuerzas y temperaturas en el corte, formación de viruta y esfuerzos, que resultan al utilizar condiciones de corte específicas. De cualquier manera, las características del flujo de material en el corte, o esfuerzo de flujo a altas temperaturas o índices de deformaciones, son necesarias para llevar a cabo dichas predicciones. Hay muy pocos materiales que tengan su esfuerzo de flujo definido para dichas condiciones comúnmente encontradas en el torneado.

El método de elemento finito (FEM) es una herramienta que ha sido muy bien aplicada computacionalmente a problemas mecánicos y estructurales, la aplicación de códigos comerciales de elemento finito para la simulación de procesos de corte de metales, como DEFORM ®, es deseable para la industria porque: permite a los fabricantes de herramientas de corte optimizar el diseño de éstas, y a los usuarios a evaluar los efectos de los parámetros en el proceso de corte y en la calidad de las piezas maquinadas; todo esto con una costosa y muy tardada serie de procedimientos y de pruebas experimentales [Mamalis, 2001].

Al incrementar el poder computacional (desarrollo de computadoras con procesadores cada vez más potentes) y el desarrollo de posteriores algoritmos y rutinas de cómputo, se mejoran las posibilidades de simular, fácilmente, los procesos de corte [Mamalis, 2001]. Esto porque, al prevalecer altos gradientes de tensión y temperatura en la zona de corte, se necesitará una malla muy fina en el modelo a ser simulado, lo cual incrementa la complejidad y el tiempo de cómputo requerido en la simulación.

El desarrollo de una simulación correcta depende del conocimiento preciso de las condiciones frontera y el comportamiento del material. Para verificar las simulaciones, valores como fuerzas y temperaturas en el corte tienen que corresponder con los valores experimentales, esto para lograr una simulación del corte más acorde a la realidad.

Los resultados que se obtienen de un programa que utiliza el FEM son distribuciones de: fuerzas, esfuerzos, deformación, índice de deformación, temperatura y daño en la pieza de trabajo; así como distribución de temperaturas en la herramienta [Ceretti, 1999].

Un modelo termomecánico acoplado de corte ortogonal con deformación en el plano y con generación continua de viruta se ha desarrollado utilizando un código comercial de elemento finito implícito llamado DEFORM® 2D. El esfuerzo de flujo de un material de pieza de trabajo es tomado en función de la deformación, la razón de deformación y la temperatura, para tomar en cuenta el efecto de sus grandes valores en el corte asociados con las propiedades del material.

El proceso de corte es simulado desde su inicial hasta alcanzar el estado estable de las fuerzas en el corte (cuando la fuerza de corte alcanza un valor constante), con un avance fijo de la herramienta sobre la pieza de trabajo.

El espesor calculado de capa blanca y los valores de fuerzas en el corte son comparados con datos experimentales publicados [Ramesh, 2002] para encontrar concordancia y validar, por lo tanto, el modelo de elemento finito.

Las simulaciones de corte, frecuentemente asociadas con problemas de distorsión de elementos, son propensas a problemas de convergencia resultando en errores de cómputo. Un remedio a estos problemas se ofrece con algoritmos de remalleo los cuales verifican las condiciones de la malla de los elementos y, de ser necesario, las corrige sin modificar la topología de la malla actual. En el presente trabajo, dos subrutinas (MESH CUT y MESH MAN) fueron utilizadas para resolver posibles problemas de convergencia y falta de material de trabajo.

4.5 Datos de Entrada para las Simulaciones en FEM

Originalmente, los datos de entrada para las simulaciones del FEM, para predecir fuerzas y capa blanca, fueron tomados de una referencia [Ramesh, 2002], donde se usó el código comercial de elemento finito ABAQUS®. De cualquier manera, estos datos de entrada fueron modificados al ir surgiendo resultados parciales en las simulaciones, utilizando DEFORM®, esto debido a las diferentes formulaciones de cada uno de los códigos.

El modelo de elemento finito usado en las simulaciones es definido con deformación en el plano y no isotérmico. La herramienta se considera un cuerpo rígido con su geometría particular (radio del filo, ángulos de ataque y de incidencia). La pieza de trabajo es de material plástico, designada con la profundidad de corte como un

escalón en la parte superior donde la herramienta comenzará el corte, tomando también en cuenta la geometría del filo de la herramienta como se muestra en la Figura 4.4.

Se utilizó un incremento de tiempo de $2^{-7} s$ para el procedimiento de solución, y también un remalleo automático cada 10 pasos para evitar deformaciones excesivas en la malla.

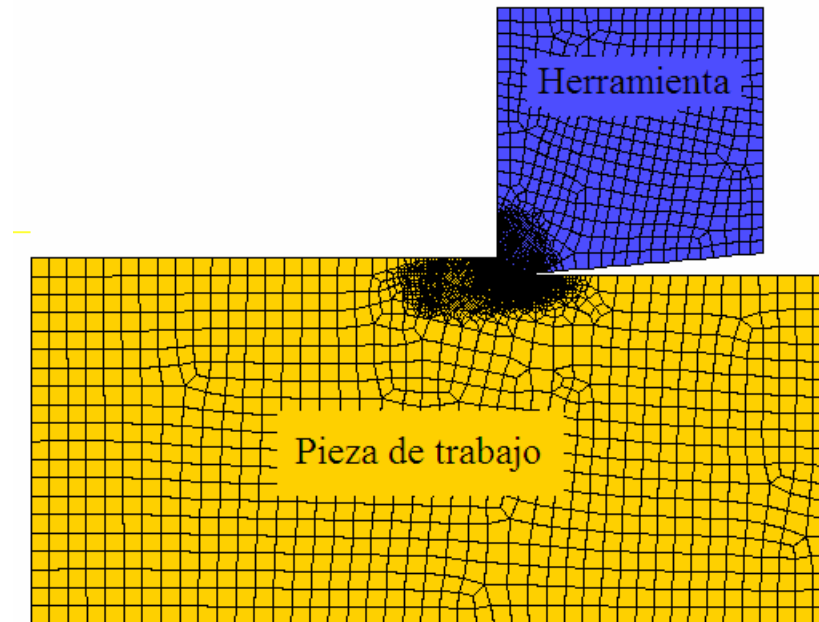


Figura 4.4 Posición y malleo iniciales de la pieza de trabajo y de la herramienta en el modelo de elemento finito.

4.5.1 Materiales de la Herramienta y la Pieza de Trabajo

El material de la pieza de trabajo, escogido para estas series de simulaciones, fue acero AISI 52100, esta selección fue hecha tomando en cuenta la relevancia de este acero en la industria actual. La composición química del acero AISI 52100, usado en experimentos previos [Ramesh, 2002], se muestra en la Tabla 4.2. La microestructura inicial consiste en un matriz fina de martensita templada ($0.2 - 0.5 \mu m$) con una dureza aproximada de 62 HRC [Ramesh, 2002].

Tabla 4.2 Composición química del acero AISI 52100 [Ramesh, 2002].

Elemento	C	Cr	Fe	Mn	Si	P	S
% Vol.	0.98-1.1	1.4	97.05	0.35	0.25	<0.25	<0.25

Las propiedades físicas del material de la pieza de trabajo fueron tomadas básicamente de la literatura revisada como se muestra en la Tabla 4.3, para lograr una reproducción más acertada de los experimentos realizados.

Tabla 4.3 Propiedades físicas del acero AISI 52100 usadas en las simulaciones [Ramesh, 2002].

Densidad, Kg/m^3	7827
Calor específico, $J/Kg^{\circ}C$	458 $25 < T < 204$
	640 $204 < T < 426$
	745 $426 < T < 537$
	798 $T > 537$
Coeficiente de expansión térmica, $/^{\circ}Cx10^{-4}$	11.4 $25 < T < 204$
	12.6 $204 < T < 398$
	13.7 $698 < T < 704$
	14.9 $704 < T < 804$
	15.3 $T > 804$
Módulo de Young, GPa	210
Razón de Poisson	0.277

El modelo de esfuerzo de flujo fue modificado, ya que se presentaba abultamiento en la pieza de trabajo y falta de deformación en la zona primaria, desde simulaciones tempranas. El modelo de esfuerzo de flujo desarrollado por Huang [Huang, 2002] fue, por lo tanto, utilizado en todas las simulaciones realizadas. El material de la pieza de trabajo fue modelado solamente como plástico, mientras que el esfuerzo de flujo fue tomado en función de la deformación, índice de deformación y la temperatura; tratando así de representar el comportamiento real en el corte; donde los valores de deformación, índice de deformación y aumento de la temperatura, son grandes.

Por su parte, el material de las herramientas de corte utilizadas en las simulaciones fue nitruro de boro cúbico (CBN) disuelto en una base metálica. El CBN es el segundo material más duro después del diamante; estos dos materiales tienen la misma estructura y casi las mismas propiedades como la conductividad térmica, además cuenta con una excelente resistencia al desgaste y es inerte químicamente.

Tabla 4.4 Propiedades físicas del CBN de alto grado (insertos KD120) [Ramesh, 2002].

Densidad, Kg/m^3	3420
Calor específico, $J/Kg^{\circ}C$	750
Conductividad térmica, $W/m^{\circ}K$	100
Coeficiente de expansión térmica, $/^{\circ}Cx10^{-6}$	4.9
Módulo de Young, GPa	680
Razón de Poisson	0.22

Para las simulaciones de fuerzas y de capa blanca, se seleccionaron diferentes grados de CBN para las herramientas, así como se reportó en la literatura [Ramesh, 2002]. El material de la herramienta usado en las predicciones de fuerzas fue un alto CBN desarrollado por Kennametal como insertos KD120, sus propiedades se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.5 Propiedades físicas del CBN de bajo grado (insertos KD081) [Ramesh, 2002].

Densidad, Kg/m^3	4370
Calor específico, $J/Kg^{\circ}C$	750
Conductividad térmica, $W/m^{\circ}K$	44
Coefficiente de expansión térmica, $/^{\circ}Cx10^{-6}$	4.9
Módulo de Young, GPa	600
Razón de Poisson	0.17

Para las simulaciones de capa blanca el material de la herramienta fue un bajo CBN que Kennametal designa como insertos KD081 cuyas propiedades físicas se muestran en la Tabla 4.5. Este bajo grado de CBN se seleccionó con el fin de canalizar una mayor cantidad de calor hacia la superficie terminada debido a su baja conductividad térmica. Adicionalmente, se creó un desgaste artificial en el flanco de $90\mu m$ para intensificar el calor generado en la superficie de contacto con la pieza de trabajo. Incrementando el flujo de calor en estas regiones se incrementa el daño térmico, promoviendo así la posibilidad de formación de capa blanca en la superficie terminada.

4.5.2 Condiciones de Corte

Las condiciones de corte, para las predicciones de fuerzas, fueron tomadas de la literatura [Ramesh, 2002], usando dos diferentes velocidades de corte y tres diferentes avances de la herramienta, como se muestra en la Tabla 4.6. La geometría de la herramienta incluye un radio del filo de $10\mu m$, como se muestra en la Figura 4.5.

En las simulaciones para predecir la capa blanca, las condiciones mostradas en la Tabla 4.7 fueron utilizadas para generar la capa blanca en los experimentos previamente conducidos [Ramesh, 2002]. Todas estas condiciones de corte tienen resultados experimentales, con excepción de aquellas con velocidad de corte de $243.84 m/min$, ya que fueron utilizadas para calibrar la temperatura de transformación de fase en la pieza de trabajo.

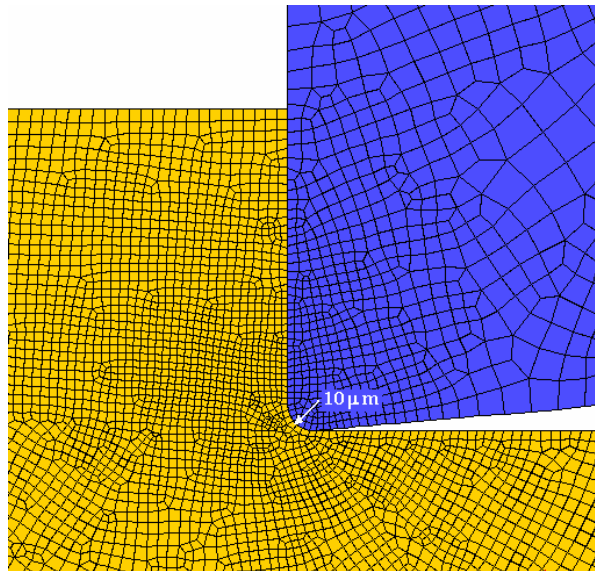


Figura 4.5 Radio del filo usado en las herramientas para predicción de fuerzas.

Tabla 4.6 Velocidades de corte y avances utilizados en las predicciones de fuerzas [Ramesh, 2002].

Prueba	Velocidad de corte (m/min)	Avance de la Herramienta (mm)
1	121.92	0.152
2	152.4	0.127
3	152.4	0.152
4	152.4	0.178

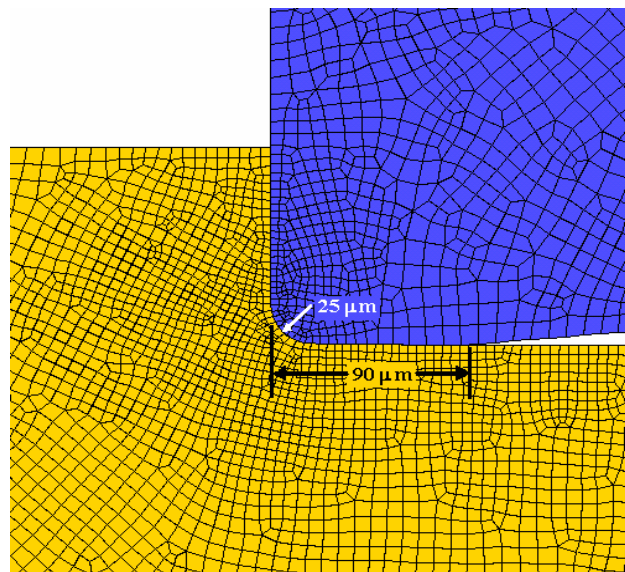


Figura 4.6 Radio del filo y desgaste en el flanco (VB) usado en las herramientas para predicción de capa blanca.

Tabla 4.7 Velocidades de corte y avances utilizados en las predicciones de capa blanca [Ramesh, 2002].

Prueba	Velocidad de corte (m/min)	Avance de la Herramienta (mm)
1	243.84	0.127
2	243.84	0.178
3	213.36	0.127
4	274.32	0.127
5	213.36	0.178
6	274.32	0.178

Un radio del filo de $25\mu\text{m}$ se incluyó en la geometría de la herramienta (Figura 4.6), acompañado de un desgaste artificial en el flanco (VB) de $90\mu\text{m}$ con 3° de inclinación para simular una herramienta desgastada (asegurando así un buen contacto y una presión uniforme, debido a que la pieza de trabajo se considera solamente como plástica).

4.5.3 Condiciones Frontera

Las dimensiones, en milímetros, y la malla inicial de elemento finito, de la pieza de trabajo y la herramienta de corte, se muestran en la Figura 4.7; también se incluye un ángulo de ataque de 0° junto con un ángulo de incidencia de 5° en la herramienta para todas las simulaciones.

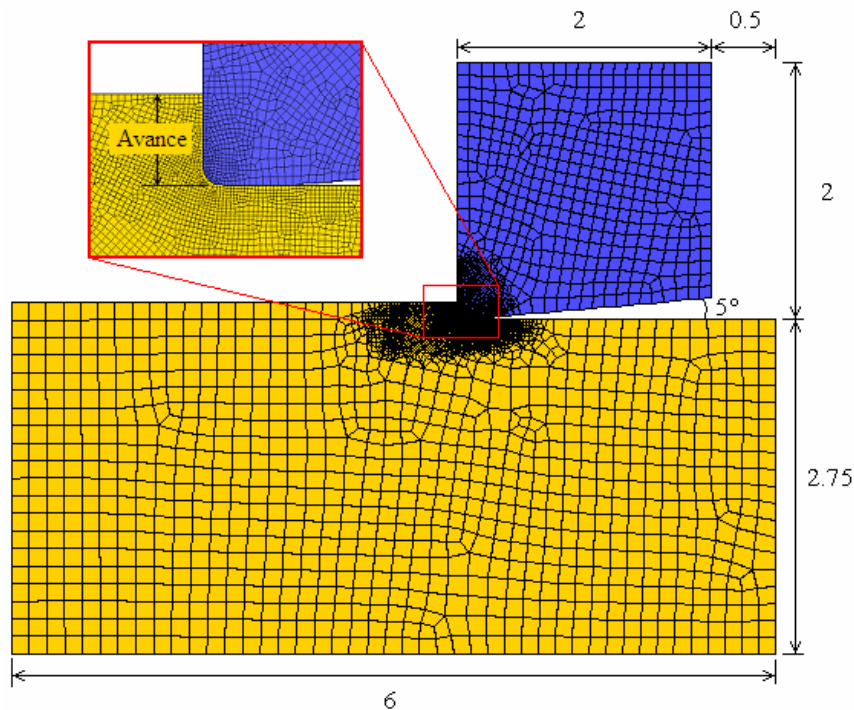


Figura 4.7 Dimensiones del modelo de elemento finito y la malla inicial utilizada en las simulaciones.

La malla en el área cercana al contacto, entre la herramienta y la pieza de trabajo, es más fina para permitir que el esfuerzo, la deformación, el índice de deformación y la temperatura en la viruta, la superficie maquinada y la punta de la herramienta sean predichas más precisamente. Para el resto de las áreas, una malla burda es suficiente.

La pieza de trabajo consiste de cerca de 12000 elementos isoparamétricos de cuatro nodos con deformación en el plano y alrededor de 12400 nodos. Ha sido probado que este tipo de elementos de bajo orden analizan más precisamente problemas plásticos de grandes deformaciones [Mamalis, 2001], comparados con los elementos de alto orden como los de ocho nodos.

La herramienta consiste de alrededor de 1600 elementos isoparamétricos de cuatro nodos con transferencia de calor en el plano, ya que se considera como rígida y solamente se analiza la transferencia térmica, empleando un total de cerca de 1700 nodos.

La Figura 4.8 muestra las condiciones frontera, de desplazamiento, aplicadas a la pieza de trabajo. Como la herramienta (a-b-c-d-a) se ha modelado como rígida, no se desarrollará ninguna reacción en ella, por lo tanto no será necesario restringir su movimiento en ninguna dirección.

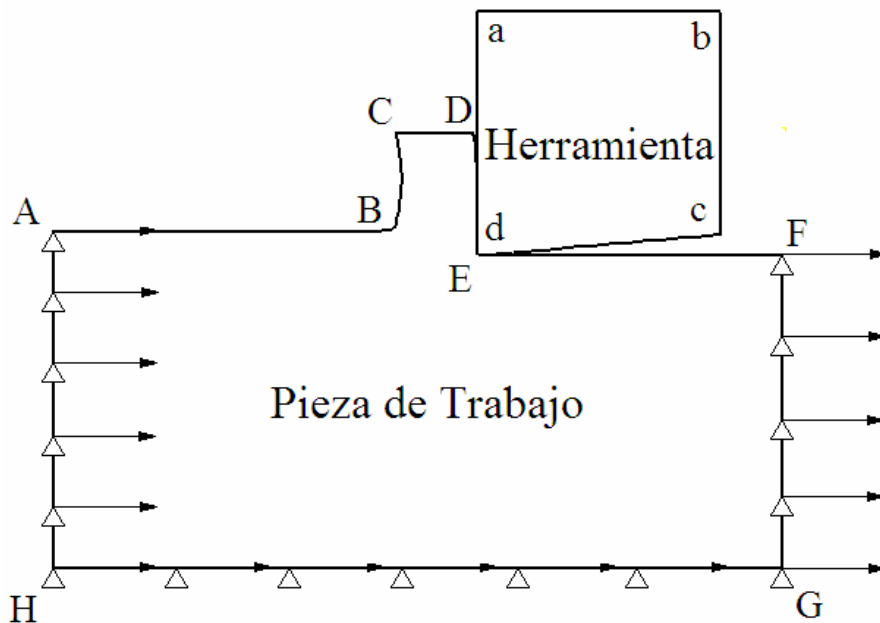


Figura 4.8 Condiciones de frontera, de desplazamiento, aplicadas a la pieza de trabajo.

Para la pieza de trabajo, la velocidad de corte se aplica a los nodos sobre las líneas A-H, H-G y G-F en dirección x positiva, los mismos nodos también son fijados en la dirección y . Las fronteras A-B, B-C-D-E y E-F son superficies libres y permiten el movimiento libremente en cualquier dirección (x o y) durante la simulación.

Se aplica una temperatura constante de 20°C , tanto a la herramienta como a la pieza de trabajo, desde el inicio de las simulaciones.

Se utilizan un par de subrutinas: MESH CUT para cortar la viruta a una altura específica, evitando problemas de convergencia en la malla; y MESH MAN para generar nuevo material en la frontera H-A, evitando la falta de material de trabajo y de elementos en las simulaciones, y de nuevo MESH CUT para cortar en la frontera F-G (de la Figura 4.8).

4.5.4 Condiciones de Contacto Herramienta-Pieza de Trabajo

El contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, para las simulaciones de predicción de fuerzas, fue especificado desde el principio de las simulaciones con una tolerancia de 0.0001 mm , a lo largo de todo el radio del filo y la parte de la cara de ataque que estaba en contacto con la pieza de trabajo, los puntos de contacto se muestran en la Figura 4.9.

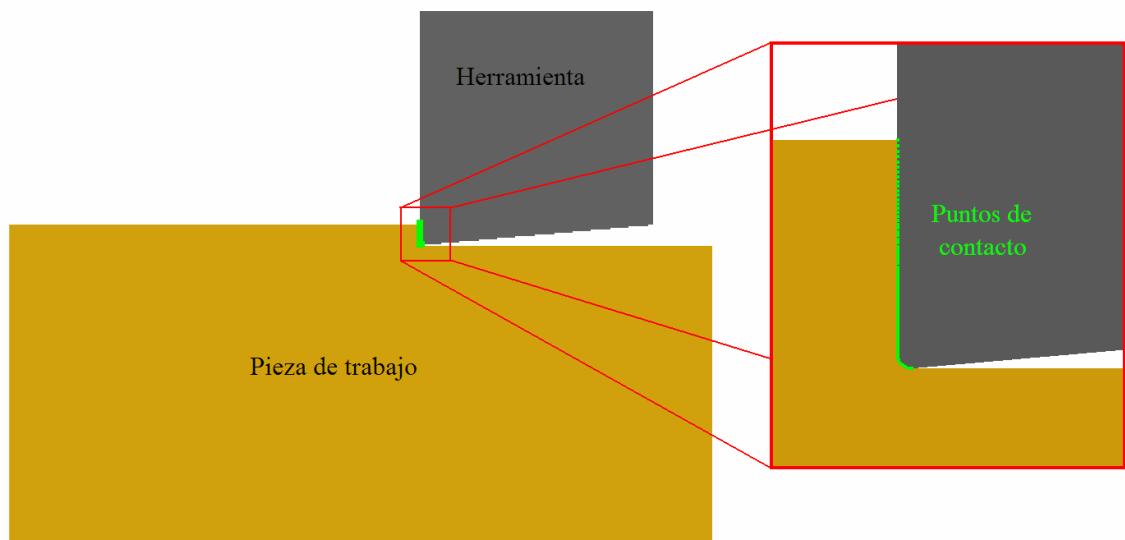


Figura 4.9 Condiciones de contacto para las simulaciones de predicción de fuerzas.

De la misma manera, en las simulaciones para la predicción de capa blanca, se consideraron las mismas condiciones agregándole el contacto en la superficie desgastada artificialmente, todos los puntos de contacto se pueden encontrar en la Figura 4.10

El coeficiente de fricción de Coulomb de 0.35, sugerido por [Ramesh, 2002], fue modificado a su equivalente factor de fricción cortante de 0.6, ya que se encontró una distribución no uniforme de temperatura en las simulaciones de predicción de capa blanca. Las simulaciones de predicción de fuerzas, no se vieron afectadas al modificar dicho factor.

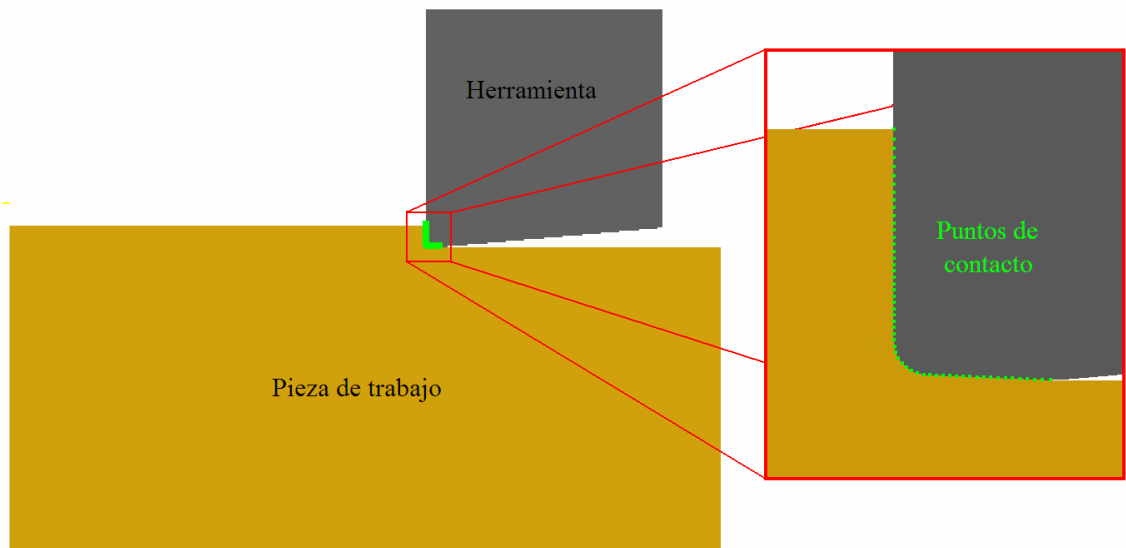


Figura 4.10 Condiciones de contacto para las simulaciones de predicción de capa blanca.

4.5.5 Condiciones Térmicas de Estado Estable

En este trabajo, la temperatura depende de las propiedades mecánicas y térmicas consideradas a altas temperaturas. Las temperaturas en el corte de metales se encuentran en el rango de $800 - 1200^{\circ}\text{C}$ [Jain, 2201], especialmente en las zonas de deformación. Cuando un material endurecido es torneado sin refrigerante, es obvio que las temperaturas en la viruta son extremadamente altas y, de hecho, las zonas de corte, en operaciones en seco, son normalmente de alrededor de los 925°C , afectando también la distribución de las temperaturas en la superficie terminada [Mamalis, 2001].

El conocimiento de la distribución de temperaturas en la pieza de trabajo, en la viruta y en la herramienta, es muy importante, ya que esta distribución tiene un gran efecto en la integridad de la superficie torneada y en el desgaste de la herramienta. Las

principales fuentes de calentamiento [Mamalis, 2001], responsables del aumento de temperatura en los procesos de corte y tomadas en cuenta en las simulaciones por elementos finitos, son:

- 1) energía mecánica debida a la deformación plástica en la pieza de trabajo,
- 2) calor por fricción generada en la interfaz herramienta-viruta,
- 3) calor conducido hacia la herramienta y la pieza de trabajo,
- 4) calor perdido por la viruta arrancada, y
- 5) calor perdido al ambiente por convección y radiación.

En las simulaciones se considera una temperatura ambiente de 25°C , hacia donde se pierde una cierta cantidad de calor, por convección, desde las superficies libres de la pieza de trabajo. Considerando así un coeficiente de convección de $0.002\text{ N/smm}^{\circ}\text{C}$ y despreciando la radiación.

También, la conductividad térmica del material de la pieza de trabajo (AISI 52100) es modificada, en lugar del valor fijo de $46.6\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ usado en la referencia [Ramesh, 2003], las simulaciones se realizan usando una conductividad térmica (K) en función de la temperatura [Chou, 2003]:

$$K f(T) = 45.68 - 0.024T \quad (4.2)$$

Este cambio se hace para tomar en cuenta la variación del calor conducido en la pieza de trabajo al aumentar su temperatura.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Validación del Programa Ga101

En este capítulo se incluye la comparación entre los valores predichos de las variables en el maquinado en duro (fuerzas en el corte, desgaste de flanco, rugosidad, esfuerzos residuales y formación de capa blanca) usando el programa Ga101 versión 1.0 con los valores medidos en varios experimentos.

Los datos experimentales o casos utilizados para las comparaciones, fueron obtenidos de la literatura como se menciona en el punto 4.2. Los casos de comparación para algunas de las variables como la formación de capa blanca, son muy limitados debido a la falta de experimentación usando condiciones de corte (velocidad de corte, avance de la herramienta y profundidad de corte) que estén dentro del rango del programa.

Por otro lado, para predecir variables dependientes del desgaste de la herramienta (fuerzas con herramienta desgastada, desgaste de flanco y el efecto del desgaste de la herramienta en los esfuerzos residuales, en la formación de capa blanca y en la rugosidad) los valores de los coeficientes de desgaste ($K_{\text{abrasión}}$, $K_{\text{adhesión}}$, a , K_{diff} y K_Q), incluidos en la Ecuación 4.1, se hacen necesarios para los cálculos de desgaste de la herramienta.

Después de una búsqueda en la literatura, se encontraron valores de estos coeficientes sólo para insertos de bajo CBN (Tabla 5.1) y ningún otro dato para los demás insertos especificados en el programa Ga101. De esta forma, la evaluación de variables que requieran cálculos de desgaste de la herramienta se limitan al uso del inserto KD050.

Tabla 5.1 Coeficientes de desgaste para insertos KD050 de bajo CBN [Huang, 2002].

$K_{\text{abrasión}}$	$295 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{N}$
$K_{\text{adhesión}}$	$14761 \times 10^{-18} \text{ m}^3 / \text{N}$
K_{diff}	$57204 \times 10^2 \text{ m} / \text{s}^2$
a	$90313 \times 10^{-8} \text{ l} / \text{°K}$
K_{ϱ}	20460 °K

Adicionalmente, debido a la falta de experimentos del torneado de AISI 1053 y AISI 1070, o materiales similares, la validación entera presentada en este capítulo se limita al torneado de AISI 52100.

5.1.1 Fuerzas en el Corte

El programa Ga101 predice dos tipos de fuerzas tridimensionales en el torneado: con la herramienta afilada (al inicio del proceso de corte) y con la herramienta desgastada (después de un tiempo de corte, cuando el desgaste en la herramienta de corte se hace presente).

Se utilizarán seis grupos de experimentos para la evaluación y validación de las predicciones de fuerzas hechas por el Ga101 (fuerza de corte, axial y radial con herramienta afilada, y fuerzas de corte axial y radial con herramienta desgastada).

Grupo 1: Evaluación de la Predicción de Fuerzas en el Corte, usando datos de Dawson [Dawson, 2002]:

Los experimentos de torneado de Dawson fueron conducidos en acero AISI52100 (62 HRC) usando insertos KD050 de bajo CBN. Así, este grupo incluye la comparación de los valores experimentales con los predichos, por el Ga101, para las tres componentes de fuerza (de corte, axial y radial); usando tres casos exactamente iguales, pero con diferentes velocidades de corte o avance de la herramienta.

Adicionalmente al uso de los materiales predefinidos en el programa, se usó un modelo de esfuerzo de flujo para acero AISI 52100 (62 HRC) [Ramesh, 2002] para examinar la funcionalidad de la opción para pieza de trabajo “material definido por el usuario” del Ga101. los parámetros del modelo de esfuerzo de flujo de Johnson-Cook se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Propiedades del acero AISI 52100 [Ramesh, 2002].

Calor Específico	475 J/(Kg°K)	
Conductividad Térmica	46.6 W/(m°K)	
Densidad	7827 Kg/m ³	
Punto de Fusión	1696.89°K	
Parámetros del Modelo de Johnson-Cook	A	688.17 MPa
	B	150.82 MPa
	C	0.04279
	m	2.7786
	n	0.3362

Las Figura 5.1, Figura 5.2 y Figura 5.3 incluyen la comparación de las fuerzas en el corte para diferentes combinaciones de velocidad de corte y avance de la herramienta (*182.88 m/min con 0.152 mm/rev*, *182.88 m/min con 0.076 mm/rev*, *91.44 m/min con 0.152 mm/rev*, respectivamente).

En la Figura 5.1, se observa una predicción nula de las fuerzas en el corte cuando se utiliza el “material definido por el usuario”. Ahí mismo, pero ya usando el material predefinido en el programa, el error máximo es de aproximadamente *24%* y ocurre en la predicción de fuerza axial con herramienta afilada.

En la Figura 5.2 se usan las mismas condiciones que en la Figura 5.1, con excepción del avance de la herramienta el cual cambió a *0.076 mm/rev*. El error máximo encontrado es de *30%* al predecir la fuerza radial con herramienta afilada. Predicciones más exactas se pueden observar al reducir la velocidad de corte y al aumentar el avance de la herramienta a *91.44 m/min* y *0.152 mm/rev*, respectivamente. El error máximo encontrado es de alrededor de *12%*, encontrado al predecir la fuerza axial con herramienta desgastada (Figura 5.3).

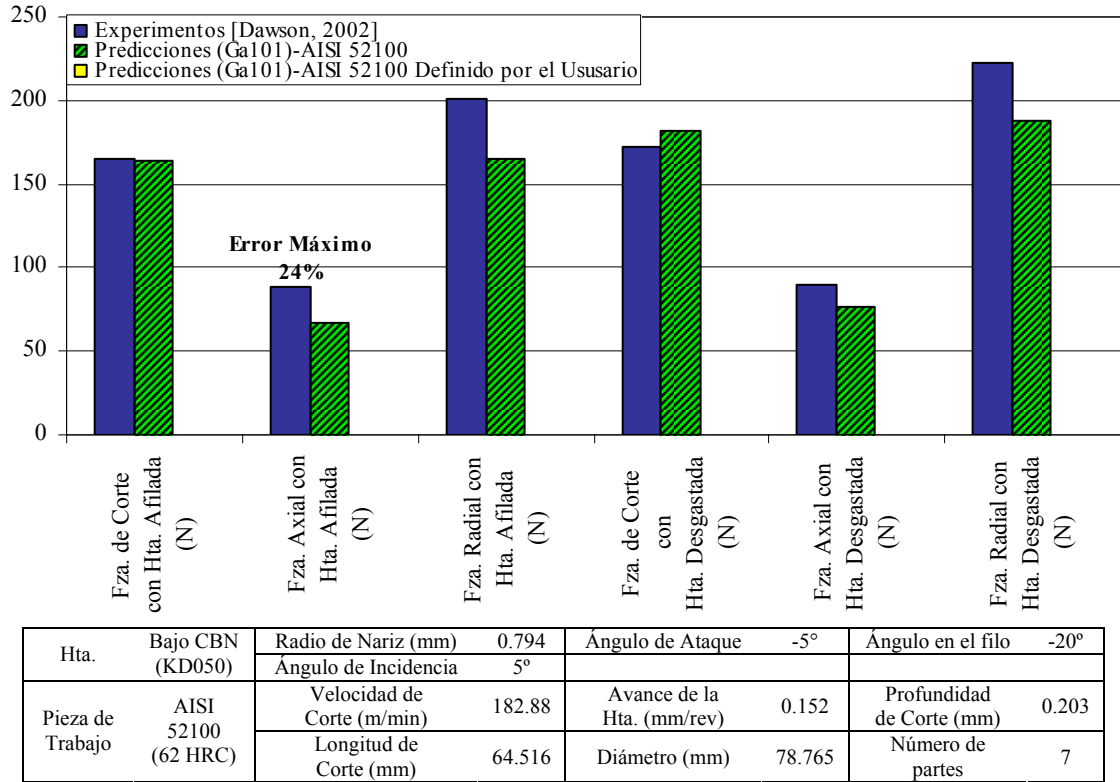


Figura 5.1 Comparación de fuerzas experimentales y predichas, usando material AISI 52100 predefinido y “material definido por el usuario”, usando velocidad de corte de 182.88 m/min y 0.152 mm/rev.

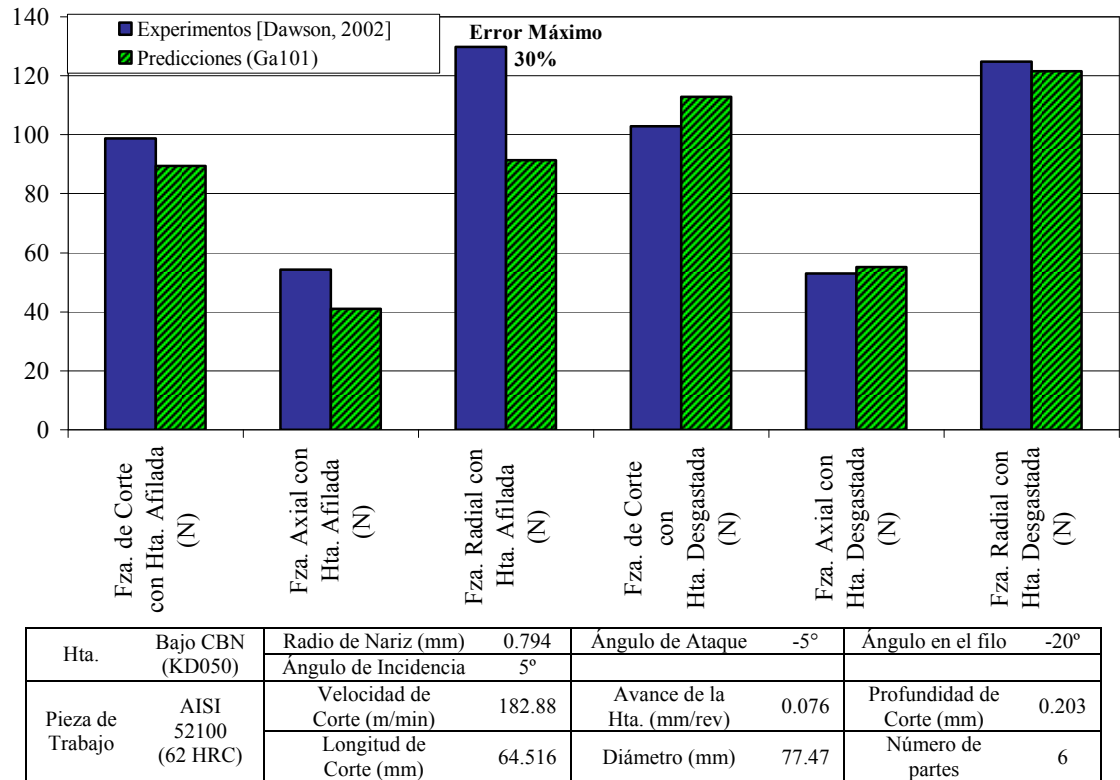


Figura 5.2 Comparación de fuerzas experimentales y predichas, usando velocidad de corte de 182.88 m/min y 0.076 mm/rev.

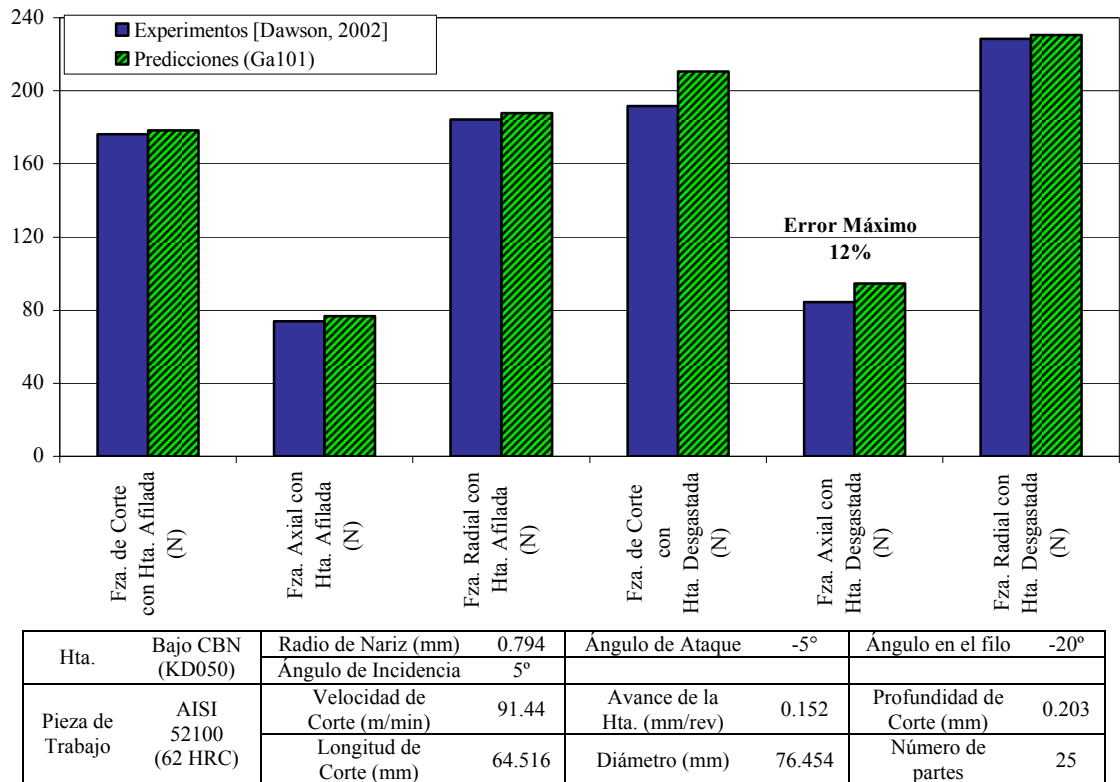


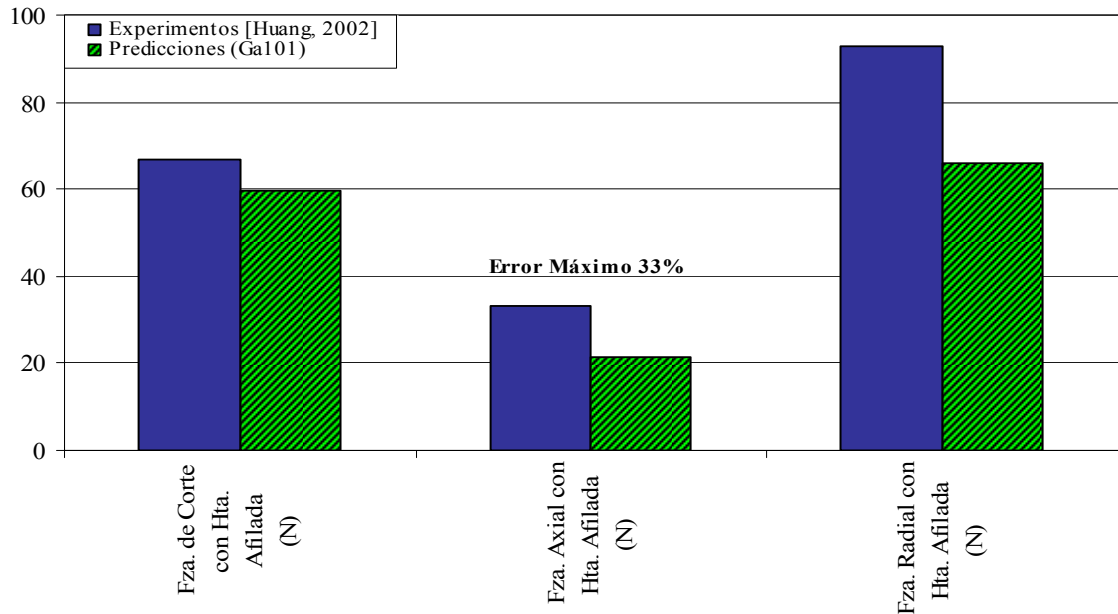
Figura 5.3 Comparación de fuerzas experimentales y predichas, usando velocidad de corte de 91.44 m/min y 0.152 mm/rev.

Grupo 2: Evaluación de la Predicción de Fuerzas en el Corte, usando datos de Huang [Huang, 2002]:

A diferencia del grupo anterior, la comparación en este grupo se ve limitada a fuerzas en el corte con herramienta afilada, ya que el objetivo del estudio experimental era determinar el efecto de la profundidad de corte, en las fuerzas en el corte con herramienta afilada. Por lo tanto, este grupo incluye tres casos con condiciones de corte similares excepto por las tres diferentes profundidades de corte utilizadas (0.127 , 0.229 y 0.279 mm).

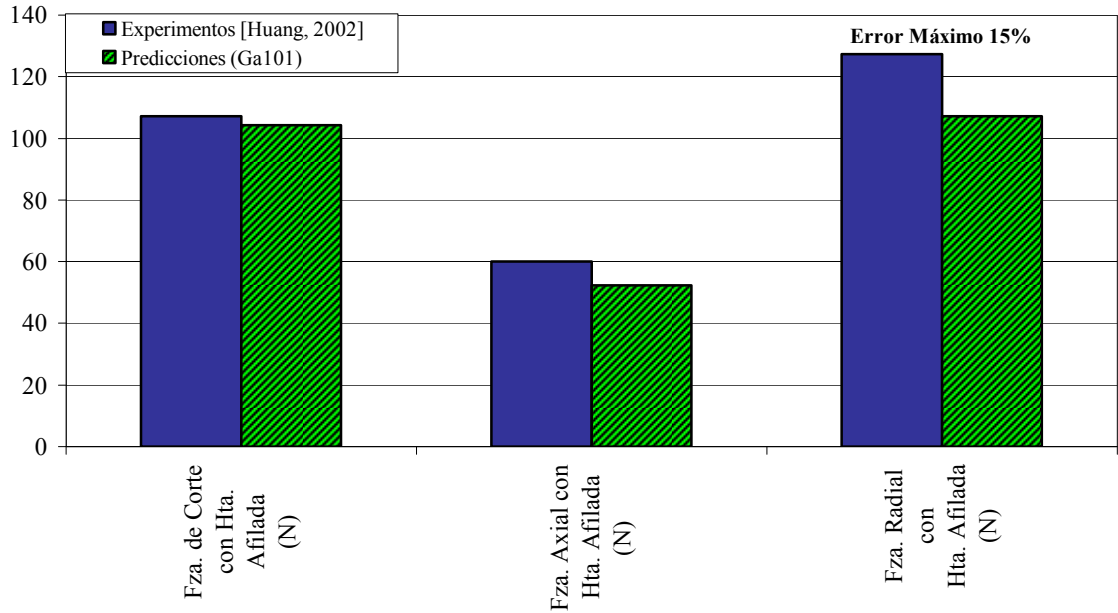
Como se puede observar en las Figura 5.4, Figura 5.5 y Figura 5.6, la cantidad de error incrementa al disminuir la profundidad de corte. El valor de error máximo es de 33% al predecir la fuerza axial, 15% y 13% al predecir fuerzas radiales, con profundidades de corte de 0.127 , 0.229 y 0.279 mm, respectivamente.

La posible razón del incremento en el error es que a pequeñas profundidades de corte, la ecuación analítica en el programa no se ajusta correctamente, ya que es más un mecanismo de fricción que un mecanismo de corte, especialmente con el uso de un ángulo amplio en el filo, como en este caso o en el caso de grandes radios del filo.



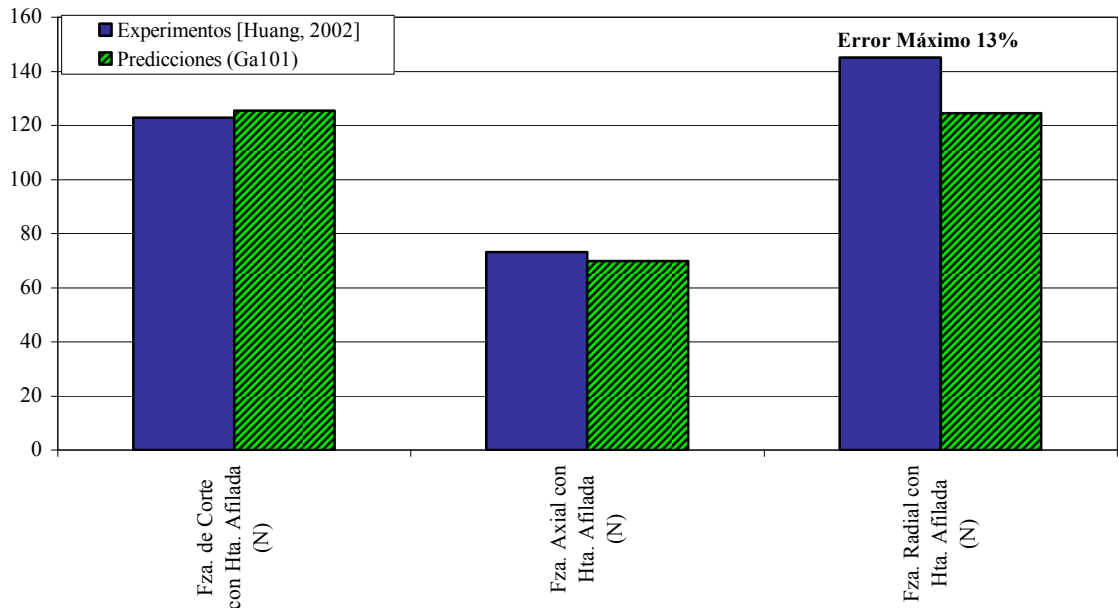
Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	128.016	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.076	Profundidad de Corte (mm)	0.127
		Longitud de Corte (in)	-	Diámetro (in)	-	Número de partes	-

Figura 5.4 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando una profundidad de corte de 0.127 mm.



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	128.016	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.076	Profundidad de Corte (mm)	0.229
		Longitud de Corte (in)	-	Diámetro (in)	-	Número de partes	-

Figura 5.5 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando una profundidad de corte de 0.229 mm.



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	128.016	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.076	Profundidad de Corte (mm)	0.279
		Longitud de Corte (in)	-	Diámetro (in)	-	Número de partes	-

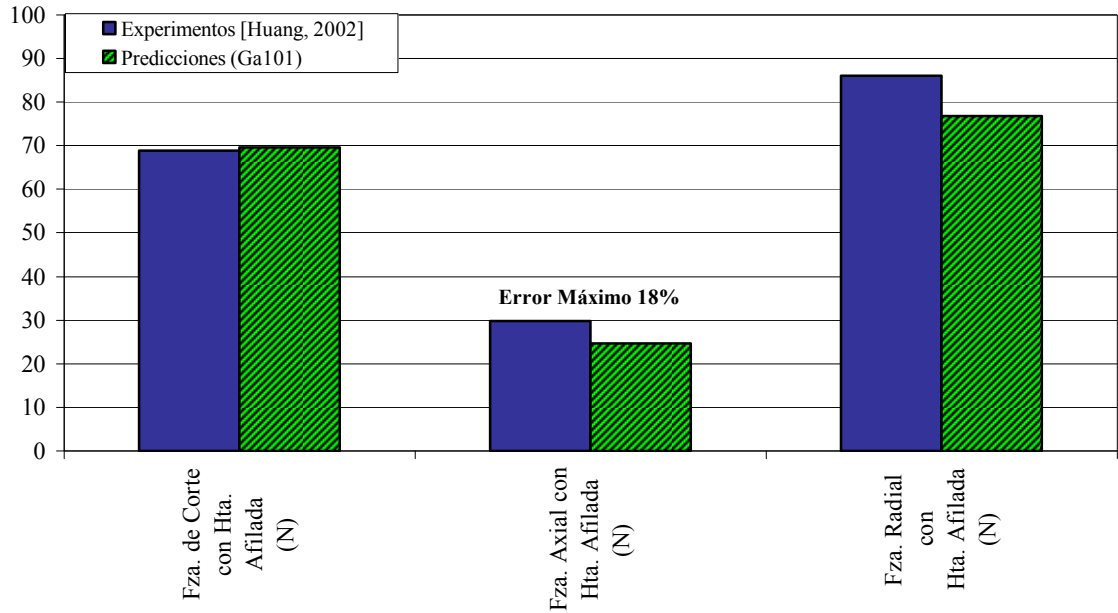
Figura 5.6 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando una profundidad de corte de 0.279 mm.

Grupo 3: Evaluación de la Predicción de Fuerzas en el Corte, usando datos de Huang [Huang, 2002]:

Este grupo incluye la comparación de las fuerzas, experimentales y predichas, con herramienta afilada. Se tienen tres casos con similares condiciones de corte pero con diferentes avances de la herramienta (0.089 , 0.114 y 0.14 mm/rev). El uso de diferentes valores de avance de la herramienta, ofrece una visión del efecto de éste, en la precisión de las fuerzas predichas.

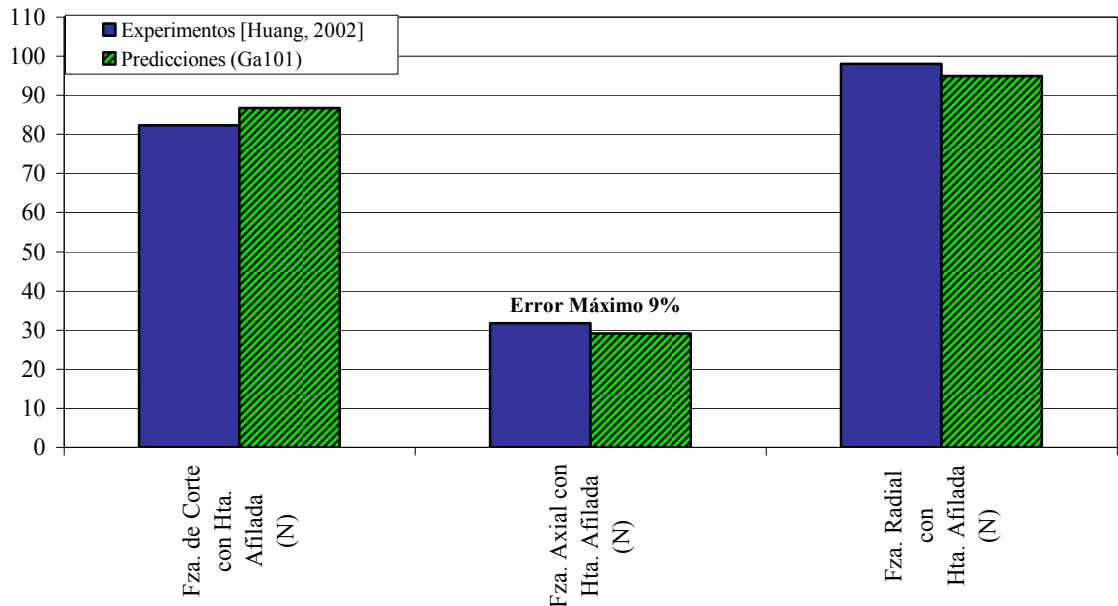
En las Figura 5.7, Figura 5.8 y Figura 5.9, con avances de la herramienta de 0.089 , 0.114 y 0.14 mm/rev, respectivamente, el valor más alto de error máximo fue de 18% en la fuerza axial, al usar el menor valor de avance de la herramienta. Este fenómeno es similar al observado cuando se predijeron las fuerzas en el corte con herramienta afilada a diferentes valores de profundidad de corte, por lo tanto la misma posible razón (el mecanismo de fricción es mayor que el de corte de metal) es aplicable aquí.

El error máximo para los otros avances, como puede verse en las Figura 5.8 y Figura 5.9, es muy pequeño (9% y 7% para 0.114 y 0.14 mm/rev, respectivamente). Pudiendo concluir que, dentro del rango de las condiciones de corte del Ga101, la precisión de las predicciones de fuerzas en el corte con herramienta afilada disminuye junto con el avance de la herramienta. De cualquier manera, el error es más sensible a pequeños cambios en el avance. Por ejemplo, al comparar las Figura 5.4 y Figura 5.7, el error cae de 33% a 18% para un incremento en el avance de la herramienta de 0.076 a 0.089 mm/rev (un incremento de 0.013 mm/rev), pero, si se comparan las Figura 5.7 y Figura 5.8, el error solamente cae de 18% a 9% con un incremento en el avance de la herramienta de 0.025 mm/rev.



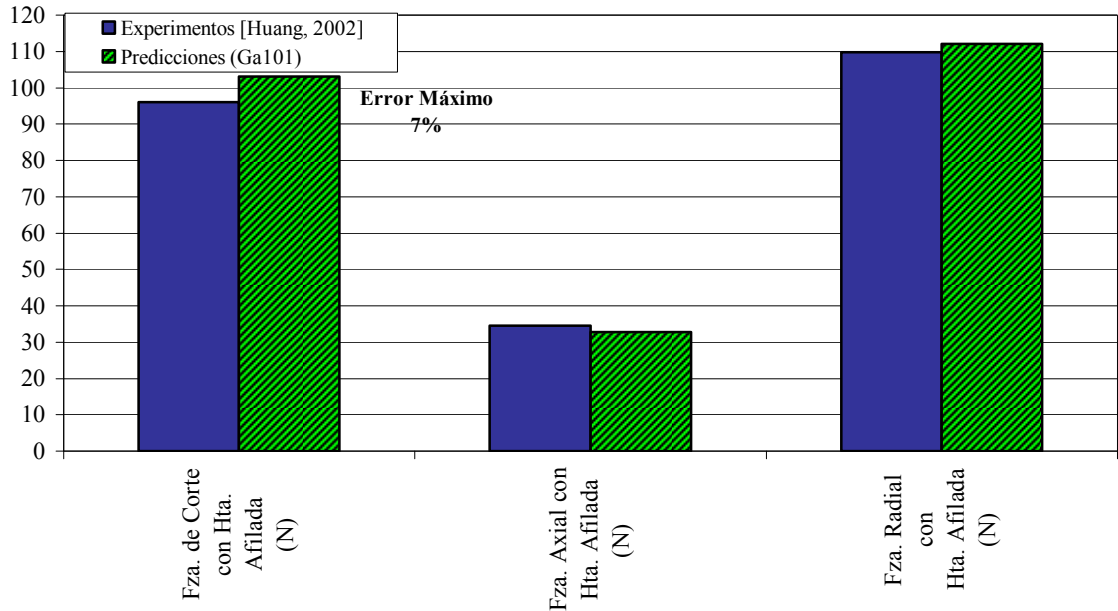
Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	128.016	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.089	Profundidad de Corte (mm)	0.127
		Longitud de Corte (in)	-	Diámetro (in)	-	Número de partes	-

Figura 5.7 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando un avance de la herramienta de 0.089 mm/rev.



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	128.016	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.114	Profundidad de corte (mm)	0.127
		Longitud de Corte (in)	-	Diámetro (in)	-	Número de partes	-

Figura 5.8 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando un avance de la herramienta de 0.114 mm/rev.



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	128.016	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.14	Profundidad de Corte (mm)	0.127
		Longitud de Corte (in)	-	Diámetro (in)	-	Número de partes	-

Figura 5.9 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando un avance de la herramienta de 0.14 mm/rev.

Grupo 4: Evaluación de la Predicción de Fuerzas en el Corte, usando datos de Chou [Chou, 2002]:

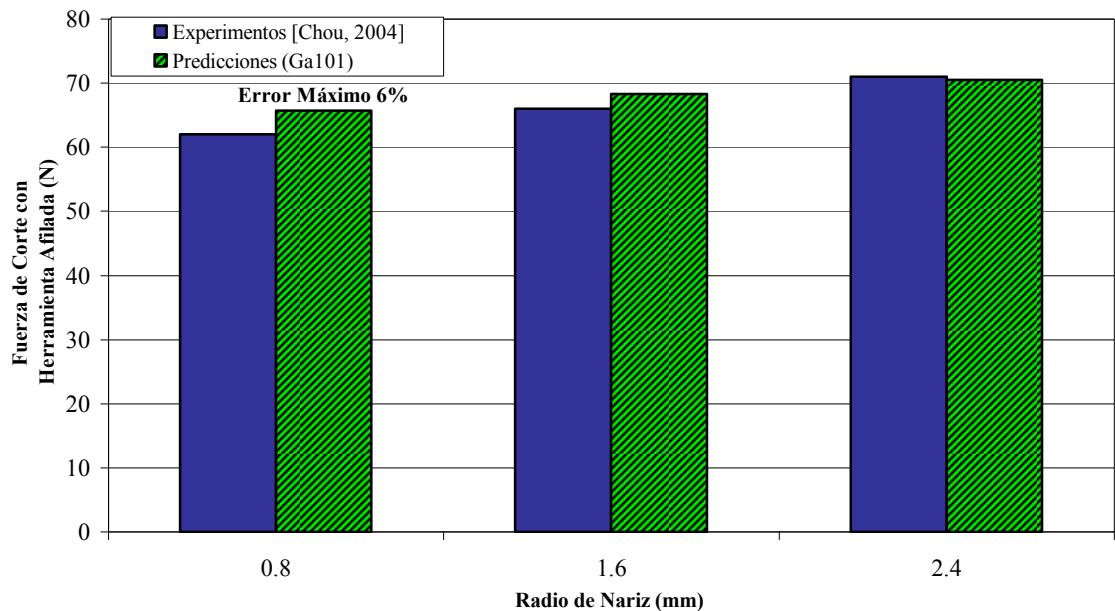
Los datos experimentales de este grupo fueron obtenidos al torneado de acero AISI 52100 (60~62 HRC) con insertos cubiertos de carburo. Este grupo incluye tres casos experimentales en los cuales se analiza el efecto del uso de diferentes tamaños del radio de la nariz (0.8, 1.6 y 2.4 mm) en una de las componentes de fuerza (fuerza de corte) con la herramienta afilada, y usando diferentes combinaciones de velocidades de corte y avance de la herramienta.

Las Figura 5.10, Figura 5.11 y Figura 5.12 incluyen la comparación, de las fuerzas de corte con herramienta afilada, de los valores experimentales con los predichos por el Ga101; usando diferentes combinaciones de velocidad de corte y avances de la herramienta (119.786 m/min con 0.051 mm/rev, 119.786 m/min con 0.152 mm/rev y 179.832 m/min con 0.051 mm/rev, respectivamente a las figuras).

En dichas figuras, se muestran los errores máximos para cada una de las combinaciones antes mencionadas, siendo 6% en el radio de nariz de 0.8 mm, 23% en el radio de nariz de 2.4 mm y 11% en el radio de nariz de 0.8 mm, respectivamente.

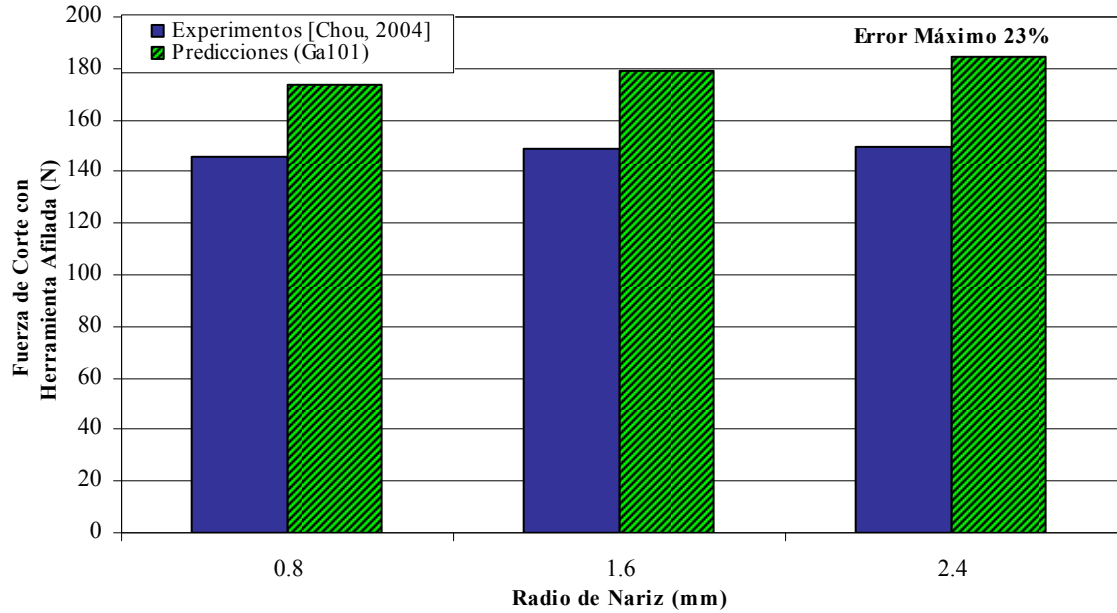
Se puede observar que el error no cambia al variar la velocidad de corte, pero sí aumenta al incrementar el avance de la herramienta (0.152 mm/rev), lo cual contradice la discusión hecha al analizar el Grupo 1.

La posible razón del error encontrado es que el radio de la nariz en el cual se encontró el error máximo (2.4 mm) es mucho más grande que los radios de la nariz utilizados en los experimentos para calibrar el Ga101.



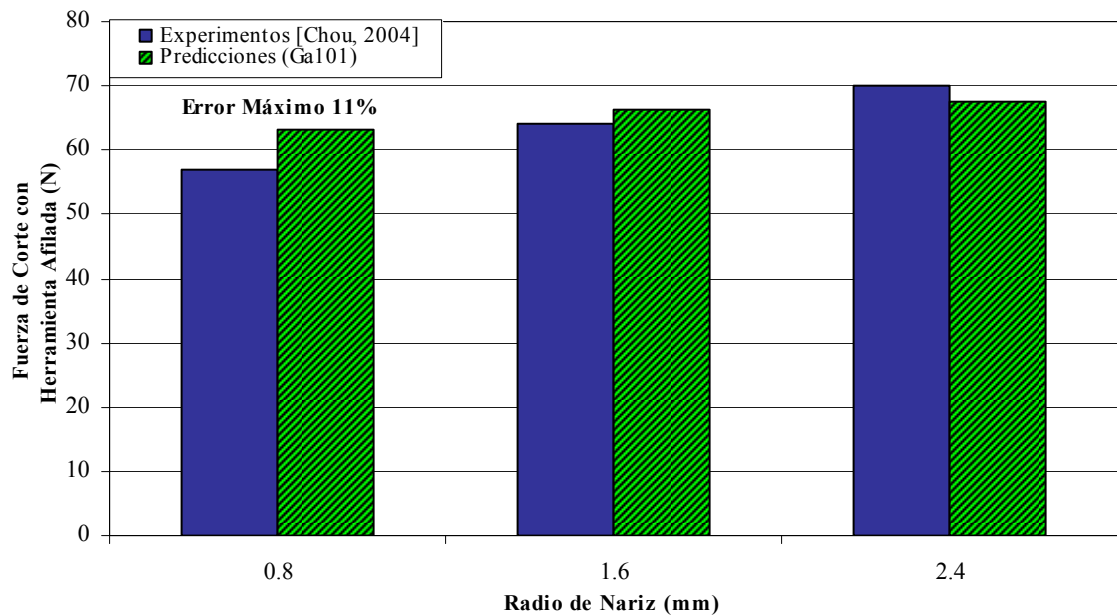
Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	Varía	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (61 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	119.786	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.051	Profundidad de Corte (mm)	0.203
		Longitud de Corte (mm)	-	Diámetro (mm)	-	Número de partes	-

Figura 5.10 Comparación de fuerzas de corte, experimentales y predichas, con herramienta afilada usando diferentes radios de nariz (a 119.786 m/min y 0.051 mm/rev).



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	Varía	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (61 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	119.786	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.152	Profundidad de Corte (mm)	0.203
		Longitud de Corte (mm)	-	Diámetro (mm)	-	Número de partes	-

Figura 5.11 Comparación de fuerzas de corte, experimentales y predichas, con herramienta afilada usando diferentes radios de nariz (a 119.786 m/min y 0.152 mm/rev).



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	Varía	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (61 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	179.832	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.051	Profundidad de Corte (mm)	0.203
		Longitud de Corte (mm)	-	Diámetro (mm)	-	Número de partes	-

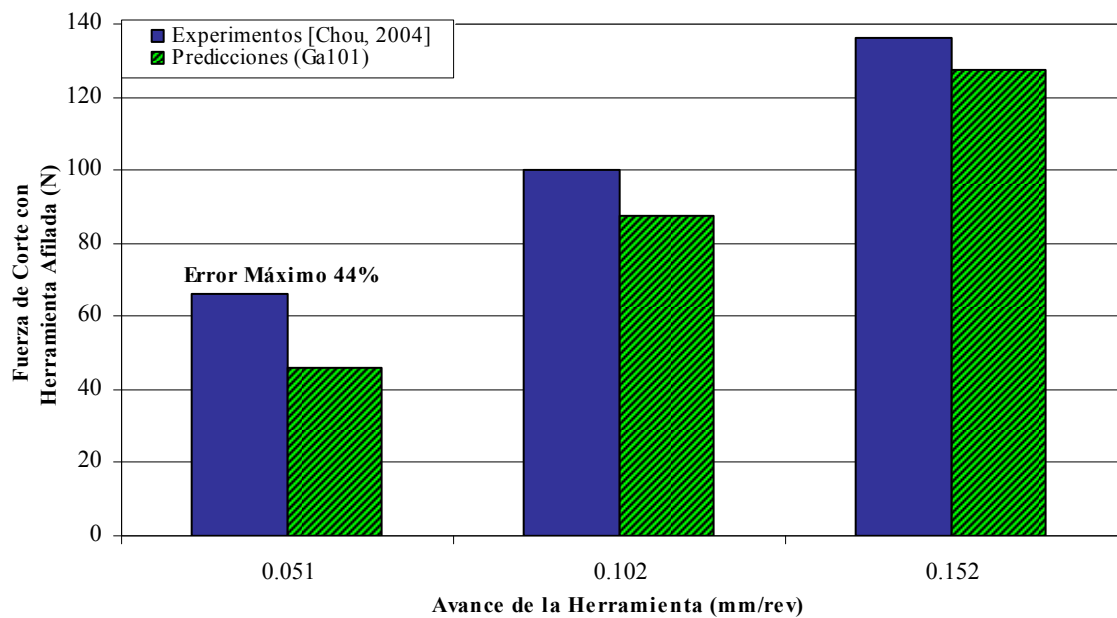
Figura 5.12 Comparación de fuerzas de corte, experimentales y predichas, con herramienta afilada usando diferentes radios de nariz (a 179.832 m/min y 0.051 mm/rev).

Grupo 5: Evaluación de la Predicción de Fuerzas en el Corte, usando datos de Thiele [Thiele, 2002]:

Thiele midió las fuerzas de corte al torneear acero AISI 52100 a diferentes avances de la herramienta y usando insertos KD050 afilados. Las piezas de trabajo fueron tratadas térmicamente para obtener un valor de dureza de 60 HRC, pero al hacer mediciones antes de torneearlas, éstas mostraron un valor de dureza de 57 ± 0.5 HRC.

La Figura 5.13 muestra la comparación de las fuerzas de corte a diferentes avances de la herramienta (0.051 , 0.102 y 0.152 mm/rev). Como se observó en el Grupo 1, el error incrementa al disminuir el avance de la herramienta. Así, fuerzas de corte con herramienta afilada son predichas más precisamente al utilizar mayores valores de avance de la herramienta.

La ligera diferencia entre el valor de dureza predefinido para los materiales en el Ga101 (AISI 52100 / 60~62 HRC) y el obtenido al realizar los experimentos de torneado (57 ± 0.5 HRC); pudiera contribuir a obtener mayores valores de error máximo (44%) para el avance de la herramienta de 0.051 mm/rev.



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.81	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	0°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (57 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	121.92	Avance de la Hta. (mm/rev)	Varía	Profundidad de Corte (mm)	0.254
		Longitud de Corte (mm)	-	Diámetro (mm)	-	Número de partes	-

Figura 5.13 Comparación de fuerzas de corte, experimentales y predichas, con herramienta afilada usando diferentes avances de la herramienta.

Grupo 6: Evaluación de la Predicción de Fuerzas en el Corte, usando datos de Huang [Huang, 2002]:

En este grupo se presentan las relaciones entre las fuerzas en el corte, el desgaste en el flanco de la herramienta y el tiempo de corte al torneear acero AISI 52100 (62 HRC) con insertos KD050. Usando estas relaciones y el tiempo de corte, las longitudes de corte en la dirección del avance de la herramienta (o número de partes o diámetros de la pieza de trabajo), son obtenidas para tres mediciones experimentales de fuerzas en el corte con herramientas desgastadas. De esta manera, este grupo incluye la comparación de las fuerzas en el corte con herramientas desgastadas, a diferentes intervalos de tiempos de corte. En las Figura 5.14, Figura 5.15 y Figura 5.16 se puede observar que el error aumenta al incrementar el tiempo de corte (o el número de piezas maquinadas), en otras palabras, al incrementar el desgaste en el flanco de la herramienta de corte. El mayor error máximo es de 25% y ocurre en las predicciones de fuerza radial con herramienta desgastada (Figura 5.16).

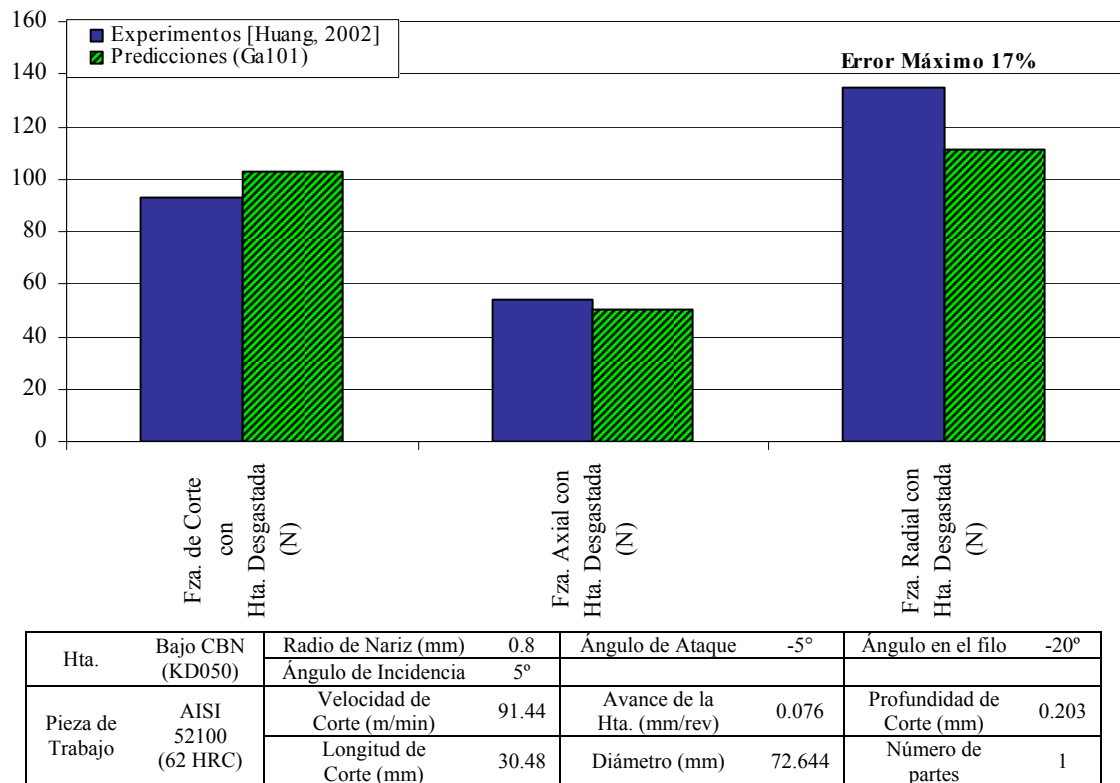
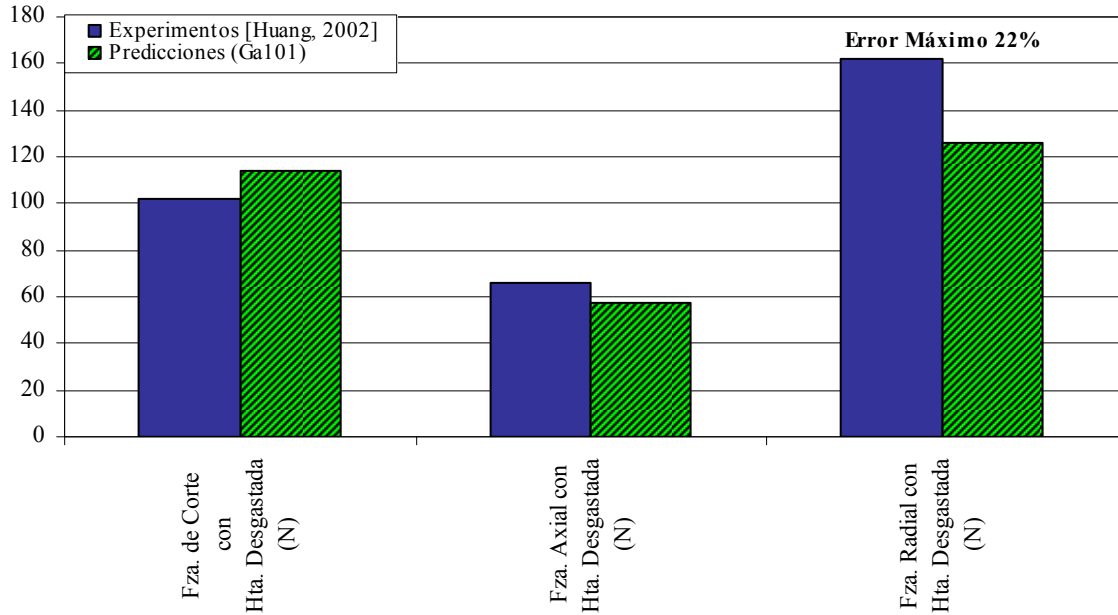
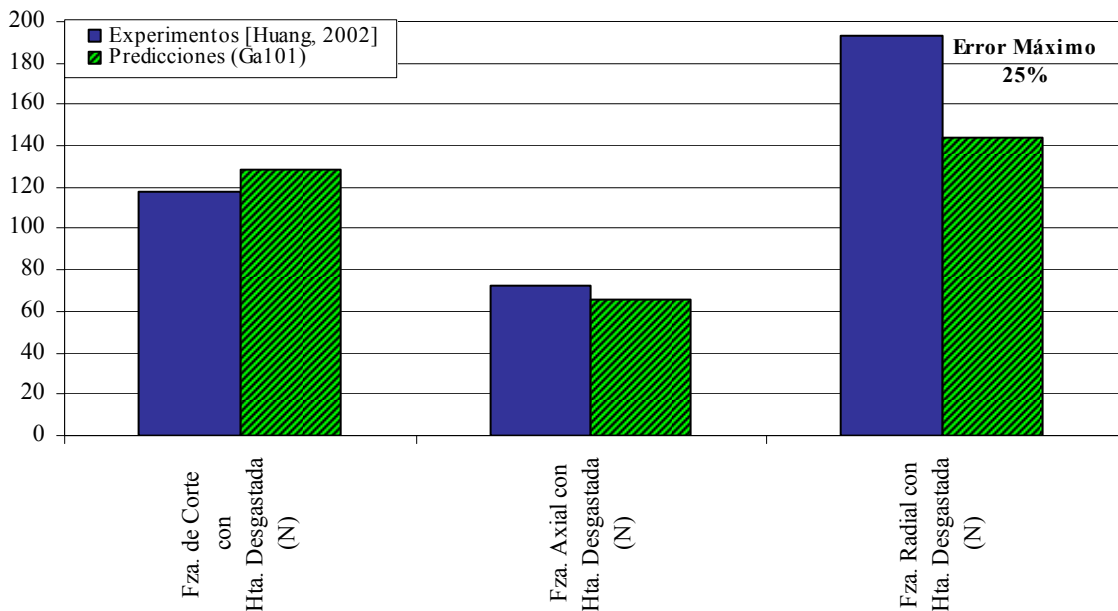


Figura 5.14 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta desgastada, después de 1 minuto de tiempo de corte.



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	91.44	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.076	Profundidad de Corte (mm)	0.203
		Longitud de Corte (mm)	30.48	Diámetro (mm)	72.644	Número de partes	8

Figura 5.15 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta desgastada, después de 8 minutos de tiempo de corte.



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	91.44	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.076	Profundidad de Corte (mm)	0.203
		Longitud de Corte (mm)	30.48	Diámetro (mm)	72.644	Número de partes	26

Figura 5.16 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta desgastada, después de 26 minutos de tiempo de corte.

5.1.2 Desgaste de Flanco de Herramienta

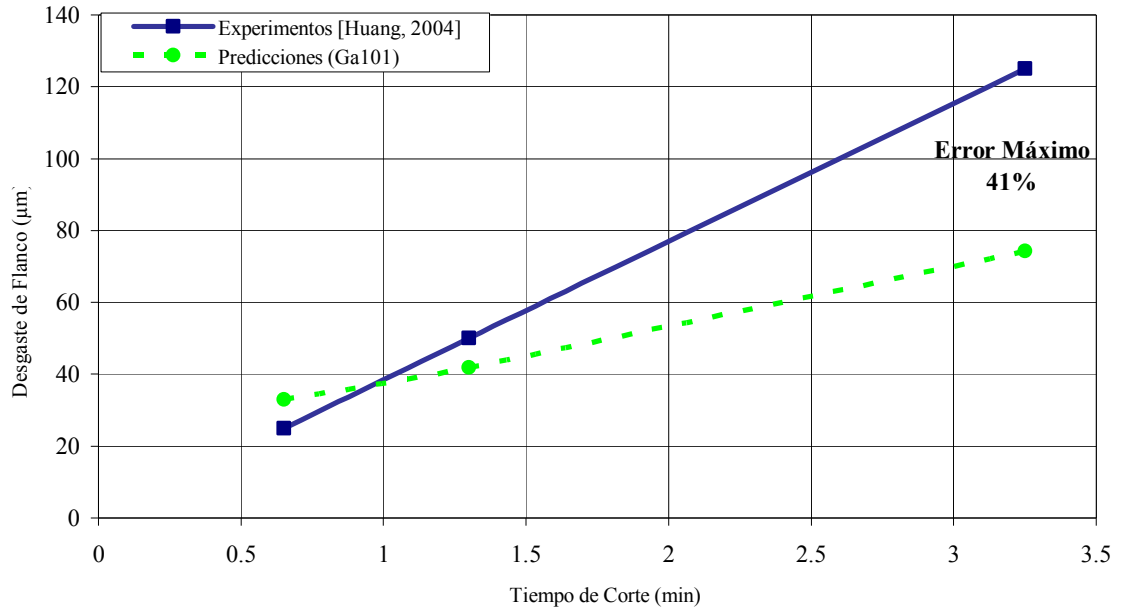
Para la evaluación de las predicciones de desgaste de flanco de la herramienta, solamente se encontraron resultados experimentales, que se encontraran dentro de los rangos del Ga101 (velocidades de corte, avances de la herramienta y profundidades de corte), en los experimentos realizados por Huang [Huang, 2004].

La pieza de trabajo utilizada en los experimentos fue hecha de acero AISI 52100 (62 HRC) y torneada usando insertos KD050 de bajo CBN. Como se mencionó al inicio de este capítulo, los coeficientes necesarios para los cálculos de desgaste de la herramienta fueron encontrados para insertos KD050 de bajo CBN, como se muestra en la Tabla 5.1.

Las Figura 5.17, Figura 5.18 y Figura 5.19 incluyen la comparación entre el desgaste de flanco de la herramienta, experimental y predicho, contra los tiempos de corte; alternando entre diferentes velocidades de corte y avances de la herramienta.

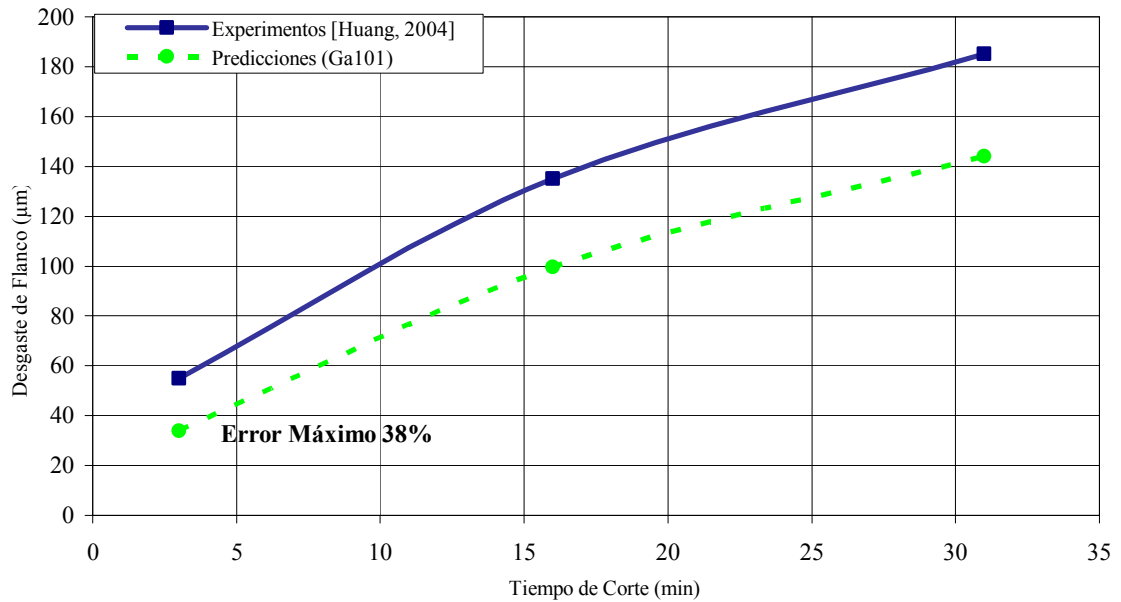
Al observar estas tres figuras, se puede observar que la diferencia entre los valores experimentales y los predichos incrementa al incrementar el tiempo de corte, en otras palabras, la precisión del Ga101 decrece al aumentar el tiempo de corte (igual que en el Grupo 6 de la sección anterior).

Cuando se utilizan la velocidad de corte de 182.88 m/min y el avance de la herramienta de 0.152 mm/rev (Figura 5.17), el error máximo es de 41% en el mayor tiempo de corte. El menor error máximo (30%) es observado cuando se utiliza el menor avance de la herramienta (0.076 mm/rev en la Figura 5.19).



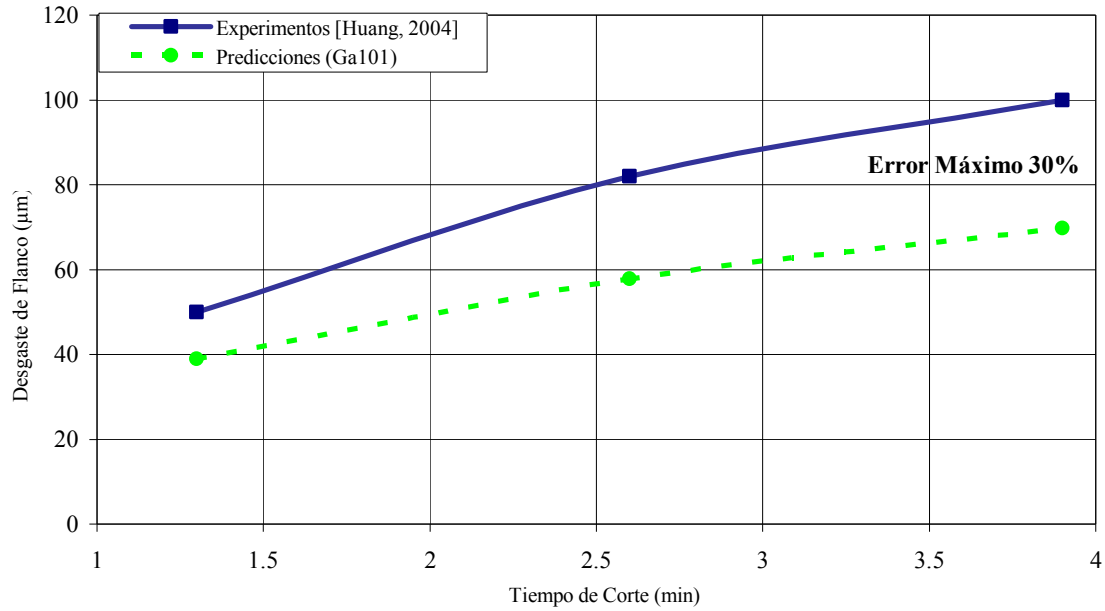
Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	182.88	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.152	Profundidad de Corte (mm)	0.203
		Longitud de Corte (mm)	76.2	Diámetro (mm)	75.692	Número de partes	-

Figura 5.17 Comparación de desgaste de flanco, experimental y predicho, contra tiempo de corte (a 182.88 m/min y 0.152 mm/rev).



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	91.44	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.152	Profundidad de Corte (mm)	0.203
		Longitud de Corte (mm)	76.2	Diámetro (mm)	75.692	Número de partes	-

Figura 5.18 Comparación de desgaste de flanco, experimental y predicho, contra tiempo de corte (a 91.44 m/min y 0.152 m/rev).



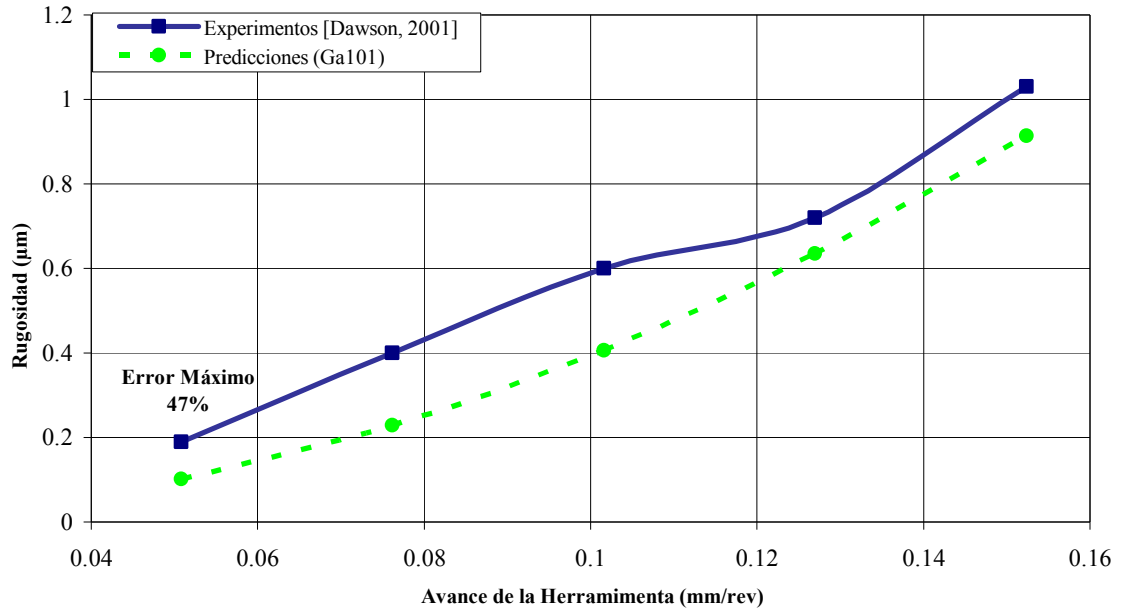
Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	182.88	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.076	Profundidad de Corte (mm)	0.203
		Longitud de Corte (mm)	76.2	Diámetro (mm)	75.692	Número de partes	-

Figura 5.19 Comparación de desgaste de flanco, experimental y predicho, contra tiempo de corte (a 182.88 m/min y 0.076 mm/rev).

5.1.3 Rugosidad

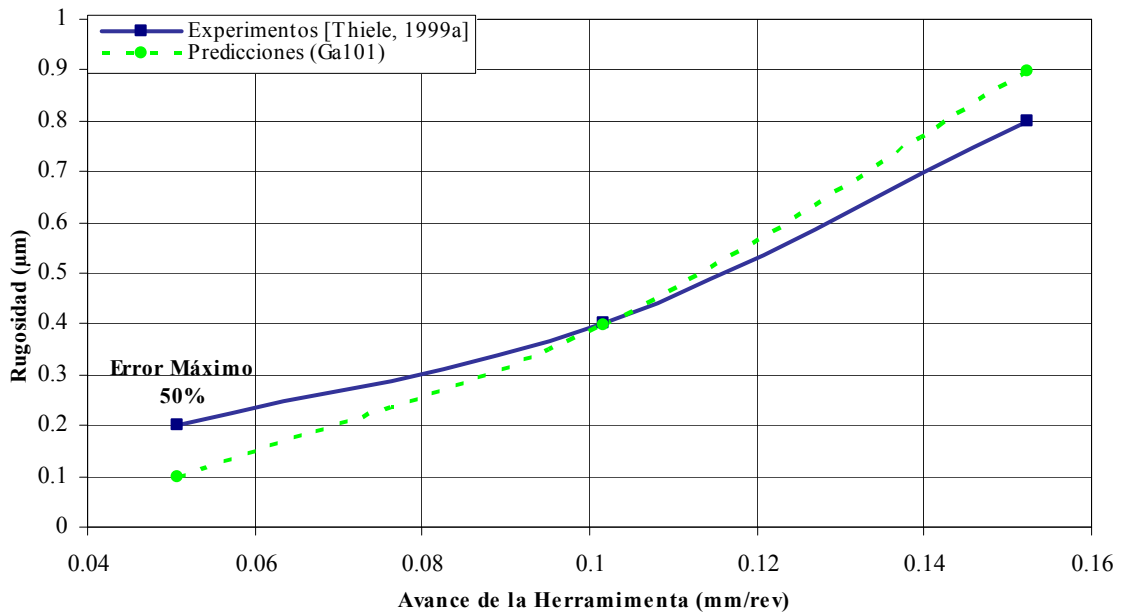
Se encontraron dos casos experimentales con medición de rugosidad, los cuales se usarán en esta evaluación. Ambos casos incluyen la medición de rugosidad después de torneado de acero AISI 52100 endurecido con insertos KD050 de bajo CBN, considerando solamente el uso de herramienta afilada.

En la Figura 5.20, se comparan los valores de rugosidad medidos experimentalmente por Dawson, con los valores predichos por el programa Ga101, bajo las mismas condiciones de corte. Se puede observar, también en la Figura 5.21 con experimentos de Thiele, que la tendencia de los valores predichos, en términos de avance de la herramienta, es la misma que la tendencia de las mediciones de Dawson. De cualquier manera, se presenta un margen de error muy grande (> 47%) al comparar cuantitativamente dichos valores. Este elevado error, refleja la dificultad de predecir la rugosidad en el maquinado en duro, ya que la rugosidad llega a tener valores muy pequeños de hasta una fracción de micrón.



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.794	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-20°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	182.88	Avance de la Hta. (mm/rev)	Varía	Profundidad de Corte (mm)	0.203
		Longitud de Corte (mm)	-	Diámetro (mm)	-	Número de partes	-

Figura 5.20 Comparación de rugosidad a diferentes avances de la herramienta [Dawson, 2001].



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.81	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	0°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (57 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	121.92	Avance de la Hta. (mm/rev)	Varía	Profundidad de Corte (mm)	0.254
		Longitud de Corte (mm)	-	Diámetro (mm)	-	Número de partes	-

Figura 5.21 Comparación de rugosidad a diferentes avances de la herramienta [Thiele, 1999a].

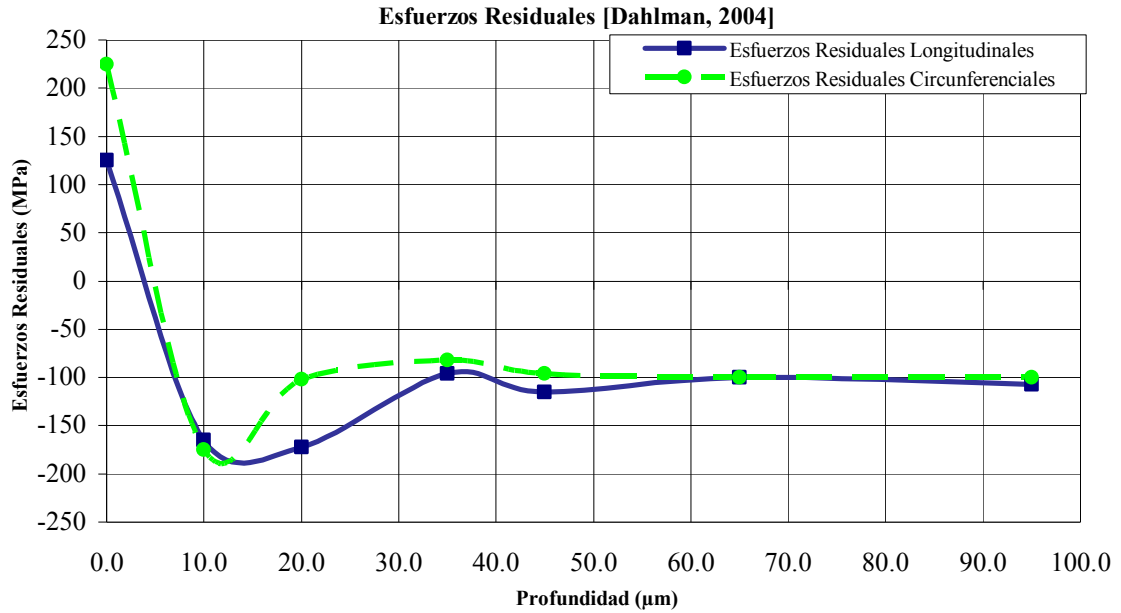
5.1.4 Esfuerzos Residuales

Dado que los modelos inteligentes para predecir esfuerzos residuales fueron removidos de la versión 1.0 del Ga101, para proteger los datos usados en la calibración del pseudo-modelo, no es posible realizar ninguna predicción correctamente. De cualquier manera, algunos resultados experimentales, encontrados en la literatura, se reportan para ayudar en futuras calibraciones del Ga101.

Seis casos experimentales (de la Figura 5.22 a la Figura 5.27) podrían ser utilizados para evaluar los esfuerzos residuales longitudinales y circunferenciales a diferentes profundidades, y también un caso (Figura 5.28 y Figura 5.29) que evalúa los esfuerzos residuales superficiales longitudinales y circunferenciales a diferentes avances de la herramienta para insertos de diferente geometría.

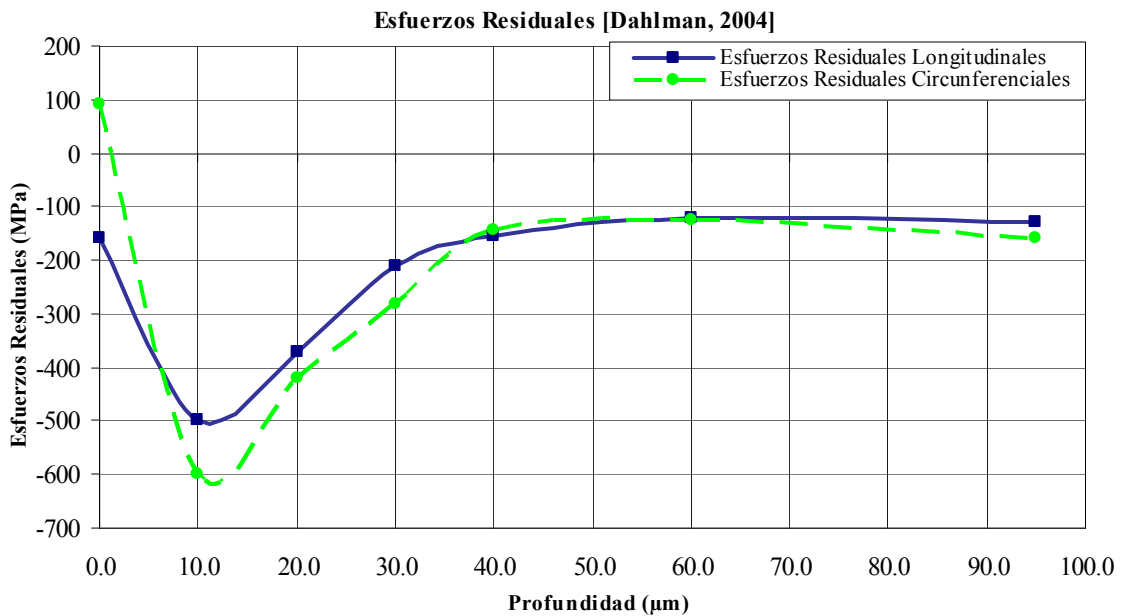
Todos estos casos consideran el torneado de acero AISI 52100 (57~62 HRC) usando herramientas de bajo CBN.

Los primeros cuatro casos experimentales, expresados de la Figura 5.22 a la Figura 5.25, incluyen resultados de los perfiles de esfuerzos residuales, medidos con el método de difracción de rayos X [Dahlman, 2004], a diferentes ángulos en el filo (0°, -15°, -35°, -55°).



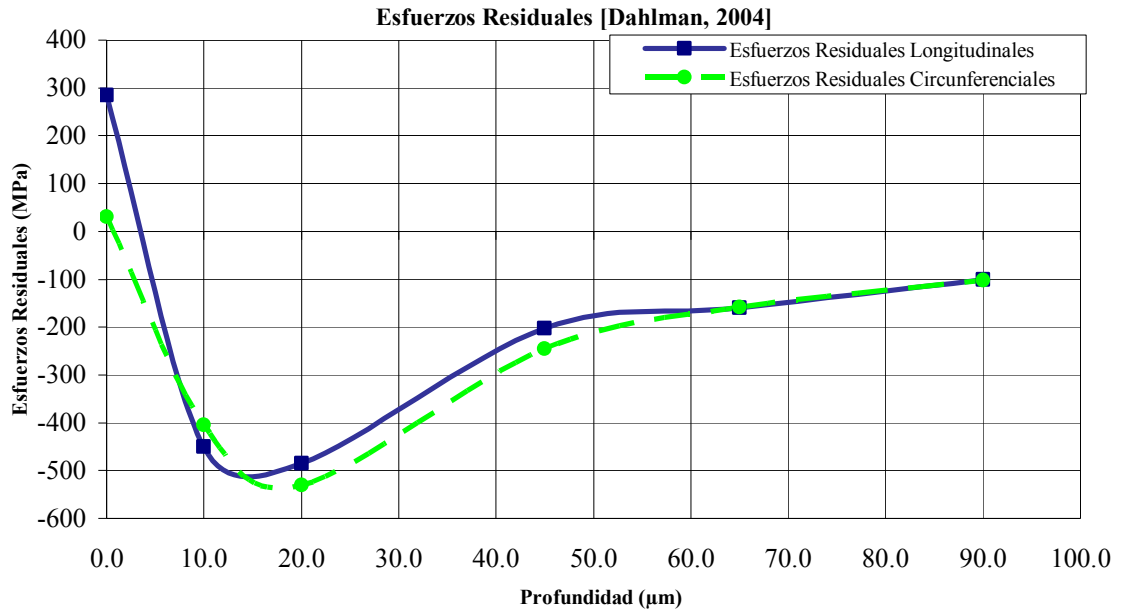
Hta.	Bajo CBN (Seco)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-6°	Ángulo en el filo	0°
		Ángulo de Incidencia	6°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	110	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.1	Profundidad de Corte (mm)	0.1
		Longitud de Corte (mm)	-	Diámetro (mm)	-	Número de partes	-

Figura 5.22 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales, cortando con herramienta afilada y ángulo en el filo de 0°.



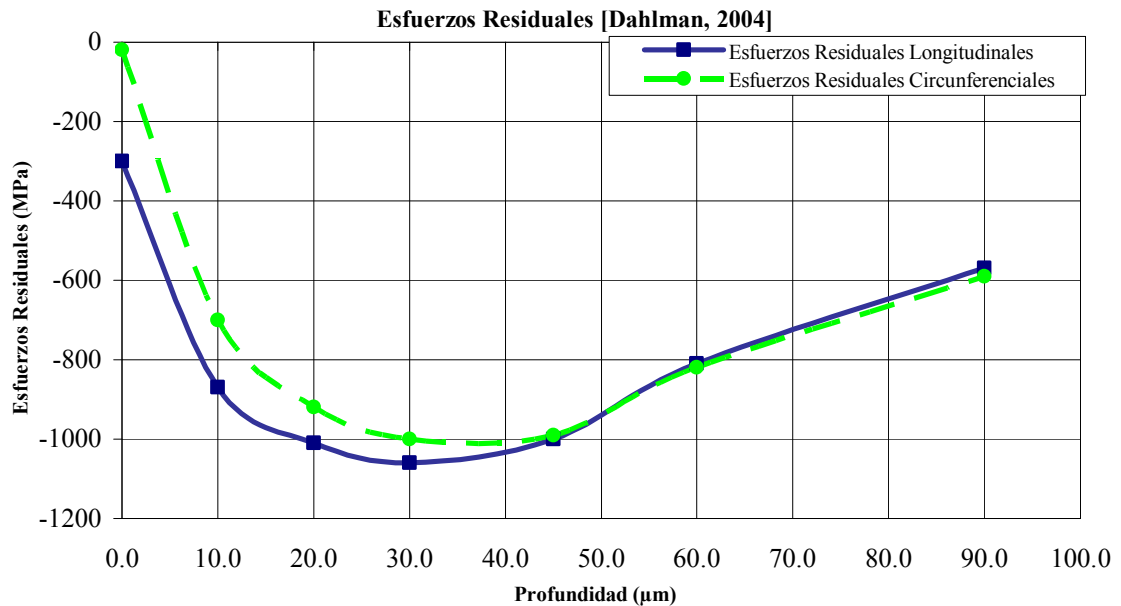
Hta.	Bajo CBN (Seco)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-6°	Ángulo en el filo	-15°
		Ángulo de Incidencia	6°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	110	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.1	Profundidad de Corte (mm)	0.1
		Longitud de Corte (mm)	-	Diámetro (mm)	-	Número de partes	-

Figura 5.23 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales, cortando con herramienta afilada y ángulo en el filo de -15°.



Hta.	Bajo CBN (Seco)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-6°	Ángulo en el filo	-35°
		Ángulo de Incidencia	6°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	110	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.1	Profundidad de Corte (mm)	0.1
		Longitud de Corte (mm)	-	Diámetro (mm)	-	Número de partes	-

Figura 5.24 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales, cortando con herramienta afilada y ángulo en el filo de -35°.

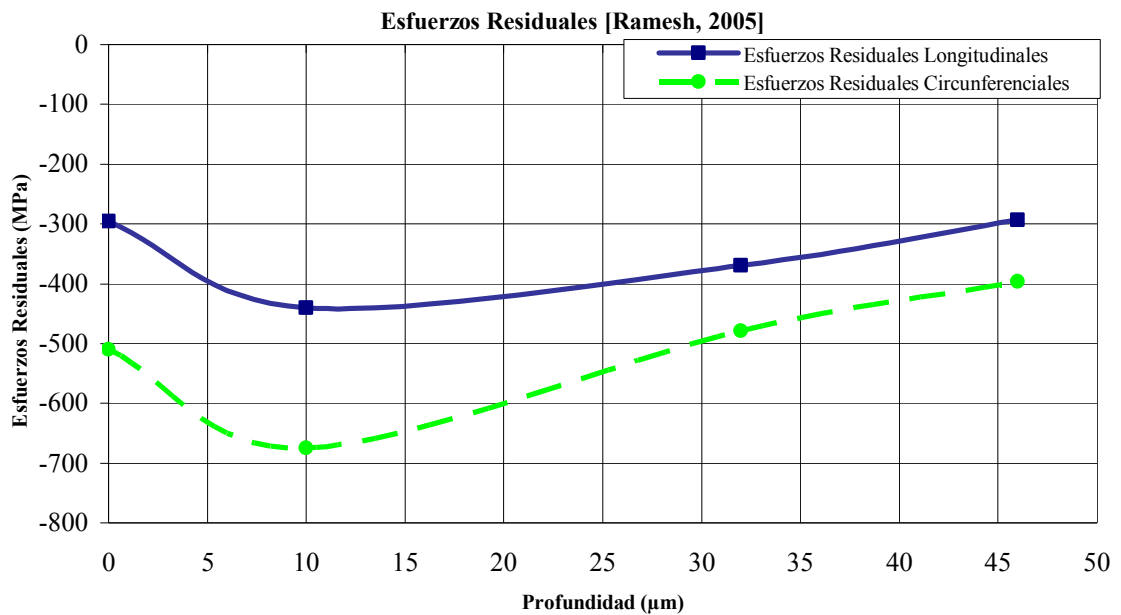


Hta.	Bajo CBN (Seco)	Radio de Nariz (mm)	0.8	Ángulo de Ataque	-6°	Ángulo en el filo	-55°
		Ángulo de Incidencia	6°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	110	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.1	Profundidad de Corte (mm)	0.1
		Longitud de Corte (mm)	-	Diámetro (mm)	-	Número de partes	-

Figura 5.25 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales, cortando con herramienta afilada y ángulo en el filo de -55°.

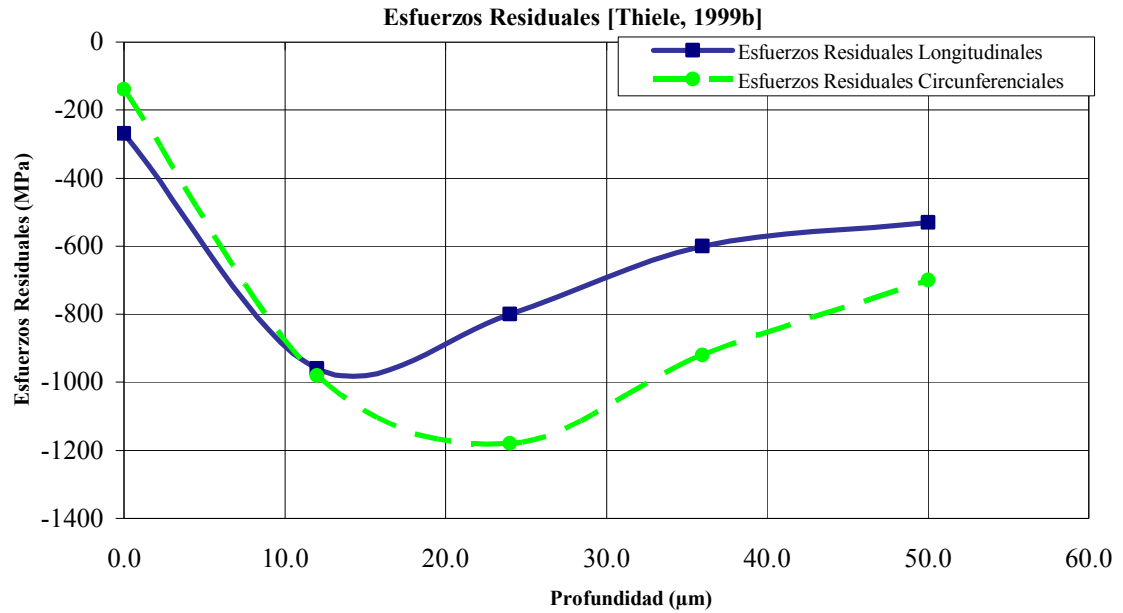
Por otro lado, se presentan otros dos casos experimentales, de Ramesh [Ramesh, 2005] y Thiele [Thiele, 1999b], quienes tornearon con insertos KD050 piezas de trabajo de acero AISI 52100 con durezas de 62 y 57 HRC, respectivamente. Para el primer caso los perfiles de esfuerzos residuales se muestran en la Figura 5.26; para el segundo caso, la Figura 5.27 incluye los resultados de los experimentos.

El último caso reportado, de mediciones experimentales de esfuerzos residuales longitudinales y circunferenciales, es el caso en el que se analizan diferentes avances de la herramienta [Thiele, 2000]. El uso de este caso, puede mejorar la sensibilidad del programa Ga101 ante cambios en los valores de avance de la herramienta. Las Figuras 5.28 y Figura 5.29 contienen los valores medidos de esfuerzos residuales y las condiciones de corte utilizadas para obtenerlos; aquí, se utilizaron dos geometrías en los insertos: de punta afilada (radio del filo $< 25.4\mu\text{m} \times 0^\circ$) y con ángulo en el filo ($115\mu\text{m} \times -17^\circ$), respectivamente. Se puede observar, en las figuras, que las curvas generadas al utilizar los dos insertos tienen la misma forma para los resultados experimentales de ambos esfuerzos residuales (longitudinales y circunferenciales).



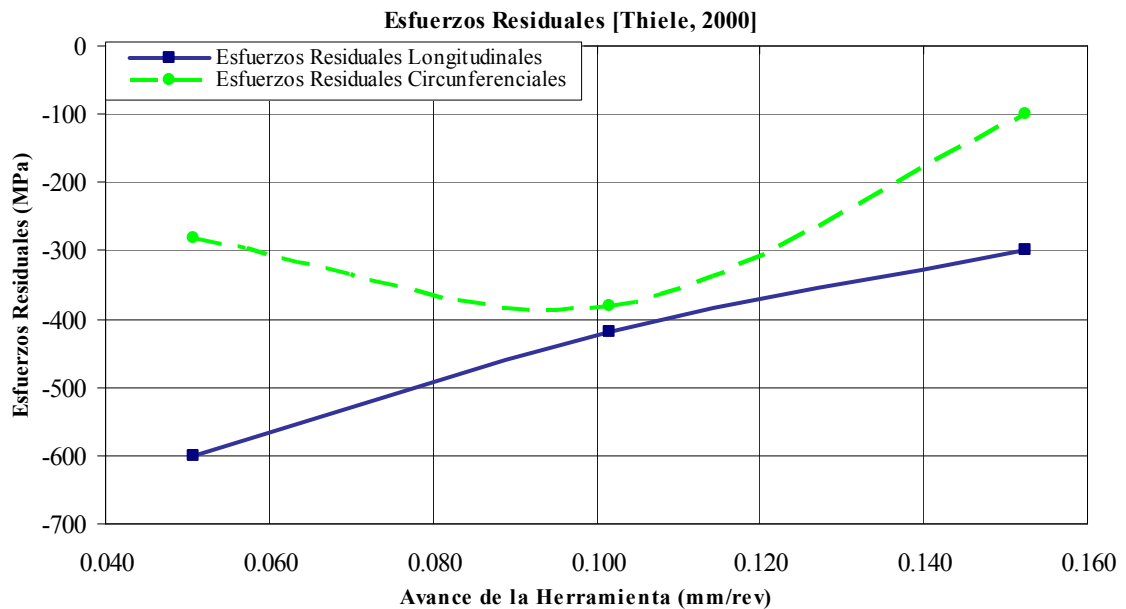
Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.813	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-17°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	91.44	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.127	Profundidad de Corte (mm)	0.254
		Longitud de Corte (mm)	20.32	Diámetro (mm)	34.925	Número de partes	1

Figura 5.26 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales con una velocidad de corte de 91.44m/min.



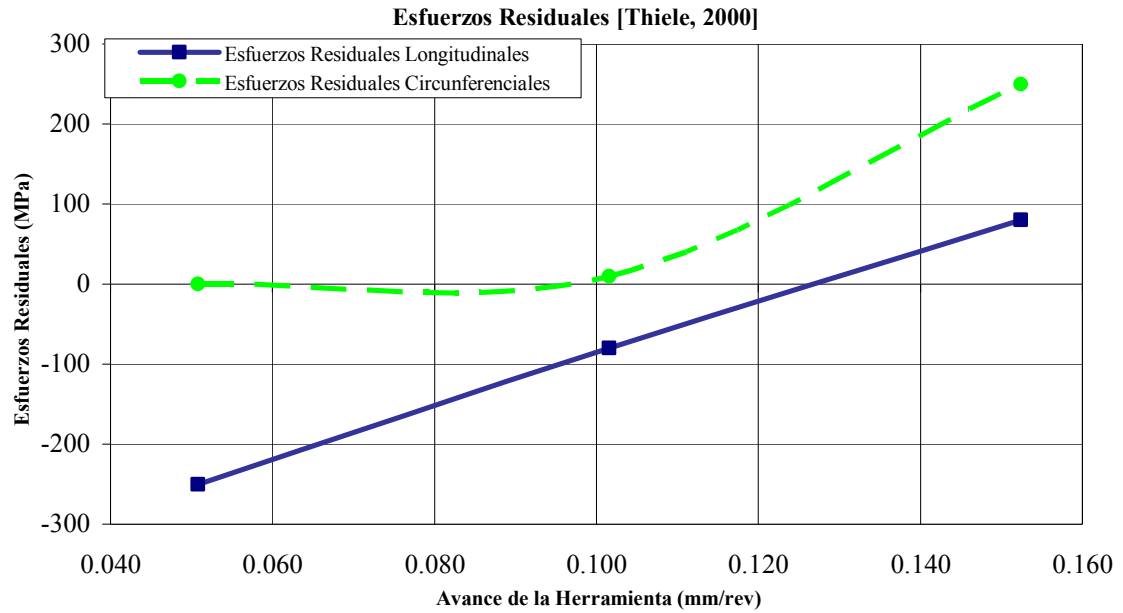
Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.81	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-17°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (57 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	121.92	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.152	Profundidad de Corte (mm)	0.254
		Longitud de Corte (mm)	20.32	Diámetro (mm)	28.6	Número de partes	1

Figura 5.27 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales con una velocidad de corte de 121.92m/min.



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.81	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	0°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (57 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	121.92	Avance de la Hta. (mm/rev)	Varía	Profundidad de Corte (mm)	0.254
		Longitud de Corte (mm)	20.32	Diámetro (mm)	28.6	Número de partes	1

Figura 5.28 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales a diferentes avances de la herramienta usando una herramienta afilada.



Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.81	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-17°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (57 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	121.92	Avance de la Hta. (mm/rev)	Varía	Profundidad de Corte (mm)	0.254
		Longitud de Corte (mm)	20.32	Diámetro (mm)	28.6	Número de partes	1

Figura 5.29 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales a diferentes avances de la herramienta usando una herramienta con ángulo en el filo.

5.1.5 Capa Blanca

El programa Ga101 debería no solamente de predecir la formación de capa blanca, sino también su espesor o profundidad dentro de la superficie maquinada. Al remover el modelo inteligente que lo predice, para proteger los datos utilizados en su calibración, esta opción quedó deshabilitada. De cualquier manera, aquí se incluyen resultados experimentales, encontrados en la literatura, que podrían ayudar en futuras calibraciones del programa Ga101.

Diversas referencias encontradas en la literatura reportan mediciones del espesor de la capa blanca después de torneado de acero AISI 52100. Pero, en la mayoría de los casos, alguna de las condiciones de corte (velocidad de corte, avance de la herramienta y profundidades de corte) utilizadas en los experimentos, no se ajustaban a los rangos del Ga101. Las mediciones de capa blanca que se ajustaron a los rangos de solamente reportan la “existencia” o “no existencia” de capa blanca.

El primer caso experimental en el cual se observa la “existencia” de capa blanca fue conducido por Ramesh [Ramesh, 2005]. Las condiciones de corte utilizadas en este caso se muestran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Condiciones de corte a las que se reportó existencia de capa blanca [Ramesh, 2005].

Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.813	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-17°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (62 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	91.44	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.152	Profundidad de Corte (mm)	0.254
		Longitud de Corte (mm)	20.32	Diámetro (mm)	34.925	Número de partes	1

El segundo caso experimental fue reportado por Thiele [Thiele, 2000]. Aquí la “existencia” de capa blanca también es afirmativa, como en el primer caso, para las condiciones de corte mostradas en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Condiciones de corte a las que se reportó existencia de capa blanca [Thiele, 2000].

Hta.	Bajo CBN (KD050)	Radio de Nariz (mm)	0.81	Ángulo de Ataque	-5°	Ángulo en el filo	-17°
		Ángulo de Incidencia	5°				
Pieza de Trabajo	AISI 52100 (57 HRC)	Velocidad de Corte (m/min)	121.92	Avance de la Hta. (mm/rev)	0.152	Profundidad de Corte (mm)	0.254
		Longitud de Corte (mm)	20.32	Diámetro (mm)	28.6	Número de partes	1

Con solamente estos dos casos experimentales, no es posible realizar una calibración completa del programa, pero se podrían utilizar para verificar la capacidad del programa al predecir la existencia de capa blanca, una vez que sea calibrado.

5.2 Validación de las Predicciones Utilizando el Modelo de FEM

Aquí se comparan los resultados obtenidos en las simulaciones de FEM con los resultados de experimentos y simulaciones encontrados en la literatura [Ramesh, 2002], esto con el fin de encontrar la exactitud del modelo de elemento finito desarrollado en el código utilizado (DEFORM 2D ®), y también para resaltar algunos factores que sean responsables de discordancias entre los experimentos reportados y las simulaciones de este trabajo, o entre las simulaciones reportadas y las simulaciones de este trabajo.

5.2.1 Predicción de Fuerzas en el Corte

Las Figura 5.30 y Figura 5.31 muestran la comparación de los resultados de fuerzas de corte y de empuje, simuladas usando DEFORM 2D ®, y los resultados de

fuerzas experimentales y simuladas usando ABAQUS ®, encontrados en la literatura [Ramesh, 2002].

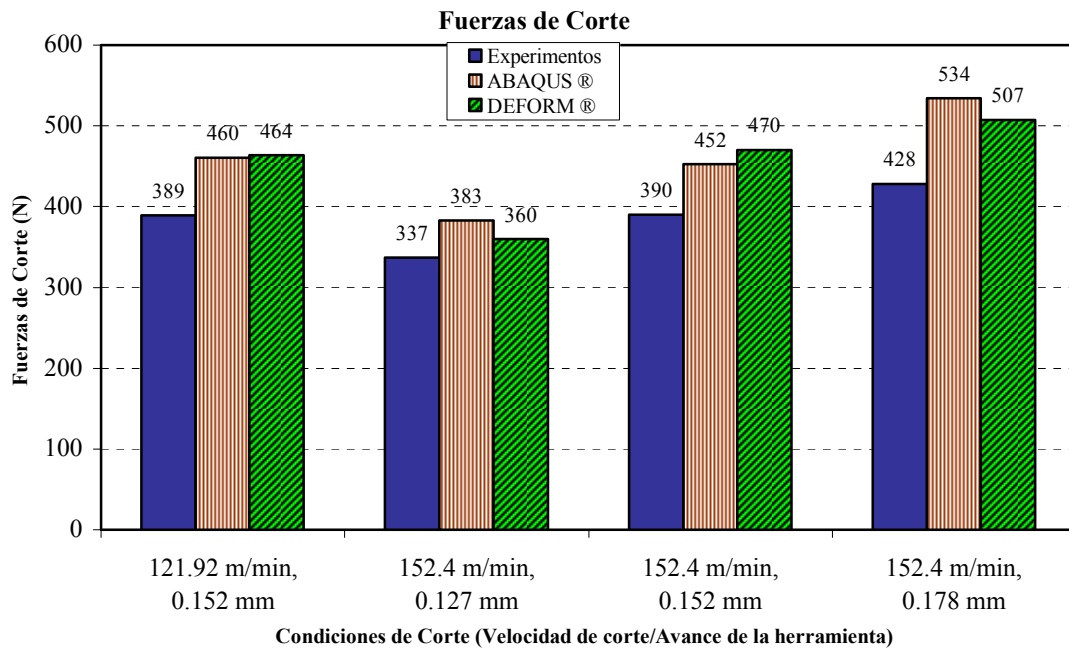


Figura 5.30 Comparación de las fuerzas de corte simuladas, con los valores experimentales y simulados de la literatura.

Se ha encontrado que existe una razón de 3 entre la fuerza de corte y la fuerza de empuje en los procesos de corte [Mamalis, 2001]. En los resultados de las simulaciones usando DEFORM 2D ® se puede observar una razón promedio de 2.73 entre las fuerzas, siendo la fuerza de corte siempre mayor que la de empuje. Pero para los resultados experimentales dicha razón no se cumple.

Los resultados de la componente de fuerza de corte, obtenidos con DEFORM 2D ® son 7 – 20% mayores que los resultados experimentales. Por su lado, los resultados de la componente de fuerza de empuje son 28 – 40% menores que los resultados experimentales.

La comparación entre los resultados de las simulaciones obtenidas con DEFORM 2D ® y ABAQUS ® muestra una buena concordancia en cuanto a fuerzas de corte (6%), pero los resultados en fuerzas de empuje, de DEFORM 2D ®, son hasta 37% más bajos que los de ABAQUS ®.

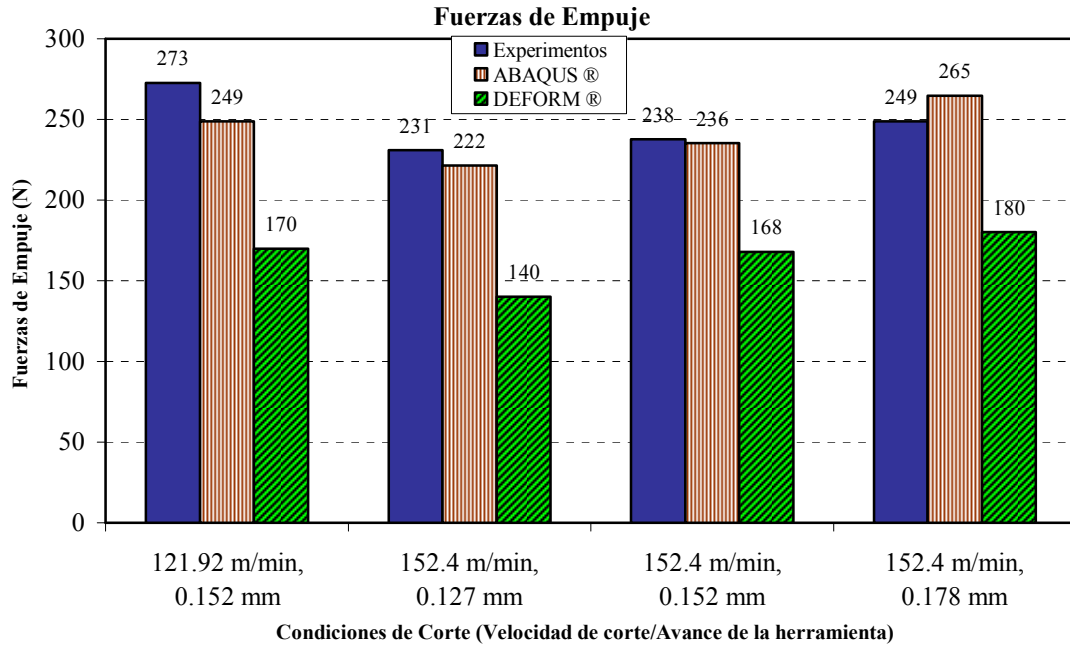


Figura 5.31 Comparación de las fuerzas de empuje simuladas, con los valores experimentales y simulados de la literatura.

Entre otros factores, que pueden ser atribuidos a las diferencias en los resultados de las simulaciones de fuerzas (tanto de corte como de empuje), son el modelo de esfuerzo de flujo del material, y el modelo de fricción utilizado en las simulaciones.

Un modelo de esfuerzo de flujo exacto es muy importante para predecir resultados correctos en ciertas condiciones de temperatura, deformación y razón de deformación del material; como se sabe, en el maquinado el material se comporta de manera diferente a procesos de formado comunes, ya que sufre tanto de temperaturas como de razones de deformación muy altas.

El modelo de esfuerzo de flujo utilizado en las simulaciones, que fue el mismo que se utilizó en la literatura (con ABAQUS®), tienen un rango limitado de aplicación tanto para temperatura, deformación y razón de deformación. Esto, debido a que los elementos de las simulaciones de la literatura solamente podían ser deformados y esforzados hasta un cierto valor específico para ser arrancados de la pieza de trabajo, evitando así la necesidad de un modelo que funcione para altos valores de temperatura, deformación y razón de deformación.

La única solución viable para el problema del modelo de esfuerzo de flujo, de rangos limitados, fue modificarlo para que al encontrar valores que estuvieran fuera de

sus rangos utilizara el valor final más cercano. Evitando así extrapolaciones inexactas que pueden generar errores mucho mayores.

El modelo de fricción implementado en la interfase de contacto, entre la herramienta y la pieza de trabajo y la viruta, puede tener también efectos significativos en las fuerzas predichas. En las simulaciones se decidió utilizar un factor constante de corte de 0.6 , el cual es diferente al utilizado en las simulaciones de la literatura de 0.35 para el factor de fricción de Coulomb.

Esta modificación se realizó debido a que dichos valores son equivalentes y que se encontró una distribución no uniforme de temperatura desde el inicio de las simulaciones. En este tipo de simulaciones, del proceso de arranque de material, sería más adecuado adoptar un factor de corte, ya que la fricción por corte es la principal fuente de calor en las interfaces del proceso. Las simulaciones de predicción de fuerzas, no se vieron afectadas al modificar el modelo de fricción, lo cual no se esperaba de esta manera.

5.2.2 Predicción de Capa Blanca

En la Tabla 5.5 se muestra la comparación de los espesores de capa blanca predichos, con experimentos y predicciones de la literatura [Ramesh, 2002]. En esta tabla, los valores de la temperatura de transformación de fase se consideran como se mencionó en el punto 3.3, donde las temperaturas de formación de capa blanca serían $570.77^{\circ}C$ y $547.79^{\circ}C$ para avances de 0.127 mm/rev y 0.178 mm/rev , respectivamente; utilizándose de igual manera para las velocidades de corte de 213.36 m/min y 274.32 m/min .

Tabla 5.5 Comparación del espesor de la capa blanca predicho, con experimentos y predicciones de la literatura, utilizando la temperatura de transformación de fase como en la literatura [Ramesh, 2002].

Velocidad (m/min)	Avance (mm)	Espesor de Capa Blanca (μm)		
		Experimental	ABACUS®	DEFORM 2D®
243.84	0.127	1.89	1.89	3.2
243.84	0.178	1.95	1.95	6.4
213.36	0.127	1.72	1.18	2.5
274.32	0.127	1.91	1.96	4.7
213.36	0.178	1.75	1.21	5.8
274.32	0.178	1.92	2.11	6.4

Los resultados comparativos, de los espesores de la capa blanca, no son muy alentadores, ya que muestran una predicción de espesores 45–230% mayores a los espesores experimentales e incluso a los predichos en la misma literatura.

Posteriormente, y después de estos malos resultados, la temperatura de transformación de fase se recalibró de la misma manera que se hizo en la literatura, usando los resultados experimentales a la velocidad de 243.84 m/min con avances de 0.127 mm/rev y 0.178 mm/rev para correlacionar el espesor experimental de la capa blanca con los perfiles de temperatura simulados (con DEFORM 2D ®) en la superficie maquinada.

Así, las nuevas temperaturas de transformación de fase se modificaron a 597°C y 635°C para avances de 0.127 mm/rev y 0.178 mm/rev , respectivamente, las cuales se utilizaron nuevamente para predecir el espesor de la capa blanca a las velocidades de 213.36 m/min y 274.32 m/min . Los resultados se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Comparación del espesor de la capa blanca simulado, con experimentos y simulaciones de la literatura, utilizando la temperatura de transformación de fase recalibrada.

Velocidad (m/min)	Avance (mm)	Espesor de Capa Blanca (μm)		
		Experimental	ABACUS ®	DEFORM 2D ®
243.84	0.127	1.89	1.89	1.89
243.84	0.178	1.95	1.95	1.95
213.36	0.127	1.72	1.18	1.2
274.32	0.127	1.91	1.96	3.5
213.36	0.178	1.75	1.21	0.7
274.32	0.178	1.92	2.11	2.2

Después de recalibrar las temperaturas de transformación de fase, el error se redujo considerablemente hasta un 15–84%, pero no lo suficiente al compararlos con el error que tienen las predicciones de la literatura de 3–32% donde se utilizó ABAQUS ® para obtener los perfiles de temperaturas en la pieza de trabajo.

La diferencia entre los resultados de las predicciones de este trabajo y las de la literatura, se puede atribuir nuevamente al modelo de esfuerzo de flujo. En la literatura se utilizó un modelo desarrollado usando el procedimiento establecido por Oxley [Ramesh, 2005], mientras que en este trabajo el modelo utilizado fue desarrollado por Huang usando la ecuación de Johnson-Cook y la teoría de la predicción del maquinado del mismo Oxley [Huang, 2002].

El modelo de esfuerzo de flujo del material de trabajo, que se utilizó en la literatura, fue probado en el modelo de elemento finito usando DEFORM 2D ®, pero presentó abultamiento en la superficie a cortar y una falta de plano de corte al inicio de las simulaciones. Fue por esto que se decidió modificar el modelo, por otro utilizado previamente en simulaciones de arranque de material, como es el desarrollado por Huang. Esto para obtener mejores resultados en lo que se refiere a fuerzas de corte y distribución de temperaturas.

Otro factor, que pudo haber contribuido a la diferencia en los resultados de las predicciones, es la diferencia en las formulaciones de los códigos de elemento finito. DEFORM 2D ® es un código implícito basado en formulaciones lagrangianas actualizadas, mientras ABAQUS ® (usado en la literatura) es un código explícito basado en formulaciones eulerianas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- En este trabajo se incluye información valuable acerca del nuevo programa desarrollado por el Ga Tech, además de una evaluación de sus capacidades, y una validación, al comparar resultados experimentales con los predichos por el programa Ga101.
- Dado que el programa Ga101 (versión 1.0) no tiene ningún manual de usuario, fue necesario realizar una investigación de su funcionamiento, sus partes, sus funciones y los alcances que podría tener.
- Como los modelos inteligentes y pseudo-modelos que intervienen en las predicciones del programa se han desarrollado con datos confidenciales, algunos de ellos se retiraron de esta versión, hasta que sean perfeccionados y protegidos totalmente.
- De cualquier manera la codificación en lenguaje C no pudo ser revisada por las mismas razones de seguridad y para proteger los derechos de autor.
- La intensa revisión de literatura se espera que sea fructífera, ya que, además de la información obtenida de ella, se pudo validar el programa Ga101 y se reportaron resultados experimentales que podrán ser utilizados en futuras calibraciones y/o validaciones.
- El programa Ga101, muestra la gran ventaja de ser simple y rápido para predecir las variables envueltas en el torneado en duro; mientras que sus limitaciones, como el limitado rango de condiciones de corte, el disminuido número de herramientas y

piezas de trabajo disponibles, así como opciones que no están habilitadas o que no funcionan propiamente, deberán de resolverse en versiones posteriores.

➤ Las siguientes conclusiones se mencionan con base en el trabajo comparativo realizado en el punto 5.1 de este trabajo:

- La falta de datos experimentales, para las piezas de trabajo y las herramientas predefinidas en el Ga101, limitaron la validación a la combinación de insertos de bajo CBN (KD050 principalmente) con acero AISI 52100. Resultando esto en que más resultados experimentales son requeridos para una mejor validación del programa.
- La evaluación de la funcionalidad de la opción “material definido por el usuario”, para la pieza de trabajo, mostró que aún no funciona adecuadamente.
- Al evaluar las fuerzas en el corte con herramienta afilada, el error de hasta 33% (al predecir la fuerza axial a pequeños valores de avance de la herramienta y de profundidad de corte) puede deberse al hecho de que las ecuaciones analíticas utilizadas en el programa (ecuaciones de mecánica del corte) no dan buenos resultados a pequeños valores de profundidad de corte y avance de la herramienta, como sería el caso del rozamiento; y menos cuando se utiliza ángulo en el filo de la herramienta (de -20° en este caso).
- El error al predecir las fuerzas en el corte disminuye, al disminuir la velocidad de corte y al aumentar la profundidad de corte. Esta conclusión se podría extender para el aumento en el avance de la herramienta, pero un resultado contradictorio que se presentó, abre la posibilidad de que las propiedades mecánicas del material en los experimentos y el predefinido en el programa, tengan algunas diferencias.
- Una diferencia en la dureza de la pieza de trabajo (57 HRC en los experimentos y 60~62 HRC del material predefinido en el programa Ga101) causa un error de hasta 44% en las predicciones de fuerzas de corte con herramienta afilada.
- Las fuerzas en el corte, con herramienta desgastada, se predicen pobremente en la dirección axial, dado que se presenta un error de hasta 25% al incrementar el tiempo de corte (o cantidad de desgaste).

- El error al predecir el desgaste de flanco aumenta severamente (hasta 41%) al incrementar el tiempo de corte. Esto posiblemente afecte directamente a las fuerzas mencionadas en la conclusión anterior.
 - La tendencia de los valores de rugosidad predichos y los experimentales es muy similar, de cualquier manera, el error cuantitativo es de 50% observado a bajos valores de avance de la herramienta. Dicho margen de error refleja lo difícil que es predecir la rugosidad dentro de un margen de error de $\sim 0.2\mu\text{m}$, como en este caso.
 - Aunque se mostraron grandes valores de error para casi todas las variables predichas por el programa Ga101, mejores resultados podrían obtenerse si se expande el trabajo experimental utilizado en su calibración, prestando mayor atención a posibles fuentes de error para cada variable.
 - Son necesarios más detalles al especificar los materiales utilizados en el programa Ga101, ya que pequeñas variaciones en la dureza o las demás propiedades físicas, pueden contribuir a aumentar errores de predicción, muy notablemente.
- El uso del método de elemento finito (FEM) para predecir las variables envueltas en el corte de metales, se ha desarrollado ampliamente en los últimos años. En este trabajo, se utilizó un código de elemento finito llamado DEFORM 2D ®, para predecir la formación de capa blanca (en base a simulaciones de distribución de temperaturas en la superficie maquinada), y las fuerzas en el corte.
- El material y la geometría de las herramientas y de las piezas de trabajo fueron mantenidas iguales para cada uno de los casos (fuerzas o capa blanca), variando solamente las condiciones de corte como se especificó en la referencia.
- Como en el código de elemento finito DEFORM 2D ®, las simulaciones utilizando material elástico-plástico aún no funcionan apropiadamente, la pieza de trabajo tuvo que asumir un comportamiento plástico solamente; con un esfuerzo de flujo de material dependiente de la temperatura, la deformación y la razón de deformación.
- Al simular el corte de metales, se pueden experimentar algunas dificultades de convergencia o de remalleo. Para superar estas dificultades, y evitar la falta de material, se utilizaron dos subrutinas (MESH CUT y MESH MAN) en las simulaciones.

- La comparación de los resultados de las simulaciones (usando DEFORM 2D ®), con los experimentales y simulaciones (usando ABAQUS ®) de la literatura, muestran poca concordancia. A continuación se sobresaltan posibles razones de los vastos errores mencionados en el punto 5.2 de este trabajo:
- La distribución de la malla, en la pieza de trabajo, es una situación clave al simular la distribución de temperaturas, en zonas específicas y reducidas. La malla se distribuyó tan fina como en el plano de corte, aumentando gradualmente hacia el resto de la pieza de trabajo. Esto ayuda a evitar problemas de convergencia comunes al borrar elementos.
 - La forma de las curvas del modelo de esfuerzo de flujo a altos valores de deformación, los cuales pueden quedar más allá de los valores comúnmente alcanzados con pruebas comunes de los materiales, tienen una influencia significativa en las simulaciones de maquinado. Después de modificar el modelo de fricción para el acero AISI 52100 y al observar los diversos problemas que se presentaron con ambos modelos (de esfuerzo de flujo y de fricción), se enfatiza la necesidad de desarrollar pruebas de materiales que representen correctamente el comportamiento del material a valores extremos de temperatura, deformación y razón de deformación.
 - Resulta obvio, que las temperaturas en la interfase, de la herramienta con la viruta y la pieza de trabajo, alcancen temperaturas cercanas o mayores a la temperatura de austenización. Pero, debido a la corta duración de esta temperatura, incluso si esta temperatura rebasara el punto de fusión del material, no ocurre ninguna fusión o austenización del material.

6.2 Recomendaciones

Varios puntos deberían de ser considerados para trabajos futuros:

- Versiones actualizadas del programa Ga101, preferentemente con un manual de usuario o guía rápida de uso. Además de tener todas sus opciones activadas.
- Calibración del programa Ga101, usando los datos experimentales de este trabajo y de todos los trabajos disponibles acerca del tema.

- Se deberá realizar una validación a cada una de las siguientes versiones del programa Ga101 antes de ser implementadas en la industria.
- Investigación de las posibles razones por las que se tienen valores bajos en la componente de fuerza de empuje al compararse con los valores experimentales, para mejorar los resultados de este trabajo.
- Ampliar la investigación de la mecánica de la formación de la capa blanca para incluir el comportamiento de la microestructura relacionado con la transformación de fase (incluso en las simulaciones).
- Desarrollar nuevas pruebas de materiales, para obtener esfuerzos de flujo que representen correctamente el comportamiento del material a valores extremos de temperatura, deformación y razón de deformación.
- Implementar el modelo de fricción de Sorbe en las simulaciones usando DEFORM 2D ®, ya que este modelo toma en cuenta las zonas de adherencia y de deslizamiento en la interfase de la herramienta con la viruta y la pieza de trabajo.
- Realizar experimentos donde se utilice herramienta desgastada, esto para poder medir el espesor de la capa blanca y tener más resultados experimentales para comparar las simulaciones de este trabajo y de trabajos posteriores.
- Preparar y probar modelos de elemento finito, para simular con material elástico-plástico, ya sea en la pieza de trabajo, en la herramienta o en ambos. Esto también, para investigar los efectos de las deformaciones elásticas en la fuerza de empuje.

REFERENCIAS

- [Abouelatta, 2001] Abouelatta, O. B. and Mádl, J., 2001, "Surface Roughness Prediction Based on Cutting Parameters and Tool Vibrations in Turning Operations," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 118, pp. 269-227.
- [Akcan, 2002] Akcan, S., Shah, S., Moylan, S. P., Chhabra, P. N., Chandrasekar, S. and Yang, H. T. Y., 2002, "Formation of White Layers in Steel by Machining and their Characteristics," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 33A, pp. 1245-1254.
- [Barry, 2002] Barry, J. and Byrne, G., 2002, "TEM Study on the Surface White Layer in Two Turned Hardened Steels," *Materials Science and Engineering*, Vol. A325, pp. 356-364.
- [Ceretti, 1999] Ceretti, E., Lucchi, M. and Altan, T., 1999, "FEM Simulation of Orthogonal Cutting: Serrated Chip Formation," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 95, pp. 17-26.
- [Chandrashekar, 2001] Chandrashekar, N., Feve, S., Yen, Y.-C. and Altan, T., 2001, "Tool Wear in Conventional Bar Turning Test - Comparison with 2D Orthogonal Cutting Test," Report No. HPM/ERC/NSM-01-R-30, The Ohio State University.
- [Chou, 1998] Chou, Y. K., and Evans, C. J., 1998, "Process Effects on White Layers Formation in Hard Turning," *NAMRI/SME*, Vol. XXVI, pp. 117-122.
- [Chou, 1999] Chou, Y. K., and Evans, C. J., 1999, "White Layers and Thermal Modeling of Hard Turned Surfaces," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 1863-1881.
- [Chou, 2002] Chou, Y. K., 2002, "Surface Hardening of AISI 4340 Steel by Machining: a Preliminary Investigation," *Journal of Materials*

- Processing Technology, Vol. 124, pp. 171-177.
- [Chou, 2003] Chou, Y. K. and Song, H., 2003, "Thermal Modeling for Finishing Hard Turning Using a New Tool," ASME International Mechanical Engineering Congress, IMECE2003-41765, pp. 1-10.
- [Chou, 2004] Chou, Y. K. and Song, H., 2004, "Tool Nose Radius Effects on Finish Hard Turning," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 148, pp. 259-268.
- [Dahlman, 2004] Dahlman, P., Gunnberg, F. and Jacobson, M., 2004, "The Influence of Rake Angle, Cutting Feed and Cutting Depth on Residual Stresses in Hard Turning," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 147, pp. 181-184.
- [Dawson, 2001] Dawson, T. G. and Kurfess, T. R., 2001, "Tool Life, Wear Rates, and Surface Quality in Hard Turning," Society of Manufacturing Engineers. Conference NAMRC XXIX, May 22-25, 2001. Gainesville, Florida.
- [Dawson, 2002] Dawson, T. G., 2002, "Machining Hardened Steel with Polycrystalline Cubic Boron Nitride Cutting Tools," Georgia Institute of Technology, Thesis for Ph. D. in Mechanical Engineering.
- [Dessoly, 2004] Dessoly, V., Melkote, S. N., and Lescalier, C., 2004, "Modeling and Verification of Cutting Tool Temperatures in Rotary Tool Turning of Hardened Steel," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, pp. 1463-1470.
- [Diniz, 2003] Diniz, A. E., Ferreira, J. R., and Filho, F. T., 2003, "Influence of Refrigeration/Lubrication Condition on SAE 52100 Hardened Steel Turning at Several Cutting Speeds," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, pp. 1463-1470.
- [Fallböhmer, 2000] Fallböhmer, P., Rodríguez, C. A., Özel, T. and Altan, T., 2000, "High-Speed Machining of Cast Iron and Alloy Steels for Die and Mold Manufacturing," Journal of Materials Processing

- Technology, Vol. 98, pp. 104-115.
- [Feng, 2002] Feng, C. X. and Wang, X., 2002, "Development of Empirical Models for Surface Roughness Prediction in Finish Turning," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 20, pp. 348-356.
- [Gillibrand, 1996] Gillibrand, D, Sarwar, M, and Pierce, C. T., 1996, "The Economic Benefit of Finish Turning with Coated Carbide," Surface and Coating Technology, Vol. 86-87, pp. 809-813.
- [Griffiths, 1987a] Griffiths, B. J. and Furze, D. C., 1987, "Tribological Advantages of White Layer Produced by Machining," Journal of Tribology ASME, Vol. 109, pp. 338-342.
- [Griffiths, 1987b] Griffiths, B. J., 1987, "Mechanisms of White Layer Generation with Reference to Machining and Deformation Processes," Journal of Tribology ASME, Vol. 109, pp. 525-530.
- [Guo, 2004] Guo, Y. B. and Sahni J., 2004, "A Comparative Study of Hard Turned and Cylindrical Ground White Layers," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, pp. 135-145.
- [Huang, 2002] Huang, Y., 2002, "Predictive Modeling of Tool Wear Rate with Applications to CBN Hard Turning," Georgia Institute of Technology, Thesis for Ph. D. in Mechanical Engineering.
- [Huang, 2004] Huang, Y. and Liang, S. Y., 2004, "Modeling of CBN Tool Flank Wear Progression in Finish Hard Turning," American Society of Mechanical Engineering, Vol. 126, pp. 98-106.
- [Jain, 2001] Jain A., Yen, Y.-C., Altan, T., 2001, "A Finite Element Analysis of Machining Taking into Consideration the Effect of Tool Edge Geometry," Report No. HPM/ERC/NSM-01-R-12, The Ohio State University.
- [Jain, 2003] Jain, A., Yen, Y.-C. and Altan, T., 2003, "Finite Element Analysis of the Metal Cutting Process: Evaluation of the Effect of Tool Edge Geometry and Coatings on Process Parameters," Report No. HPM/ERC/NSM-02-R-54, The Ohio State University.

- [Kurt, 2005] Kurt, A. and Şeker, U., 2005, "The Effect of Chamfer Angle of Polycrystalline Cubic Boron Nitride Cutting Tool on the Cutting Forces and the Tool Stresses in Finishing Hard Turning of AISI 52100 Steel," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, pp. 632-639.
- [Liu, 2002] Liu, X. L., Wen, D. H., Li, Z. J., Xiao, L. and Yan, F. G., 2002, "Experimental Study on Hard Turning Hardened GCr15 Steel with PCBN tool," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, pp. 217-221.
- [Mamalis, 2001] Mamalis, A. G., Horváth, M., Branis, A. S. and Manolakos, D. E., 2001, "Finite Element Simulation of Chip Formation in Orthogonal Metal Cutting," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 110, pp. 19-27.
- [Movahhedy, 2002] Movahhedy, M. R., Altintas, Y. and Gadala M. S., 2002, "Numerical Analysis of Metal Cutting with Chamfered and Blunt Tools," *American Society of Mechanical Engineering*, Vol. 124, pp. 178-188.
- [Ng, 1999] Ng, E.-G., Aspinwall, D. K., Brazil, D. and Monaghan, J., 1999, "Modelling of temperature and forces when orthogonally machining hardened steel," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 885-903.
- [Özel, 2000a] Özel, T. and Altan, T., 2000, "Determination of Workpiece Flow Stress and Friction at the Chip-Tool Contact for High-Speed Cutting," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 133-152.
- [Özel, 2000b] Özel, T. and Altan, T., 2000, "Process Simulation Using Finite Element Method — Prediction of Cutting Forces, Tool Stresses and Temperatures in High-Speed Flat End Milling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 713-738.
- [Özel, 2003] Özel, T., 2003, "Modeling of Hard Machining: Effect of Insert Edge Preparation in CBN Cutting Tools," *Journal of Materials*

- Processing Technology, Vol. 141, pp. 284-293.
- [Ramesh, 2002] Ramesh, A., 2002, "Prediction of Process-Induced Microstructural Changes and Residual Stresses in Orthogonal Hard Machining," Georgia Institute of Technology. Thesis for Ph. D. in Mechanical Engineering.
- [Ramesh, 2005] Ramesh, A., Melkote S. N., Allard L. F., Riester L. and Watkins T. R., 2005, "Analysis of White Layer Formed in Hard Turning of AISI 52100 Steel," Material Science and Engineering: A, Vol. 390, pp. 88-97.
- [Söhner, 2002] Söhner, J., Yen, Y.-C. and Altan, T., 2002, "Prediction of Tool Wear in Metal Cutting Using the Finite Element Method," Report No. HPM/ERC/NSM-01-R-67, The Ohio State University.
- [Thiele, 1999a] Thiele, J. D. and Melkote, S. N., 1999, "Effect of Cutting Edge Geometry and Workpiece Hardness on Surface Generation in the Finishing Hard Turning of AISI 52100 Steel," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 94, pp. 216-226.
- [Thiele, 1999b] Thiele, J. D. and Melkote, S. N., 1999, "The Effect of Tool Edge Geometry on Workpiece Sub-Surface Deformation and Through-Thickness Residual Stresses for Hard-Turning of AISI 52100 Steel," Society of Manufacturing Engineers. Conference NAMRC XXVII, May 25-28, Berkeley, California.
- [Thiele, 2000] Thiele, J. D. and Melkote, S. N., 2000, "Effect of Cutting-Edge Geometry and Workpiece Hardness on Surface Residual Stresses in Finish Hard-Turning of AISI 52100 Steel," American Society of Mechanical Engineering, Vol. 122, pp. 642-649.
- [Yen, 2004] Yen, Y.-C., Söhner, J., Lilly, B. and Altan, T., 2004, "Estimation of Tool Wear in Orthogonal Cutting using the Finite Element Analysis," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, pp. 82-91.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema que ilustra la relación entre los factores y las variables en el torneado en duro.	9
Figura 2.2 Componentes de las fuerzas en el corte producidas en el torneado convencional [Stephenson, 1997].	10
Figura 2.3 Localización típica de los desgastes de cráter y de flanco de la herramienta [Chandrashekar, 2001].	11
Figura 2.4 Diferentes mecanismos de desgaste de la herramienta [Chandrashekar, 2001].	11
Figura 2.5 Localización de la primera y segunda zonas de corte.	14
Figura 3.1 Condición de corte ortogonal del torneado de un tubo de pared delgada.	16
Figura 3.2 Condición de corte ortogonal del torneado de un disco en una barra sólida.	17
Figura 3.3 Condición del corte convencional de una barra sólida.	17
Figura 3.4 Modelo de deformación en el plano.	18
Figura 3.5 Diagrama de fuerzas en el corte ortogonal en 2D [Chandrashekar, 2001].	19
Figura 3.6 Procedimiento para la predicción del cambio de fase en el torneado en duro [Ramesh, 2002].	20
Figura 3.7 Diagrama TTT (transformación-temperatura-tiempo) para acero AISI 52100.	21
Figura 4.1 Diagrama del programa Ga101.	24
Figura 4.2 Velocidad de corte (m/min), avance (mm/rev) y profundidad de corte (mm).	25
Figura 4.3 Definición de longitud de corte y diámetro en la pieza de trabajo, ambos en mm.	26
Figura 4.4 Posición y malleo iniciales de la pieza de trabajo y de la herramienta en el modelo de elemento finito.	37
Figura 4.5 Radio del filo usado en las herramientas para predicción de fuerzas.	40

Figura 4.6 Radio del filo y desgaste en el flanco (VB) usado en las herramientas para predicción de capa blanca.	40
Figura 4.7 Dimensiones del modelo de elemento finito y la malla inicial utilizada en las simulaciones.	41
Figura 4.8 Condiciones de frontera, de desplazamiento, aplicadas a la pieza de trabajo.	42
Figura 4.9 Condiciones de contacto para las simulaciones de predicción de fuerzas.	43
Figura 4.10 Condiciones de contacto para las simulaciones de predicción de capa blanca.	44
Figura 5.1 Comparación de fuerzas experimentales y predichas, usando material AISI 52100 predefinido y “material definido por el usuario”, usando velocidad de corte de 182.88 m/min y 0.152 mm/rev.	49
Figura 5.2 Comparación de fuerzas experimentales y predichas, usando velocidad de corte de 182.88 m/min y 0.076 mm/rev.	49
Figura 5.3 Comparación de fuerzas experimentales y predichas, usando velocidad de corte de 91.44 m/min y 0.152 mm/rev.	50
Figura 5.4 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando una profundidad de corte de 0.127 mm.	51
Figura 5.5 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando una profundidad de corte de 0.229 mm.	52
Figura 5.6 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando una profundidad de corte de 0.279 mm.	52
Figura 5.7 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando un avance de la herramienta de 0.089 mm/rev.	54
Figura 5.8 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando un avance de la herramienta de 0.114 mm/rev.	54
Figura 5.9 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta afilada, usando un avance de la herramienta de 0.14 mm/rev.	55
Figura 5.10 Comparación de fuerzas de corte, experimentales y predichas, con herramienta afilada usando diferentes radios de nariz (a 119.786 m/min y 0.051 mm/rev).	56

- Figura 5.11 Comparación de fuerzas de corte, experimentales y predichas, con herramienta afilada usando diferentes radios de nariz (a 119.786 m/min y 0.152 mm/rev). 57
- Figura 5.12 Comparación de fuerzas de corte, experimentales y predichas, con herramienta afilada usando diferentes radios de nariz (a 179.832 m/min y 0.051 mm/rev). 57
- Figura 5.13 Comparación de fuerzas de corte, experimentales y predichas, con herramienta afilada usando diferentes avances de la herramienta. 58
- Figura 5.14 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta desgastada, después de 1 minuto de tiempo de corte. 59
- Figura 5.15 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta desgastada, después de 8 minutos de tiempo de corte. 60
- Figura 5.16 Comparación de fuerzas experimentales y predichas con herramienta desgastada, después de 26 minutos de tiempo de corte. 60
- Figura 5.17 Comparación de desgaste de flanco, experimental y predicho, contra tiempo de corte (a 182.88 m/min y 0.152 mm/rev). 62
- Figura 5.18 Comparación de desgaste de flanco, experimental y predicho, contra tiempo de corte (a 91.44 m/min y 0.152 m/rev). 62
- Figura 5.19 Comparación de desgaste de flanco, experimental y predicho, contra tiempo de corte (a 182.88 m/min y 0.076 mm/rev). 63
- Figura 5.20 Comparación de rugosidad a diferentes avances de la herramienta [Dawson, 2001]. 64
- Figura 5.21 Comparación de rugosidad a diferentes avances de la herramienta [Thiele, 1999a]. 64
- Figura 5.22 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales, cortando con herramienta afilada y ángulo en el filo de 0°. 66
- Figura 5.23 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales, cortando con herramienta afilada y ángulo en el filo de -15°. 66
- Figura 5.24 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales, cortando con herramienta afilada y ángulo en el filo de -35°. 67

- Figura 5.25 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales, cortando con herramienta afilada y ángulo en el filo de -55° . 67
- Figura 5.26 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales con una velocidad de corte de 91.44m/min. 68
- Figura 5.27 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales con una velocidad de corte de 121.92m/min. 69
- Figura 5.28 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales a diferentes avances de la herramienta usando una herramienta afilada. 69
- Figura 5.29 Colección de resultados experimentales de esfuerzos residuales a diferentes avances de la herramienta usando una herramienta con ángulo en el filo. 70
- Figura 5.30 Comparación de las fuerzas de corte simuladas, con los valores experimentales y simulados de la literatura. 72
- Figura 5.31 Comparación de las fuerzas de empuje simuladas, con los valores experimentales y simulados de la literatura. 73

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1	Parámetros presentes en el modelo de deformación en el plano.	19
Tabla 4.1	Resumen de referencias utilizadas para la validación del programa Ga101.	30
Tabla 4.2	Composición química del acero AISI 52100 [Ramesh, 2002].	37
Tabla 4.3	Propiedades físicas del acero AISI 52100 usadas en las simulaciones [Ramesh, 2002].	38
Tabla 4.4	Propiedades físicas del CBN de alto grado (insertos KD120) [Ramesh, 2002].	38
Tabla 4.5	Propiedades físicas del CBN de bajo grado (insertos KD081) [Ramesh, 2002].	39
Tabla 4.6	Velocidades de corte y avances utilizados en las predicciones de fuerzas [Ramesh, 2002].	40
Tabla 4.7	Velocidades de corte y avances utilizados en las predicciones de capa blanca [Ramesh, 2002].	41
Tabla 5.1	Coefficientes de desgaste para insertos KD050 de bajo CBN [Huang, 2002].	47
Tabla 5.2	Propiedades del acero 52100 [Ramesh, 2002].	48
Tabla 5.3	Condiciones de corte a las que se reportó existencia de capa blanca [Ramesh, 2005].	71
Tabla 5.4	Condiciones de corte a las que se reportó existencia de capa blanca [Thiele, 2000].	71
Tabla 5.5	Comparación del espesor de la capa blanca predicho, con experimentos y predicciones de la literatura, utilizando la temperatura de transformación de fase como en la literatura [Ramesh, 2002].	74
Tabla 5.6	Comparación del espesor de la capa blanca simulado, con experimentos y simulaciones de la literatura, utilizando la temperatura de transformación de fase recalibrada.	75

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 2.1 Cálculo de la fuerza de empuje (F_T), correspondiente a la condición analizada en 2D.	19
Ecuación 2.2 Relación empírica para el cálculo de la rugosidad.	130
Ecuación 4.1 Modelo de desgaste de flanco donde se representan tres mecanismos de desgaste (abrasión, adhesión y difusión).	24
Ecuación 4.2 Conductividad térmica (K) en función de la temperatura.	45

GLOSARIO

Acero: aleación de hierro que contiene entre 0.02 y 2.11% de carbono en peso. Frecuentemente se incluyen otros elementos aleantes como: manganeso, cromo, níquel y molibdeno, pero el contenido de carbono es el que convierte al hierro en acero.

Acero AISI 52100: acero aleado al medio cromo que contiene básicamente $0.98 - 1.10\%$ de carbono, $0.25 - 0.45\%$ de Manganeso y $1.30 - 1.60\%$ de cromo.

AISI: del inglés American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y el Acero) es un instituto que desarrolló un sistema numérico para clasificar aceros al carbono y aleados de acuerdo a su composición química.

Capa Blanca: es una banda delgada de material que aparece en la superficie maquinada, resultado de una alteración microestructural. Se le llama “blanca” debido a que aparece de este color bajo el microscopio óptico después de haber sido preparada y atacada para revelar la microestructura.

CBN: Del inglés Cubic Boron Nitride (Nitruro de Boro Cúbico) es un material de las herramientas de corte utilizadas en las simulaciones fue nitruro de boro cúbico (CBN) disuelto en una base metálica. El CBN es el segundo material más duro después del diamante; estos dos materiales tienen la misma estructura y casi las mismas propiedades como la conductividad térmica, además cuenta con una excelente resistencia al desgaste y es inerte químicamente.

Corte Ortogonal: modelo simplificado del maquinado que describe la mecánica del proceso de arranque de viruta de una manera confiable y precisa. Aunque el proceso de corte es tridimensional, el modelo de corte ortogonal es bidimensional, evitando así muchas complejidades geométricas del corte.

Esfuerzos Residuales: son esfuerzos que están presentes en un cuerpo aún y cuando no tiene ninguna fuerza externa aplicada. Son producidos por un flujo plástico no homogéneo causado por factores externos como efectos estructurales, aleación, cambios de fase, efectos térmicos, causando así expansiones diferenciales entre diferentes elementos constituyentes del mismo material. Debido a su naturaleza y a como pueden ser creados, los esfuerzos residuales pueden ser a tensión o a compresión, a diferentes profundidades desde la superficie maquinada.

FEM: del inglés Finite Element Method (Método de Elemento Finito) es un método de análisis en el que una región compleja definida como continuo se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las propiedades del material y las relaciones gobernantes, son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los bordes del elemento. Un proceso de ensamble, cuando se consideran debidamente las cargas y restricciones, da lugar a un conjunto de ecuaciones. La solución de esas ecuaciones nos da el comportamiento aproximado del continuo.

Propiedades Mecánicas: Propiedades de un material que revelan su comportamiento elástico e inelástico cuando se aplica fuerza; por ejemplo la densidad, la conductividad térmica, el calor específico, etc.

Temperatura de Austenización: Temperatura en la cual la microestructura inicial del metal se transforma a la fase austenita.

Torneado en Duro: proceso de corte con filo de piezas de trabajo con valores de dureza superiores a 45 HRC (escala Rockwell “C”), sin ser previamente esmeriladas.

AUTOBIOGRAFÍA

Pablo Ernesto Tapia González

Candidato para el grado de
Maestro en Ciencias de la Ingeniería de Manufactura
con especialidad en Diseño de Productos.

Tesis de Licenciatura: Relación entre la Calidad del Acabado y la Vibración Mecánica generada al Fresar piezas de Aluminio.

Tesis de Maestría: Validación de Programa Analítico y Modelo de FEM para la Predicción de Variables en el Torneado en Duro.

Campo de Estudio: Ciencias Exactas.

Biografía:

Datos Personales: Nacido en Guadalajara, Jalisco, el 29 de Junio de 1981, hijo del Profesor Manuel Tapia López y de la Señora Juana Lucrecia González Preciado, es el mayor de 4 hermanos, Norma Elizabeth, Lilia Maribel y Emmanuel, consecutivamente.

Educación: Egresado de la FIME UANL, obteniendo el Grado de Ingeniero Mecánico Electricista en 2003.

Experiencia Profesional: Catedrático de la FIME UANL de Agosto 2003 a Agosto 2004.