UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"ANÁLISIS DE LA EFECTIVIDAD DE MODELOS MATEMÁTICOS EN LA PREDICCIÓN DE VARIABLES TERMOMECÁNICAS EN CORTE ORTOGONAL EN MATERIALES METÁLICOS."

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniero en Mecatrónica

Línea de investigación: Producción Industrial y tecnología sostenible.

AUTOR:

Mayki Francisco Cotacachi Santacruz

DIRECTOR:

PhD. Fernando Renato Ramírez Paredes

Ibarra – Ecuador 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Cotacachi Santacruz Mayki Francisco

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis de la efectividad de modelos matemáticos en la predicción de variables termomecánicas en corte ortogonal en materiales metálicos.
AUTOR (ES):	Cotacachi Santacruz Mayki Francisco
FECHA: DD/MM/AAAA	26/08/2026
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
DIRECTOR /ASESOR:	PhD. Fernando Ramírez / MSc. Víctor Erazo

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 26 días del mes de agosto de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
MAYKI FRANCISCO
COTACACHI SANTACRUZ

Nombre: Cotacachi Santacruz Mayki Francisco

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 26 de agosto de 2026

PhD. Fernando Renato Ramírez Paredes

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FERNANDO RENATO RAMIREZ PAREDES

(f)……

PhD. Fernando Renato Ramírez Paredes
C.C.: 1709992703

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular "ANÁLISIS DE LA EFECTIVIDAD DE MODELOS MATEMÁTICOS EN LA PREDICCIÓN DE VARIABLES TERMOMECÁNICAS EN CORTE ORTOGONAL EN MATERIALES METÁLICOS" elaborado por MAYKI FRANCISCO COTACACHI SANTACRUZ, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FERNANDO RENATO RAMIREZ PAREDES

(f)……

PhD. Fernando Renato Ramírez Paredes
C.C.: 1709992703

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
VICTOR ALFONSO ERAZO ARTEAGA

(f)……

MSc. Víctor Alfonso Arteaga Erazo
C.C.: 1719188029

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mi mamá, que siempre me apoyó desde el comienzo hasta el final, deseándome lo mejor del mundo, siendo un apoyo muy importante en esta etapa de la vida, además de hacerme llegar a entender *"Donde Papá faltó, Mamá estuvo de sobre"* por esto y muchas cosas más este logro le pertenece también.

A mi Tía María y familia, por su cariño, apoyo y por acompañarme durante este proceso y motivándome a seguir adelante para alcanzar esta meta. Y sin olvidar a Dios, por brindarme fortaleza, sabiduría y perseverancia para superar cada desafío, además de ayudarme de haber culminado esta linda etapa de la universidad.

A mis Tíos Luis, Jaime y familia por ser un ejemplo de esfuerzo, responsabilidad, perseverancia, además por apoyarme en mi formación académica y por motivarme siempre a seguir adelante. A mi madrinas Dolores, Blanca y familia , por estar siempre presente, guiándome con valores, ética, principios y a caminar con rectitud para afrontar la vida con responsabilidad y carácter, siendo junto a mi madre unos pilares fundamentales en mi formación profesional.

Mayki Cotacachi

AGRADECIMIENTO

A mi familia, por su apoyo constante, su paciencia y su confianza incondicional. Su acompañamiento fue fundamental para no rendirme y para mantenerme firme en cada desafío enfrentado a lo largo de este trayecto.

Agradezco a mis tutores de este trabajo, PhD. Fernando Ramírez y MSc. Víctor Erazo por los consejos, los conocimientos y los pilares fundamentales para llevar a cabo un proyecto exitoso. Agradezco toda la orientación tan profesional y amigable que me brindaron en cada etapa.

De la misma manera una inmensa gratitud a cada uno de los docentes por compartir sus conocimientos y aportar a mi crecimiento como ingeniero. Agradezco a mis amigos(as) por todos los momentos inolvidables y apoyo moral en toda mi etapa académica, profesional y por todo esto muchas gracias.

Mayki Cotacachi

ÍNDICE DE CONTENIDOS

0.1 IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA II
0.2 CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE INTEGRACIÓN CURRICULAR . . III
0.3 APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR IV
DEDICATORIA V
AGRADECIMIENTO VI
ÍNDICE DE FIGURAS XV
ÍNDICE DE TABLAS XVII
CAPÍTULO I
1.1 Planteamiento del Problema 1
1.2 Objetivos 2
1.2.1 General 2
1.2.2 Específicos 2
1.3 Alcance y delimitación 3
1.4 Justificación 4
CAPÍTULO II
2.1 Antecedentes 5
2.1.1 Evolución Histórica del Estudio de Corte 5
2.1.2 Avances Recientes en el Estudio de Corte 6
2.2 Bases Teóricas 6

2.2.1 Introducción al mecanizado 6
2.2.2 Mecanizado sin Arranque de Viruta 7
2.2.3 Mecanizado por Arranque de Viruta 7
2.2.4 Torneado 7
2.2.5 Parámetros de Corte del Torneado 8
2.2.5.1 Velocidad de corte 8
2.2.5.2 Avance 9
2.2.5.3 Profundidad de Corte 9
2.2.6 Tipos de viruta 10
2.2.7 Tipos de corte del torneado 10
2.2.7.1 Corte Ortogonal 10
2.2.7.2 Corte Oblicuo 11
2.2.8 Fuerzas en el proceso de Corte 11
2.2.8.1 Fuerza de Resultante R 12
2.2.9 Zonas de deformación plástica 12
2.2.9.1 Zona primaria 12
2.2.9.2 Zona secundaria 13
2.2.9.3 Zona terciaria 14
2.2.10 Propiedades del Acero AISI-SAE 1018 14
2.2.11 Variables Mecánicas 14
2.2.12 Variables Térmicas 15
2.3 Modelos predictivos en el Corte Ortogonal 16

2.3.1 Modelos Analíticos 16
2.3.1.1 Modelo de Merchant 17
2.3.1.2 Círculo de Merchant 17
2.3.1.3 Modelo de Lee y Shaffer 18
2.3.1.4 Modelo de Oxley 18
2.3.2 Modelos Empíricos 18
2.3.3 Modelos Numéricos 19
2.3.4 Formulación Lagrangiana 19
2.3.5 Formulación Euleriana 20
2.3.6 Formulación ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 20
2.3.7 Modelo de Johnson-Cook 20
2.3.8 Modelo de Zerilli-Armstrong 21
2.4 Análisis comparativa 21
CAPÍTULO III
3.1 Enfoque y tipos de investigación 23

3.2 Diseño de la Investigación 24
3.2.1 Revisión bibliográfica 25
3.2.2 Clasificación de Modelos Predictivos 25
3.2.3 Análisis de las principales variables que afectan el proceso de mecanizado . . . 26
3.2.4 Comparación con datos reales 26
3.2.5 Cálculo de errores 26
3.2.6 Propuesta y validación del modelo combinado 27
CAPÍTULO IV
4.0.1 Variables de entrada o independientes 29
4.0.2 Variables experimentales de validación o dependientes 30
4.1 Datos de la literatura 30
4.2 Modelos usados para el ángulo de cizalladura 33
4.2.1 Merchant 1945 34
4.2.2 Lee Shaffer 1949 34
4.2.3 Oxeley et al 1961 35
4.2.4 Lee et al 2003 35
4.2.5 Shaw and Cookson 2005 35
4.2.6 Wang 2020 36
4.2.7 Número Térmico de Boothroyd 36
4.3 Resultados del ángulo de cizalla φ 37
4.3.1 Análisis comparativo de pendientes ángulo de cizalla 42
4.4 Error porcentual y promedio 50

4.4.1 Porcentaje de error Acero NE 9445 50
4.4.1.1 Análisis Acero NE 9445. 52
4.4.2 Porcentaje de error Acero SAE 4130 53
4.4.2.1 Análisis Acero Acero SAE 4130 54
4.4.3 Porcentaje de error AISI 1045. 55
4.4.3.1 Análisis Acero AISI 1045 55
4.4.4 Porcentaje de error AL 6082-T6 56
4.4.4.1 Análisis AL 6082-T6 56
4.5 Cálculo de fuerzas en el proceso de corte 57
4.5.1 Obtención de Fc y Ft. 57
4.5.2 Análisis de Fuerzas 57
4.5.3 Johnson Cook + Oxley 58
4.6 Basado en el trabajo 59
4.7 Resultados de fuerzas de corte Fc y empuje Ft 59
4.7.1 Análisis comparativo de pendientes de fuerzas. 66
4.8 Cálculo del error 74

4.8.1 Porcentaje de error Acero NE 9445 74
4.8.1.1 Análisis Acero NE 9445 Fc y Ft 75
4.8.2 Porcentaje de error Acero SAE 4130 77
4.8.2.1 Análisis Acero SAE 4130 Fc y Ft 78
4.8.3 Porcentaje de error AISI 1045. 80
4.8.3.1 Análisis AISI 1045 Fc y Ft. 81
4.8.4 Porcentaje de error AL 6082-T6 83
4.8.4.1 Análisis AL 6082-T6 Fc y Ft 84
4.9 Obtención de esfuerzos 85
4.10 Modelo independiente 85
4.10.1 Modelo Constitutivo de Johnson Cook 86
4.11 Cálculos de los esfuerzos 87
4.12 Análisis comparativo de pendientes (Esfuerzos) 92
4.13 Cálculo del error de los esfuerzos 98
4.13.1 Porcentaje de error Acero NE 9445 98
4.13.1.1 Análisis esfuerzo cortante Acero NE 9445 99
4.13.2 Porcentaje de error SAE 4130. 99
4.13.2.1 Análisis esfuerzo cortante Acero SAE 4130 101
4.13.3 Porcentaje de error AISI 1045. 101
4.13.3.1 Análisis esfuerzo cortante AISI 1045. 102
4.13.4 Porcentaje de error Al 6082-T6. 103
4.13.4.1 Análisis esfuerzo cortante Al 6082-T6. 103
4.14 Cálculo de desgaste 104

4.14.1 Taylor (Vida Útil) 105
4.14.2 Modelo empírico de desgaste 105
4.14.3 Desgaste por P. Mathew 106
4.15 Cálculo de desgaste por método empírico 107
4.15.1 Análisis comparativa de pendientes (desgaste) 108
4.15.2 Cálculo del error 109
4.15.2.1 Análisis AISI 1018, filo Nro 1 inserto 4215 110
4.16 Selección de modelos óptimos 111
4.16.1 Propuesta del modelo combinado 112
4.16.1.1 Parámetros de usados para el mecanizado 113
4.16.1.2 Validación de modelo combinado 115
4.16.1.3 Análisis de pendiente 116
4.16.1.4 Análisis Modelo 2 (Empírico) desgaste en flanco 117
4.16.1.5 Validación del modelo mediante las constantes originales reportadas en la literatura 118
4.16.1.6 Análisis de caso (constantes propias de autores) 119
CONCLUSIONES 120
4.17 Sobre las Fuerzas en el mecanizado 120
4.18 Sobre el Esfuerzo Cortante en el mecanizado 121
4.19 Sobre el modelo combinado 122
4.19.1 Sobre el ángulo de cizalladura en el mecanizado 122
4.19.2 Sobre el Desgaste en flanco en el mecanizado 123
RECOMENDACIONES 125
BIBLIOGRAFÍA 126

ANEXOS 134
4.20 Anexo A. Tablas completas de referencia 134
4.21 Anexo B. Hojas de cálculo en Microsoft Excel 136
4.22 Anexo B. Datos experimentales del desgaste en flanco 139
4.23 Anexo C . Cálculos realizados (calibración) en MATLAB 142
4.24 Anexo D. Especificaciones técnicas 142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Proceso de Torneado, extraído [8] 8
Figura 2.2 Fractura BUE, extraído [24] 9
Figura 2.3 Tipos de viruta en el mecanizado: Discontinua (izquierda), Continua (derecha), extraído [25] 10
Figura 2.4 Corte ortogonal, extraído [27] 11
Figura 2.5 Representación de fuerzas, extraído [30]. 12
Figura 2.6 Zona primaria, extraído [25] 13
Figura 2.7 Zona secundaria, extraído [8] 13
Figura 2.8 Zona terciaria 14
Figura 2.9 Fuerzas actuantes y ángulos de corte, extraído [8] 15
Figura 2.10 Distribución de calor, extraído [23] 16
Figura 2.11 Círculo de Merchant en Corte Ortogonal, extraído [23] 17

Figura 4.1 Comparación entre el ángulo de cizalladura obtenido experimentalmente y los valores por los diferentes modelos matemáticos para el acero NE 9445, mostrando el comportamiento de cada modelo bajo las distintas condiciones de corte 38
Figura 4.2 Comparación entre el ángulo de cizalladura experimental y las predicciones obtenidas mediante los diferentes modelos matemáticos para el acero SAE 4130 40
Figura 4.3 Comparativa de modelos predictivos respecto al ángulo de cizalla AISI 1045 41
Figura 4.4 Comparativa de modelos predictivos respecto al ángulo de cizalla Al 6082-T6 42
Figura 4.5 Comparativa de Merchant vs Experimental 43
Figura 4.6 Comparativa de modelos predictivos respecto al ángulo de cizalla 44
Figura 4.7 Comparativa de modelos predictivos respecto al ángulo de cizalla 44
Figura 4.8 Comparativa de Merchant vs Experimental 45
Figura 4.9 Comparativa de Lee and Shaffer, Oxley et al vs Experimental 46
Figura 4.10 Comparativa de Lee et al, Shaw and Cookson, Wang et al. vs Experimental 46
Figura 4.11 Comparativa de Merchant, Lee and Shaffer vs Experimental 47
Figura 4.12 Comparativa de Merchant, Lee and Shaffer vs Experimental 48
Figura 4.13 Comparativa de Merchant, Lee and Shaffer vs Experimental 49
Figura 4.14 Comparativa de Merchant, Lee and Shaffer vs Experimental 49
Figura 4.15 Comparación del error porcentual obtenido por los diferentes modelos matemáticos en la estimación del ángulo de cizalladura para el acero NE 9445, permitiendo identificar el nivel de precisión de cada modelo respecto a los valores experimentales. 52

Figura 4.16 Error porcentual de los modelos matemáticos empleados para estimar el ángulo de cizalladura del acero SAE 4130, mostrando la diferencia entre las predicciones 54
Figura 4.17 Comparación del error porcentual asociado a cada modelo predictivo para el acero AISI 1045. 55
Figura 4.18 Error porcentual de los diferentes modelos matemáticos en la predicción del ángulo de cizalladura para el aluminio 6082-T6, permitiendo comparar la precisión alcanzada por cada uno de ellos. 56
Figura 4.19 Comparativa de Modelo 1, Modelo 3 y Modelo 3 vs Experimental . . . 61
Figura 4.20 Comparativa de Modelo 1, Modelo 3 y Modelo 3 vs Experimental . . . 61
Figura 4.21 Comparativa de Merchant, Oxley, Bsada en trabajo vs Experimenta . . . 63
Figura 4.22 Comparativa de Merchant, Oxley, Basada en trabajo vs Experimental . . 63
Figura 4.23 Comparativa de Merchant, Oxley, Shaw vs Experimental 64
Figura 4.24 Comparativa de Merchant, Oxeley, Shaw vs Experimental 65
Figura 4.25 Comparativa de Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental 66
Figura 4.26 Comparativa de Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental 66
Figura 4.27 Comparativa de modelos en fuerzas de corte vs Experimental 68
Figura 4.28 Comparativa de modelos en fuerzas de empuje vs Experimental 68
Figura 4.29 Comp. Fc Merchant, Oxley y basada en trabajo vs Experimental 70
Figura 4.30 Comp. Ft Merchant, Oxley y basada en trabajo vs Experimental 70
Figura 4.31 Comparativa Fc de pendientes Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental . . 71
Figura 4.32 Comparativa Ft de pendientes Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental . . 72
Figura 4.33 Comparativa Fc de pendientes Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental . . 73
Figura 4.34 Comparativa Ft de pendientes Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental . . 73
Figura 4.35 Comparativa de porcentajes Fc 76
Figura 4.36 Comparativa de porcentajes Ft 76
Figura 4.37 Error porcentual de los modelos predictivos de la fuerza de corte (Fc) para el acero SAE 4130, permitiendo comparar la precisión alcanzada por cada modelo 79
Figura 4.38 Error porcentual de los modelos predictivos de la fuerza de corte (Ft) para el acero SAE 4130, permitiendo comparar la precisión alcanzada por cada modelo 79
Figura 4.39 Comparación del error porcentual asociado a las predicciones de la fuerza de corte (Fc) realizadas por los diferentes modelos matemáticos para el acero AISI 1045. 81
Figura 4.40 Comparación del error porcentual asociado a las predicciones de la fuerza de corte (Ft) realizadas por los diferentes modelos matemáticos para el acero AISI 1045. 82
Figura 4.41 Error porcentual de los modelos matemáticos empleados para la fuerza de corte (Fc) del aluminio 6082-T6, mostrando la diferencia entre los valores calculados y los datos experimentales. 84
Figura 4.42 Error porcentual de los modelos matemáticos empleados para la fuerza de corte (Ft) del aluminio 6082-T6, mostrando la diferencia entre los valores calculados 85
Figura 4.43 Comparativa Merchant y Johnson Cook vs Experimental 88
Figura 4.44 Comparativa Merchant y Johnson Cook vs Experimental 90
Figura 4.45 Comparativa Merchant y Johnson Cook vs Experimental 91
Figura 4.46 Comparativa Merchant y Johnson Cook vs Experimental 92

Figura 4.47 Comparativa de pendientes Merchant y Johnson Cook vs Experimental 94
Figura 4.48 Comparativa de pendientes Merchant y Johnson Cook vs Experimental 95
Figura 4.49 Comparativa de pendientes Merchant y Johnson Cook vs Experimental 96
Figura 4.50 Comparativa de pendientes Merchant y Johnson Cook vs Experimental 97
Figura 4.51 Comparación del error porcentual obtenido por los diferentes modelos matemáticos en la estimación del esfuerzo cortante para el acero NE 9445- Esfuerzo cortante 99
Figura 4.52 Error porcentual de los modelos predictivos en la estimación del esfuerzo cortante para el acero SAE 4130, permitiendo comparar los valores alcanzados por cada modelo respecto a los datos experimentales- Esfuerzo cortante 101
Figura 4.53 Comparación del error porcentual asociado a las predicciones del esfuerzo cortante realizadas por los diferentes modelos matemáticos para el acero AISI 1045- Esfuerzo cortante 102
Figura 4.54 Error porcentual de los modelos matemáticos empleados para estimar el esfuerzo cortante del aluminio 6082-T6, mostrando la diferencia entre los valores calculados- Esfuerzo cortante 104
Figura 4.55 Desgaste en Flanco V_B y Cráter K_T, extraído [16] 104
Figura 4.56 Desgaste en Flanco V_B de Modelo A y Modelo B vs Experimental . . . 108
Figura 4.57 Desgaste en Flanco V_B de Modelo A y Modelo B vs Experimental . . . 109
Figura 4.58 Error porcentual obtenido por los modelos predictivos, mostrando diferencia entre los valores calculados y los resultados experimentales- Desgaste en flanco V_B 110
Figura 4.59 Desgaste en flanco V_B, Ensayos 1 y 8 [Fuente: propia] 114
Figura 4.60 Comparativa de Desgaste en flanco V_B Modelo A vs Experimental . . . 115
Figura 4.61 Comparativa de Desgaste en flanco V_B Modelo A vs Experimental . . . 116
Figura 4.62 Comparación del error porcentual en predicciones del modelo combinado, en cada una de las condiciones de corte analizadas. Desgaste en flanco V_B Modelo A 117
Figura 4.63 Comparativa del comportamiento Desgaste en flanco V_B Modelo Autores 119
Figura 4.64 Cálculo del ángulo de cizalla con sus porcentajes [Fuente: propia] . . . 136
Figura 4.65 Cálculo de fuerzas con sus porcentajes [Fuente: propia] 137
Figura 4.66 Cálculo del Esfuerzo cortante con sus porcentajes [Fuente: propia] . . . 138
Figura 4.67 Cálculo del Desgaste con sus porcentajes [Fuente: propia] 138
Figura 4.68 Ensayo 1 V_B 156μm 139
Figura 4.69 Ensayo 2 V_B 231μm 139
Figura 4.70 Ensayo 3 V_B 172μm 139
Figura 4.71 Ensayo 4 V_B 256μm 140
Figura 4.72 Ensayo 5 V_B 262μm 140
Figura 4.73 Ensayo 6 V_B 256μm 140
Figura 4.74 Ensayo 7 V_B 272μm 141
Figura 4.75 Ensayo 8 V_B 226μm 141
Figura 4.76 Ensayo 9 V_B 447μm 141
Figura 4.77 Cálculos realizados en MATLAB R2025b [Fuente: propia] 142
Figura 4.78 Especificaciones AISI 1018 [63] 142
Figura 4.79 Especificaciones Inserto GTN-3 [64] 143
Figura 4.80 Portaherramientas para ranurado [65] 143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición y temperaturas de trabajo acero AISI-1020 [52] 14
Tabla 2.2 Relación de la distribución de calor 16
Tabla 2.3 Comparación de modelos de corte y sus variables 22

Tabla 4.1 Resultados experimentales de mecanizado - Acero NE 9445 (HB=187): Teoría de corte de metales [25] 31
Tabla 4.2 Datos experimentales- Acero SAE 4130: Teoría de corte de metales [25] . 32
Tabla 4.3 Datos experimentales- AISI 1045: A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining [44] 32
Tabla 4.4 Datos experimentales -Al 6082-T6: A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining [44] 33
Tabla 4.5 Datos Experimentales - AISI 1018: Utilización del Criterio de desgaste de Flanco y la Ecuación de Taylor para simular el tiempo de vida de una herramienta de corte mediante el proceso de torneado en CNC para un material AISI 1018 [45] 33
Tabla 4.6 Propiedades térmicas y físicas de los materiales [48], [49], [50], [51], [52]. 37
Tabla 4.7 Resultados del ángulo de corte (φ) incluyendo Boothroyd 38
Tabla 4.8 Resultados de (φ) según diversos modelos teóricos 39
Tabla 4.9 Datos transcritos de ángulos de cizallamiento por modelos 40
Tabla 4.10 Datos transcritos del ángulo de cizallamiento por modelos 41
Tabla 4.11 Cálculo de pendientes de modelos predictivos φ 43
Tabla 4.12 Cálculo de pendientes de modelos predictivos 45
Tabla 4.13 Cálculo de pendientes de modelos predictivos 47
Tabla 4.14 Cálculo de pendientes de modelos predictivos 48
Tabla 4.15 Porcentaje de error por modelo, respecto al valor del ángulo experimental- Acero NE 9445 (Figura 4.1) 51
Tabla 4.16 Porcentaje de error por modelo, respecto al valor del ángulo experimental - Acero SAE 4130 (Figura 4.2) 53
Tabla 4.17 Porcentaje de error por modelo para el segundo conjunto de datos AISI 1045 (Figura 4.3) 55
Tabla 4.18 Porcentaje de error por modelo para el tercer conjunto de datos- AL 6082-T6 (Figura 4.4) 56
Tabla 4.19 Comparativa de fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) según diferentes modelos teóricos y experimentales 60
Tabla 4.20 Comparativa de fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) para el segundo conjunto de datos de fuerzas 62
Tabla 4.21 Comparativa de fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) según los modelos predictivos. 64

Tabla 4.22 Comparativa de fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) 65
Tabla 4.23 Comparativa de derivadas calculadas para las fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) respecto a los valores experimentales 67
Tabla 4.24 Comparativa de derivadas calculadas asociadas a las fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) 69
Tabla 4.25 Comparativa de derivadas numéricas de fuerzas según los modelos combinados 71
Tabla 4.26 Comparativa de derivadas numéricas de fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) según los modelos combinados restantes 72
Tabla 4.27 Comparativa de la Fuerza de Corte (F_c) calculada y sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental 74
Tabla 4.28 Comparativa de la Fuerza de Avance (F_t) calculada y sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental 75
Tabla 4.29 Comparativa de la Fuerza de Corte (F_c) calculada y sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental 77
Tabla 4.30 Comparativa de la Fuerza de Avance (F_t) calculada y sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental 78
Tabla 4.31 Comparativa de la Fuerza de Corte (F_c) calculada por los modelos predictivos, junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental 80
Tabla 4.32 Comparativa de la Fuerza de Avance (F_t) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental 81
Tabla 4.33 Comparativa de la Fuerza de Corte (F_c) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental 83
Tabla 4.34 Comparativa de la Fuerza de Avance (F_t) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental 84
Tabla 4.35 Comparativa del esfuerzo cortante (τ_s), obtenidos mediante el modelos predictivos incluyendo en Número de Boothroyd 87
Tabla 4.36 Comparativa de los esfuerzos cortantes y normales obtenidos mediante los modelos de Merchant y Johnson-Cook 89
Tabla 4.37 Comparativa de los esfuerzos cortantes (τ_s), mediante los modelos de Merchant y Johnson-Cook 90
Tabla 4.38 Comparativa final de los esfuerzos cortantes (τ_s) obtenidos por los modelos de Merchant y Johnson-Cook 91
Tabla 4.39 Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con el valor experimental 93
Tabla 4.40 Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con el valor experimental 95
Tabla 4.41 Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con el valor experimental 96
Tabla 4.42 Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con el valor experimental 97
Tabla 4.43 Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental 98
Tabla 4.44 Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental 100
Tabla 4.45 Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental 102

Tabla 4.46 Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental . . . 103
Tabla 4.47 Calibración de las constantes . . . 107
Tabla 4.48 Comparativa del desgaste V_B mediante modelos predictivos (Modelo A y B) . . . 108
Tabla 4.49 Comparativa del desgaste V_B frente al valor experimental . . . 109
Tabla 4.50 Comparativa del desgaste V_B junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental. . . . 110
Tabla 4.51 Comparativa de modelos en función del cálculo del error obtenido por cada variable evaluada . . . 111
Tabla 4.52 Calibración de las constantes . . . 113
Tabla 4.53 Parámetros de entrada para el mecanizado en Acero AISI 1018, inserto GTN3 . . . 114
Tabla 4.54 Resultados obtenidos . . . 115
Tabla 4.55 Resultados obtenidos de pendientes . . . 116
Tabla 4.56 Resultados obtenidos . . . 118
Tabla 4.57 Resultados experimentales de mecanizado - Acero NE 9445 (HB=187): Teoría de corte de metales [25] . . . 134
Tabla 4.58 Datos experimentales- Acero SAE 4130: Teoría de corte de metales [25] . 135
Tabla 4.59 Datos experimentales: A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining - AISI 1045 [44] . . . 135
Tabla 4.60 Datos experimentales: A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining - Al 6082-T6 [44] . . . 136

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

Desde el inicio de la industrialización de productos obtenidos mediante el arranque de viruta, uno de los problemas ha sido mejorar su proceso enfocado en el estudio de la predicción de temperaturas, fuerzas de corte y demás variables que influyen en la eficiencia del proceso [1].

En la industria del mecanizado, el uso indebido o la falta de un control adecuado de los parámetros de corte, puede generar problemas como un desgaste prematuro en los insertos o temperaturas de corte demasiado elevadas, afectando la calidad del producto y aumentando los costos de producción [2]. El mecanizado de materiales metálicos como el acero, implica complejas interacciones termomecánicas que dificultan el control del proceso. Esto se ve incrementado de manera significativa cuando existen condiciones de alta velocidad de corte o mecanizado de materiales difíciles tales como aceros o aleaciones especiales [3].

La falta de comprensión sobre las interacciones que poseen estas variables entre sí, dificulta el control y la optimización del proceso. Por ello, el desafío principal radica en la predicción de los parámetros que conforman al mecanizado, debido a que de esto depende la planificación del proceso.

Diversos estudios demuestran que el uso de modelos predictivos de forma analítica, empírica o numérica permiten controlar el proceso de manera eficiente [4].

No obstante, a pesar de los avances obtenidos existen diversas limitaciones en cuanto a la precisión y aplicación de estos modelos cuando son sometidos a condiciones reales de corte,

debido a que algunas variables como *Fricción o Generación de Calor* y el desgaste del material en cuanto a *Pérdida de Material* son difíciles de definir con exactitud [5].

Dado lo anterior, se hace necesario un análisis integral que permita estudiar las variables termomecánicas enfocado a modelos predictivos que expliquen su comportamiento. Así la problemática del presente trabajo se basa en la pregunta:

Pregunta de Investigación ¿De qué parámetros depende la efectividad de un modelo predictivo en el cálculo de variables termomecánicas para corte ortogonal en materiales metálicos?

Para responder la pregunta de investigación se debe realizar un análisis exhaustivo de los modelos matemáticos propuestos a lo largo del desarrollo de la ciencia de corte de metales, para así poder generar estrategias para una mejor selección de parámetros de corte, reducir costos, y maximizar la eficiencia y durabilidad del proceso de mecanizado en la industria manufacturera.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Analizar la efectividad de modelos predictivos en el cálculo de variables termomecánicas en el proceso de corte ortogonal en materiales metálicos.

1.2.2 Específicos

- Identificar los modelos predictivos existentes utilizados en el cálculo de variables termomecánicas durante el proceso de corte ortogonal en materiales metálicos.
- Evaluar la capacidad de estimación de modelos matemáticos en la predicción de variables termomecánicas para el proceso de corte ortogonal.

- Validar una combinación de modelos predictivos que permita una correcta estimación de variables termomecánicas en el proceso de corte de materiales metálicos.

1.3 Alcance y delimitación

El presente trabajo de integración curricular se enfoca en el análisis comparativo e integrador de la eficiencia de los modelos predictivos que se aplican en el mecanizado de materiales metálicos. Para así abordar una evaluación en cuanto a la exactitud de los modelos y así poder estimar el comportamiento de las variables termomecánicas bajo corte ortogonal.

Es importante saber que modelos de predicción existentes actuales, presentan limitaciones significativas en cuanto a precisión y aplicabilidad, por ello se desarrolla un estudio de investigación para identificar estas limitaciones en los modelos, analizando los principales parámetros que influyen en la precisión y aplicabilidad de cada modelo. Con esto se pretende detectar las variables que inciden significativamente en la efectividad, para así poder establecer un criterio de selección para diversos entornos de operación [6].

Se evalúa la combinación de modelos óptimos para la planificación y control de procesos de mecanizado bajo condiciones de corte ortogonal. Este análisis se sustenta en datos experimentales previamente realizados y validados que se dispone en la literatura científica o bases de datos fiables.

La flexibilidad metodológica asegura la factibilidad del estudio al centrarse en el análisis y evaluación de modelos predictivos, además esta investigación contribuye al entendimiento para así anticipar el comportamiento termomecánico en el proceso de corte ortogonal.

Considerando la influencia que tienen estas variables (*Mecánicas y Térmicas*) en procesos como *Desgaste o calidad superficial*, el estudio permite evaluar y aplicar estos modelos en la predicción de tales parámetros, para así poder optimizar la productividad, precisión y eficiencia del mecanizado en la industria manufacturera [7].

1.4 Justificación

La estimación exacta de estas variables en materiales metálicos son necesarias para optimizar el proceso de mecanizado, para así mejorar la producción y reducir costos. Estudios recientes indican que los modelos predictivos son herramientas útiles para controlar y ajustar de manera anticipada los parámetros operativos en el proceso de corte [8].

Cabe mencionar que la simulación mediante elementos finitos se usa como una herramienta de apoyo para el análisis y predecir diversas variables del mecanizado como la temperatura de corte, fuerzas generadas y tensiones en la zona de contacto. Este tipo de simulaciones permiten contribuir a escenarios de estudio, reduciendo la experimentación, lo que es funcional en entornos industriales [9].

Además, investigaciones recientes han hecho la integración de técnicas con inteligencia artificial, para mejorar la precisión de los modelos predictivos [10] . Estos nuevos estudios combinan la capacidad de aprendizaje, ofreciendo modelos más robustos y adaptables a diversas condiciones de corte.

Esta investigación se justifica en la necesidad de evaluar y hacer un análisis sistemático de los modelos matemáticos existentes, para determinar su efectividad en cuanto a la precisión que poseen y así gestionar de forma óptima las variables que intervienen en el corte ortogonal, cuando se someten a condiciones reales de la industria.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Evolución Histórica del Estudio de Corte

Para mediados del siglo XIX, con el avance en cuanto al mecanizado hubo un incremento en la producción de acero y los derivados de esta. Sin embargo surgió un problema relacionado con la herramienta de corte, ya que un uso inadecuado la hacia inútil a procesos de mecanizado incluso siendo un mejor acero, por estos motivos surge la Teoría del Corte [11].

En este contexto surge Frederick W. Taylor, personaje que desarrolla diversas investigaciones sobre la relación que existe entre la Velocidad de Corte (V) y la herramienta de corte, estableciendo la Ecuación de Taylor a finales del siglo XIX [12]. Logrando predecir y optimizar las condiciones de corte, sentando las bases y siendo precursor a futuros modelos complejos. En consecuencia, apareció Merchant, 1940 estableciendo uno de los primeros modelos analíticos en corte ortogonal, planteando relaciones entre los Ángulos de Corte, Fuerzas aplicadas, Fricción entre la Viruta, Herramienta y Energía Consumida [13].

Otro modelo que apareció fue es de Lee y Shaffer, donde introdujo una formulación que se basa en la plasticidad ideal para explicar el flujo de material durante el proceso de corte [14]. A medida que el mecanizado evolucionaba y con ello su complejidad, surgieron modelos empíricos que se basaban en el ajuste estadístico y pruebas experimentales, donde su objetivo es ajustar curvas de comportamiento a partir de datos reales como lo es Karpat y Özel, que desarrollaron modelos para estimar el Desgaste de la Herramienta y Temperatura de corte enfocados en la Velocidad de corte (V), Avance (f) y geometría de la herramienta [15].

2.1.2 Avances Recientes en el Estudio de Corte

Para la década de los 70, el avance de la computación permitió el desarrollo del método de elementos finitos, enfocado a obtener resultados comparables con la experimentación, cabe mencionar que este no sustituye la teoría, sino que actúa como una herramienta para el análisis [16].

Posteriormente Molinari y Moufki en 2008, evidenciaron que el modelo de Merchant, no siempre predice correctamente el ángulo de corte observado experimentalmente, proponiendo en su lugar un enfoque fundamentado en la morfología de la viruta [17]. Además, junto con Dudzinski, ya habían planteado en 1998 un modelo mejorado que incorpora leyes de fricción dependientes de la temperatura, logrando una mejor representación en condiciones reales de mecanizado [18].

En la actualidad, se ha impulsado el uso de modelos híbridos que integran enfoques analíticos, empíricos y técnicas de inteligencia artificial, aumentando la precisión. Un ejemplo de ello es el trabajo de Kadirgama et al., quienes emplearon redes neuronales entrenadas con datos experimentales para estimar fuerzas de corte y temperatura con alta fiabilidad [19].

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Introducción al mecanizado

El mecanizado es un proceso que elimina el material de manera controlada (viruta), para dar forma y dimensiones específicas, llevándose a cabo por herramientas de corte [20]. Este proceso conforma en su totalidad a la industria manufacturera moderna, ya que permite crear piezas con altos estándares de calidad y precisión para satisfacer sectores tales como la automotriz, aeroespacial, médico, entre otros, haciéndolas depender netamente de este sector. Debido a estos factores abarca 3/4 partes de la producción mundial llegando incluso a los 50 billones de dólares [21].

2.2.2 Mecanizado sin Arranque de Viruta

No remueve el material mediante una herramienta de corte tradicional, este tipo de mecanizado se lo hace por máquinas que únicamente hacen procesos de conformado y deformación. Es decir, la pieza no sufre cortes, simplemente una transformación, dentro de esta se encuentran la electroerosión (EDM), corte por láser y chorro de agua abrasivo, aunque sí se corta la pieza, no se produce ningún desperdicio material [20].

2.2.3 Mecanizado por Arranque de Viruta

En este tipo de mecanizado el material es desprendido por máquina herramienta, tales como el torno, la fresadora, limadora, taladro, etc. Se lo lleva a cabo mediante herramientas de corte Brocas, Fresas o Buriles que al momento de tocar la pieza de trabajo arrancan el material (viruta) para obtener una forma deseada [22]. Se divide en:

Desbaste: Se produce la eliminación de mucho material con poca precisión.

Acabado: Se elimina poco material con gran precisión.

2.2.4 Torneado

Proceso de mecanizado que consiste en remover material por medio de una herramienta de corte cuando la pieza de trabajo cilíndrica gira sobre su propio eje en una máquina denominada Torno, ver Figura 2.1 [23].

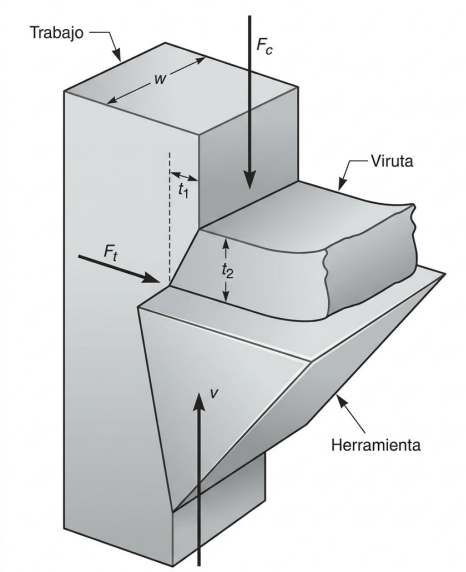


Fig. 2.1. Proceso de Torneado, extraído [8]

2.2.5 Parámetros de Corte del Torneado

Son variables independientes o parámetros que influyen de manera directa al resultado final del torneado (Variables dependientes), donde se tienen las siguientes:

2.2.5.1 Velocidad de corte

Es la velocidad tangencial al cual la herramienta de corte interactúa con la pieza de trabajo, ver (Figura 2.1) es decir un movimiento lineal que se mide en *m/min*. Estos valores deben ser seleccionados dependiendo la capacidad de la máquina-herramienta y el material, debido a que puede causar efectos dañinos a la eficiencia del proceso

Excesiva Velocidad de Corte

- Desgaste rápido de la herramienta de corte, específicamente en el filo.
- Alta deformación en la herramienta de corte y aumento significativo de temperatura.

- Superficies de mala calidad, lo que afecta a la eficiencia del proceso [8].

Baja Velocidad de Corte

- Lo hace menos eficiente al debido al tiempo que toma en culminar el proceso .
- Problemas al momento de desprendimiento de la viruta.
- Puede haber acumulación de material de la pieza sobre el filo de la herramienta, conocido como *Built-up edge (BUE)*, ver (Figura 2.2) [8].

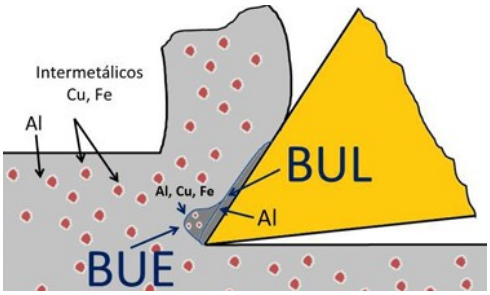


Fig. 2.2. Fractura BUE, extraído [24]

2.2.5.2 Avance

En algunos textos conocida también como t_1 es la velocidad con la que avanza la herramienta de corte, ver (Figura 2.1), es decir el avance que da la herramienta por cada vuelta que da la pieza de trabajo, conocida como revolución y se lo mide en *mm/rev* [25].

2.2.5.3 Profundidad de Corte

También conocida en corte ortogonal como w (ancho de corte) es la cantidad de material que se remueve de la pieza, durante cada ciclo de mecanizado, es decir si (ap) tiene mayor profundidad daría como resultado una viruta gruesa, mayor fuerza y generaría calor, ver (Figura 2.4)

[26]. Cabe mencionar que la Velocidad de corte, Avance y Profundidad de corte al interactuar entre sí, pueden definir la durabilidad de una herramienta de corte por su distribución de calor en el área de contacto.

2.2.6 Tipos de viruta

La viruta se define como el material removido en un proceso de corte y esta se divide dependiendo su estructura en:

- Viruta Continua: se obtiene cuando se corta material dúctil a altas velocidades y esta fluye sin fracturas visibles.
- Viruta Discontinua: ocurre cuando se corta materiales frágiles a velocidad de corte baja lo que resulta a una superficie irregular, ver (Figura 2.3) [8].

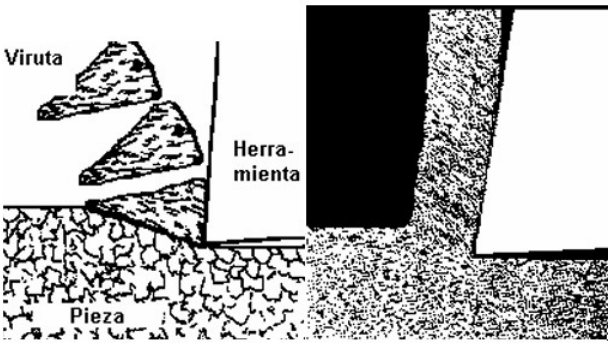


Fig. 2.3. Tipos de viruta en el mecanizado: Discontinua (izquierda), Continua (derecha), extraído [25]

2.2.7 Tipos de corte del torneado

2.2.7.1 Corte Ortogonal

Es un tipo de corte donde la herramienta de corte realiza un movimiento perpendicular en dirección a la Velocidad de Corte (V), además el filo de esta ejerce una presión en el material de trabajo lo que produce esfuerzo cortante τ_s en el plano de corte, en consecuencia produce una separación de la viruta, ver (Figura 2.4) [27].

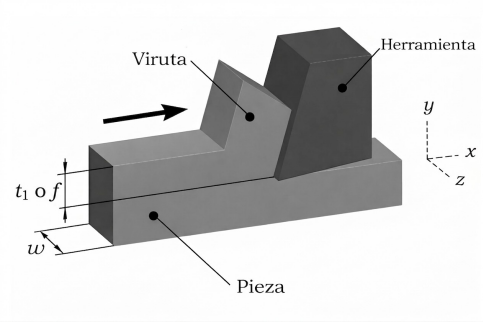


Fig. 2.4. Corte ortogonal, extraído [27]

2.2.7.2 Corte Oblicuo

Es un tipo de corte donde el movimiento de Avance f, respecto al filo del corte de la herramienta, tiende a tomar cualquier ángulo, provocando a la viruta curvarse en forma espiral, ver(Figura 2.1) [28]. A diferencia con el corte ortogonal la dirección de movimiento y el filo de corte posee un ángulo fijo de 90°, lo que permite simplificar el análisis del proceso, porque su deformación ocurre en el plano de corte y la interacción de las fuerzas, puede ser representada de un proceso tridimensional a uno bidimensional.

2.2.8 Fuerzas en el proceso de Corte

Para el análisis de fuerzas el corte ortogonal es un modelo simple, es decir que se lo puede representar de forma bidimensional sin afectar su estabilidad. Estas fuerzas aparecen debido al contacto de la herramienta de corte con la pieza de trabajo, específicamente cuando se genera deformación plástica y fricción [29]. Donde las principales son:

- Fuerza Cortante F_s, se define como la requerida para realizar el corte, esta se encuentra en el plano de cizalla.
- Fuerza de Corte F_c, se define como la necesaria para cortar secciones transversales de la viruta, además esta actúa en dirección a la V.
- Fuerza de Empuje F_t, actúa longitudinalmente y se relaciona con el avance.

2.2.8.1 Fuerza de Resultante R

Este par de fuerzas F_c y F_t producen una fuerza resultante *R*, es decir una fuerza total, ver (Figura 2.5). Esta se divide en 2 componentes, Fuerza de Fricción F y Fuerza Normal o componente N [30].

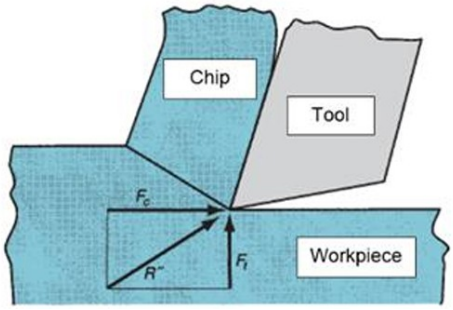


Fig. 2.5. Representación de fuerzas, extraído [30].

2.2.9 Zonas de deformación plástica

Durante este proceso el material no se separa de forma inmediata a la que esta hace contacto con la herramienta de corte, si no que este pasa por un proceso de deformación plástica en regiones o zonas específicas a esto se los conoce como Zonas de Deformación y son las responsables en que se forme la viruta, se genere calor y las fuerzas necesarias para el análisis del proceso. Por ello se identifican en tres zonas principales:

2.2.9.1 Zona primaria

Se la conoce como Zona de Cizalladura debido a que aquí el material se deforma por la presencia de esfuerzos cortantes, se localiza entre el material de trabajo (pieza) y el filo de la herramienta formando el plano de cizalla. En esta zona el material es forzado a desprenderse (viruta), dando como resultado el ángulo de cizalladura (φ) , este se origina debido a la orientación respecto a la velocidad de corte (V) con el plano de cizalla [31]

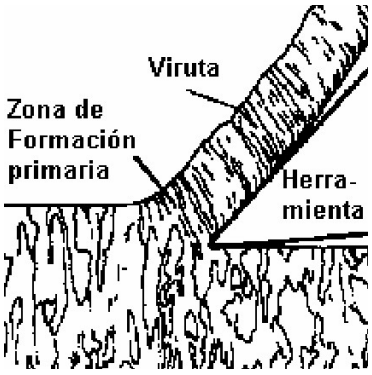


Fig. 2.6. Zona primaria, extraído [25]

Este ángulo define la orientación del plano donde ocurre la deformación, ver (Figura 2.6), además esta zona se lo asocia a que es ínfima y para el tipo de corte que se realiza en la investigación el espesor de esta zona es nula [8].

2.2.9.2 Zona secundaria

Se la conoce como ”Zona de Fricción”, se localiza entre la viruta y la cara de la herramienta de corte, ver (Figura 2.7) . Aquí se genera gran cantidad de calor y un poco de desgaste adicional, debido a la fricción entre ambas superficies, lo que afecta directamente a la eficiencia del proceso de corte [31].

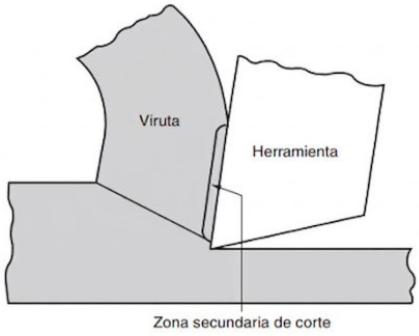


Fig. 2.7. Zona secundaria, extraído [8]

2.2.9.3 Zona terciaria

Se encuentra en la superficie recién mecanizada, es decir en el flanco de la herramienta de corte y la pieza de trabajo mecanizada, en esta zona se determina la calidad superficial del proceso finalizado de corte, ver (Figura 2.8) [31].

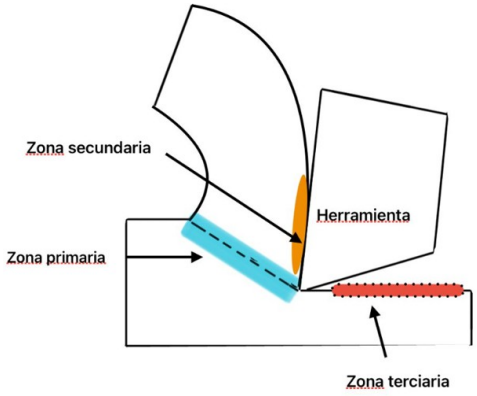


Fig. 2.8. Zona terciaria

2.2.10 Propiedades del Acero AISI-SAE 1018

Es un acero de fácil mecanizado y soldabilidad, debido a su bajo contenido de carbono, es decir tiene mediana resistencia como se observa en la (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Composición y temperaturas de trabajo acero AISI-1020 [52]

Temperatura °C	Propiedades Mecánicas	Composición Química
Forjado (1150-1280)	Dureza Rockwell B (71-83)	Carbono % (0,15-0,20)
Normalizado (890-920)	Resistencia mecánica (440) N/mm^2	Manganeso % (0,60-0,90)
Recocido (870-910)	Elongación (15 % min)	Fósforo % (0-0,040)
Cementado (880-920)	Punto de fluencia (370) N/mm^2	Azufre % (0-0,050)

2.2.11 Variables Mecánicas

Estas son aquellas relacionadas con esfuerzos y fuerzas generadas, ver (Figura 2.9) donde también se encuentran los parámetros geométricos como:

- Ángulo de cizalla φ define la orientación del plano en donde ocurre la deformación para que se genere la viruta.
- Ángulo de fricción β relacionado con el contacto de la viruta y la superficie de la herramienta.
- Ángulo de ataque α influye en la formación de la viruta, dado que si su valor es alto, el corte es profundo y si es baja se generaría calor excesivo [6].

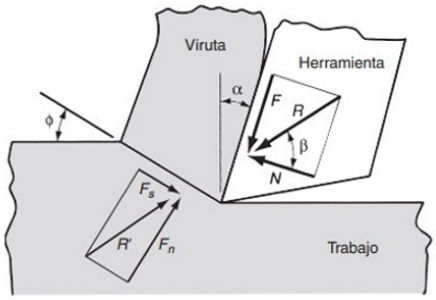


Fig. 2.9. Fuerzas actuantes y ángulos de corte, extraído [8]

Se demuestra lo siguiente:

$$F = Rsen(\beta) \tag{2.1}$$

$$N = Rcos(\beta) \tag{2.2}$$

2.2.12 Variables Térmicas

Se relacionan al calor generado durante el proceso de corte, originado por la deformación del material, la fricción con la viruta y la herramienta de corte [32]. Aquí aparece la Conductividad Térmica (Q), se define como la capacidad de un material para conducir calor hacia la pieza de trabajo y la herramienta de corte, ver (Figura 2.10) [23].

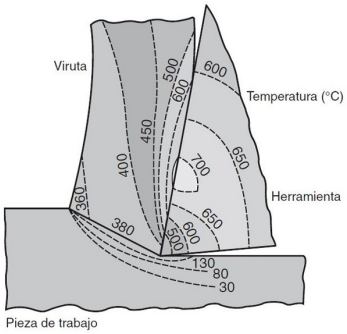


Fig. 2.10. Distribución de calor, extraído [23]

También en esta parte se define la forma de la viruta, ver (Figura 2.3), este calor se origina netamente en las zonas de deformación y en términos prácticos la distribución se relaciona:

Tabla 2.2. Relación de la distribución de calor

Componente	Porcentaje aproximado de calor generado
Viruta	60-80 %
Herramienta	10-20 %
Pieza	10-20 %

2.3 Modelos predictivos en el Corte Ortogonal

Son aquellos modelos que pueden estimar una aproximación ya sea en la temperatura que se genera en una cierta zona con una determinada fuerza y para ello se los clasifican en los siguientes

2.3.1 Modelos Analíticos

Son aquellos modelos que pueden predecir fenómenos sin la necesidad de realizar experimentos, usando sólo ecuaciones de principios físicos, con la finalidad de poder estimar variables necesarias para esta investigación, sin embargo su precisión depende netamente de las condiciones de corte [33]. A continuación se presentan los siguientes modelos que describen de mejor manera en el proceso de corte, cabe mencionar que en el transcurso de la investigación se usan

otros modelos con variaciones considerables.

2.3.1.1 Modelo de Merchant

Este modelo describe la relación entre el Ángulo de ataque (φ), Fricción (β) y Cizalladura (φ) [34]. Se describe por la siguiente ecuación:

$$\varphi = 45° + \frac{\alpha - \beta}{2} \tag{2.3}$$

2.3.1.2 Círculo de Merchant

Es una representación gráfica en dos dimensiones que permite visualizar la relación entre las fuerzas, la herramienta, viruta y la pieza de trabajo, ver (Figura 2.11).

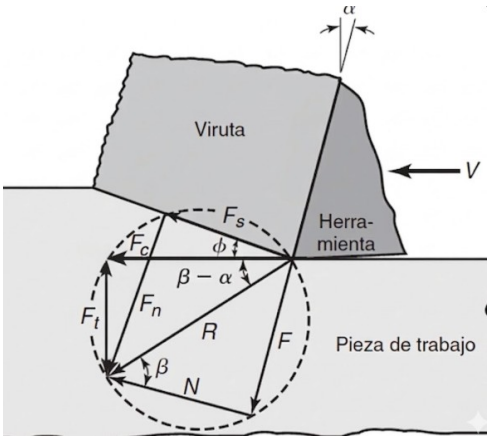


Fig. 2.11. Círculo de Merchant en Corte Ortogonal, extraído [23]

Por eso se muestra los siguiente:

$$F = F_c \,\text{sen}(\alpha) + F_t \cos(\alpha) \tag{2.4}$$

$$N = F_c \cos(\alpha) - F_t \,\text{sen}(\alpha) \tag{2.5}$$

$$F_s = F_c \cos(\varphi) - F_t \,\text{sen}(\varphi) \tag{2.6}$$

$$F_n = F_c \,\text{sen}(\varphi) + F_t \cos(\varphi) \tag{2.7}$$

2.3.1.3 Modelo de Lee y Shaffer

Es un modelo basado en la teoría de la plasticidad, es decir se basa en la zona de cizalladura que es donde ocurre la deformación del material debido a la herramienta de corte y apartir de esto se establece una relación para poder estimar el Ángulo de cizalladura (φ), basándose en lo siguiente, como se muestra a continuación [35]:

$$\varphi = 45° + \alpha - \beta \tag{2.8}$$

2.3.1.4 Modelo de Oxley

Este modelo se basa de datos y resultados experimentales, a diferencia de otros este abarca parámetros adicionales, lo que permite obtener una estimación precisa del ángulo de cizalladura o fuerzas [36]. Tales como:

$$\varphi = \tan^{-1}\left\{[1 + 2\,(45° - \varphi)] + \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{\tan\beta} - \operatorname{sen} 2(\varphi - \alpha)\right\} - \beta + \alpha \tag{2.9}$$

Donde τ_s es el Esfuerzo cortante o resistencia de cizalla, llamada así por algunos autores y A_s como el Área del plano de cizalla, estos parámetros se los encuentra por medio de la interacción entre el Avance f y el Ancho de corte w, además del Esfuerzo σ_s como se observa a continuación:

$$A_s = \frac{fw}{\operatorname{sen}(\varphi)} \tag{2.10}$$

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \tag{2.11}$$

2.3.2 Modelos Empíricos

Estos modelos se desarrollan por el análisis neto de resultados experimentales, a diferencia de los analíticos que se fundamentan en principios físicos y se los usa para estimar diversos parámetros necesarios para describir un proceso de corte, por ello puede ser representada de

una manera directa el comportamiento real del mecanizado, pero siempre limitándose bajo las condiciones experimentales al cual fue expuesta y por el cual se desarrolla [30].

2.3.3 Modelos Numéricos

Estos modelos permiten analizar el proceso de mecanizado a través de simulaciones computacionales, se diferencia de los anteriores modelos porque permite analizar fenómenos a,s complejos enfocados en la deformaciones, generación de calor, fricción (herramienta-viruta). Un método utilizado es el de los Elementos finitos, se define como la división de del problema en pequeños elementos para resolver de manera aproximada las ecuaciones que describen su comportamiento mecánico y térmico [37].

Formulaciones típicas de Elementos Finitos

2.3.4 Formulación Lagrangiana

En este método, la malla computacional se encuentra unida al material, por lo que se deforma simultáneamente con este a medida que ocurre el proceso de corte.

Dentro de esta formulación existen dos variantes principales: Formulación Lagrangiana total y la Formulación Lagrangiana actualizada. La Formulación Lagrangiana total toma como referencia la configuración inicial del material, es decir, el estado sin deformaciones en el tiempo inicial, mientras que la Formulación Lagrangiana actualizada utiliza como referencia la configuración deformada en el paso de tiempo anterior, permitiendo un análisis incremental del proceso de deformación, permitiendo describir de manera precisa la evolución de la deformación del material [38].

2.3.5 Formulación Euleriana

Es un enfoque utilizado en el modelado numérico, donde la malla computacional permanece fija en el espacio, mientras que el material fluye a través de ella durante el proceso de deformación. A diferencia de la formulación Lagrangiana, el análisis se realiza en puntos espaciales definidos. Una de las ventajas de esta formulación es que evita la distorsión de la malla, además presenta limitaciones en que no permite representar de manera directa la separación del material, lo que dificulta la simulación de la formación y fragmentación de la viruta [38].

2.3.6 Formulación ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian)

Es un enfoque híbrido que combina las ventajas de las formulaciones Lagrangiana y Euleriana para el análisis de procesos de deformación. En este método, la malla puede moverse de manera independiente del material, permitiendo que algunas regiones se comporten de forma Lagrangiana, mientras que otras adoptan un comportamiento Euleriano. En las zonas donde se aplica el enfoque Lagrangiano, los nodos de la malla se deforman junto con el material, lo que permite un seguimiento de la deformación. Por otro lado, en las regiones donde se aplica el enfoque Euleriano, la malla permanece fija y el material fluye a través de ella [38].

Modelos Constitutivos del Material

2.3.7 Modelo de Johnson-Cook

Este modelo describe el comportamiento del material, ver (Ecuación 2.12), considerando la Deformación plástica (ε), la Velocidad de deformación ($\dot{\varepsilon}$), la Temperatura (T) y la velocidad de referencia del ensayo ($\dot{\varepsilon}_0$).

$$\sigma_s = (A + B\varepsilon^n)\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m\right] \tag{2.12}$$

Donde A, B, C, n, m son constantes del material; además, T_{room} y T_{melt} son la temperatura ambiente y la temperatura de fusión del material, respectivamente [33].

2.3.8 Modelo de Zerilli-Armstrong

Este modelo describe el comportamiento mecánico de los materiales metálicos, se basa en la influencia de la temperatura, velocidad de deformación y estructura del material por lo que se llega a 2 formulaciones. Por esto posee una mayor precisión física, se obtiene la ecuación Metales BCC (Cúbica entrada en el cuerpo), netamente para hierro puro o acero al carbono, en esta parte, el esfuerzo es extremadamente sensible a la Temperatura y velocidad de deformación, en otras palabras son defectos que hacen doblar el metal más fácil [39].

$$\sigma_s = C_0 + C_2 \varepsilon^{-1/2} \exp\left(-C_3 T + C_4 T \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \tag{2.13}$$

Y como segunda ecuación Metales FCC (Cúbica centrada en las caras), netamente para cobre, aluminio, níquel o aceros inoxidables el material se endurece por deformación plástica por interacción y acumulaciones de dislocaciones (error en la organización de átomos) [39].

$$\sigma_s = C_0 + C_1 \exp\left(-C_3 T + C_4 T \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) + C_5 \varepsilon^n \tag{2.14}$$

Donde C_0 es la componente del esfuerzo que representa la densidad de dislocaciones, mientras que C_1, C_3, C_4, C_5 y n son constantes del material, y T es la temperatura.

2.4 Análisis comparativa

Para establecer una relación entre los enfoques analizados, se presenta un cuadro comparativo de los modelos predictivos. En este análisis se consideran las principales variables termomecánicas que cada modelo es capaz de estimar, tales como la temperatura, el esfuerzo y la deformación del

material, con la finalidad de identificar las capacidades y limitaciones de cada tipo de modelo, ver (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Comparación de modelos de corte y sus variables

Tipo de modelo	Modelo	Temperatura	Esfuerzos	Deformación
Analítico	Merchant	No directamente	Sí	Limitada
Analítico	Oxley	Sí	Sí	Sí
Analítico	Lee y Shaffer	No	Sí	Sí
Empírico	Modelos experimentales	Sí (ajustada)	Sí (ajustada)	Sí (ajustada)
Numérico	FEM + constitutivos	Sí	Sí	Sí
Numérico	Zerilli–Armstrong	Sí	Sí	Sí

A partir de esto, se observa que los modelos analíticos permiten una comprensión inicial del proceso de corte, aunque presentan limitaciones en la estimación de variables complejas. En cambio, los modelos empíricos ofrecen resultados ajustados a situaciones específicas y los modelos numéricos, incluyendo los modelos constitutivos permiten una representación más completa del comportamiento termomecánico del material, siendo los más adecuados para estudios de corte ortogonal.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Enfoque y tipos de investigación

La presente investigación se desarrolla desde un enfoque ingenieril con base de una investigación aplicada. Es decir, se basa en la búsqueda de soluciones prácticas, basadas en un conocimiento teórico para resolver problemas enfocados en generar aplicaciones reales [40].

Adopta un enfoque Cuantitativo y Documental porque se fundamenta en al análisis datos numéricos que predicen un fenómeno o resultados experimentales, debido a que estos datos se extraen de artículos científicos, tesis y libros.

Para evaluar el grado de precisión en cuanto a la confiabilidad de los modelos existentes Analíticos, Empíricos, Numéricos que predicen las variables térmicas y mecánicas, se usan herramientas estadísticas y comparativas.

Los tipos de investigación que se desarrollan en el estudio son:

- Aplicada
- Documental
- Cuantitativa
- Analítica

Aplicada, debido a que se busca generar conocimiento muy práctico y directo para así, mejorar el área de mecanizado orientados a control y planificación en contextos reales de la industria [40].

Documental, porque este se fundamenta en una revisión, análisis y una interpretación de las fuentes bibliográficas, para usar como apoyo en la presente investigación [41].

Cuantitativa, debido a su enfoque de recopilar y analizar datos numéricos, mediante técnicas estadísticas deductivas, para así refutar una hipótesis[42].

Analítica, se basa en desglosar un fenómeno en variables medibles para compararlas y así profundizar en una correcta interpretación [43]. En esta investigación un análisis detallado de los modelos matemáticos predictivos y las relaciones que tienen algunos parámetros, hace más factible la búsqueda de una solución a la problemática planteada.

Cabe mencionar que el análisis es de carácter Descriptivo-Comparativo con la finalidad de definir criterios en cuanto a selección y uso de los modelos matemáticos en función de:

- Tipo de Material Mecanizado
- Parámetros de Corte
- Complejidad del Proceso

3.2 Diseño de la Investigación

El diseño metodológico de esta investigación es de tipo No experimental, Documental y Comparativo, porque se basa en un análisis de fuentes secundarias y simulaciones previamente publicadas en bases de datos confiables, es decir, sin manipular directamente un entorno físico controlado [41]. Se centra netamente en la recolección, estructuración, comparación y una evaluación de los datos obtenidos.

La investigación se desarrolla en las siguientes fases:

Fase 1

3.2.1 Revisión bibliográfica

Se recopila información en artículos científicos, tesis y libros donde se hable de temas relacionados con corte Ortogonal o temas similares que sustenten con la investigación, utilizados para estimar variables mecánicas y térmicas. Esta fase permite identificar los modelos, variables involucradas y condiciones de aplicación.

3.2.2 Clasificación de Modelos Predictivos

Los modelos identificados se clasifican según su naturaleza (Analítica, Empírica o Numérica) y evaluados según criterios como:

- Requerimientos de entrada
- Complejidad matemática
- Precisión reportada en estudios anteriores
- Aplicabilidad en condiciones industriales

Dado esto, la Actividad 1 y 2 sustentan la Fase 1

Actividad 1 Revisión bibliográfica de artículos científicos en bases confiables

Actividad 2 Clasificación de los modelos predictivos según su tipo (analítico, numérico, empírico)

Fase 2

3.2.3 Análisis de las principales variables que afectan el proceso de mecanizado

Se describen las variables térmicas y mecánicas que afectan el proceso de corte y su relación con los modelos matemáticos.

3.2.4 Comparación con datos reales

Se evalúa la capacidad predictiva de los modelos matemáticos mediante la comparación de sus resultados con datos experimentales obtenidos durante los ensayos de mecanizado y, cuando fue necesario, con información reportada en la literatura científica. Esta comparación permite determinar el nivel de aproximación de cada modelo para las diferentes variables analizadas. Con el fin de establecer un criterio uniforme de comparación, se emplea el número térmico de Boothroyd como parámetro adimensional de referencia, utilizándolo como variable independiente (eje x) en las representaciones y análisis comparativos de los modelos. Para ello se cumplen con las siguientes actividades:

Actividad 3 Análisis de las variables térmicas y mecánicas que predice cada modelo mediante un cuadro comparativo

Actividad 4 Comparación de los resultados obtenidos con datos experimentales o referencias confiables

Fase 3

3.2.5 Cálculo de errores

Se realiza una comparación entre los modelos seleccionados, utilizando como referencia artículos encontrados en la literatura. Esta comparación se basa en la capacidad que posee cada

modelo para predecir el fenómeno, frente a datos experimentales. Para ello, se emplean métricas como el Error Porcentual Promedio.

Actividad 5 Cálculo de errores relativos de precisión (Error porcentual) entre los valores estimados por los modelos y datos reales.

Fase 4

3.2.6 Propuesta y validación del modelo combinado

Con base en el análisis comparativo de los modelos matemáticos evaluados, se plantea un modelo combinado para mejorar la estimación de las variables termomecánicas en el proceso de corte ortogonal. La propuesta integra las ecuaciones que presentaron menor error de estimación para cada una de las variables analizadas.

La validación del modelo combinado se realiza utilizando diferentes fuentes de referencia según la variable. El desgaste de flanco es validado mediante datos experimentales obtenidos durante los ensayos de mecanizado, empleando mediciones realizadas con microscopio. Por otra parte, el ángulo de cizalladura es evaluado mediante la comparación de las estimaciones obtenidas con los valores reportados en la literatura científica. Las demás variables consideradas en el modelo fueron analizadas mediante la comparación entre los valores estimados por las ecuaciones seleccionadas y los datos de referencia correspondientes, utilizando el error porcentual como criterio de evaluación.

Para esta fase se desarrollaron las siguientes actividades:

Actividad 7 Construcción y ajuste del modelo combinado para el proceso estudiado

Actividad 8 Comparación de los resultados del modelo con datos disponibles

Actividad 9 Análisis de los resultados obtenidos para evaluar la validez del modelo propuestos

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para la aplicación y validación de los modelos predictivos se usaron datos reportados en la literatura especializada, estos son tanto las variables de entrada como las medidas y así poder aplicar y ver la eficiencia de los modelos matemáticos.

4.0.1 Variables de entrada o independientes

Son parámetros de corte más comunes utilizados en el proceso de torno como:

- Velocidad de corte V
- Avance f o t_1
- Profundidad de corte a_p o ancho de corte w
- Ángulo de ataque α
- Razón de corte r_c

Estas variables son usadas por los modelos matemáticos para poder estimar las variables de respuesta (dependientes), relacionado con:

$$V_d = f(V, f, a_p, \alpha, r_c) \tag{4.1}$$

4.0.2 Variables experimentales de validación o dependientes

Son variables de resultados experimentales y fueron usados para comparar y validar los datos obtenidos por medio de los modelos predictivos

- Fuerza de corte F_c
- Fuerza de empuje F_t
- Ángulo de cizalla φ
- Esfuerzo cortante τ_s o S_s
- Desgaste en flanco V_B

4.1 Datos de la literatura

Para validar los modelos matemáticos empleados en esta investigación, se recopilaron datos experimentales reportados en los siguientes artículos científicos y en bibliografía especializada. Estos datos corresponden a diferentes materiales metálicos y condiciones de corte ortogonal.

Tabla 4.1. Resultados experimentales de mecanizado - Acero NE 9445 (HB=187): Teoría de corte de metales [25]

t_1 **(mm)**	**V (m/min)**	α **(grados)**	r_c	φ **(grados)**	F_c **(N)**	F_t **(N)**	μ	τ_s **(MPa)**	σ **(MPa)**	W_t **(**Nm/m^3**)**
0,094	60	10	0,29	17	1646	1214	586	793	1,05	2758
0,094	122	10	0,33	19	1601	1259	607	945	1,11	2689
0,094	196	10	0,37	21,5	1463	965	621	889	0,95	2455
0,094	362	10	0,44	25	1348	747	641	896	0,81	2262
0,094	122	-10	0,32	16,5	1850	1712	614	1055	0,64	3103
0,094	194	-10	0,37	19	1708	1450	621	1048	0,58	2861
0,094	354	-10	0,44	22	1583	1170	648	1062	0,51	2655
0,001	165	10	0,33	19	565	449	710	1131	1,12	3206
0,059	165	10	0,32	18,5	1076	827	638	965	1,08	2855
0,094	165	10	0,37	21,5	1495	1005	627	903	0,96	2503
0,2	165	10	0,44	25	2691	1401	614	800	0,76	2117
0,001	165	10	0,73	12,5	805	881	710	1234	0,78	4578
0,059	165	10	0,3	16	1312	1294	662	1186	0,7	3482
0,094	165	10	0,37	19	1784	1557	648	1131	0,6	2992
0,2	165	10	0,46	22,5	3105	2099	621	952	0,46	2441

Tabla 4.2. Datos experimentales- Acero SAE 4130: Teoría de corte de metales [25]

t_1 **(mm)**	**V (m/min)**	α **(grados)**	r_c	φ **(grados)**	F_c **(N)**	F_t **(N)**	μ	τ_s **(MPa)**	σ **(MPa)**	W_t (Nm/m^3)
0,064	27	25	0,358	20,9	1690	996	1,46	571	717	2206
0,089	27	25	0,366	21,5	2113	1250	1,46	514	662	1972
0,127	27	25	0,407	24	2860	1588	1.38	521	690	1862
0,152	27	25	0,345	20,1	3238	1770	1,36	454	596	1758
0,216	27	25	0,383	22,4	4412	2451	1,38	459	576	1696
0,064	27	35	0,527	31,6	1130	454	1,53	492	662	1476
0,089	27	35	0,528	31,9	1361	543	1,52	422	579	1269
0,127	27	35	0,529	32	1926	738	1,48	430	572	1255
0,152	27	35	0,533	32,2	2255	818	1,43	426	611	1227
0,216	27	35	0,532	32	3002	1041	1,38	403	558	1151
0,064	27	40	0,585	35,7	1032	316	1,54	496	652	1345
0,089	27	40	0,58	35,4	1317	387	1,5	459	581	1227
0,127	27	40	0,611	37,5	1833	498	1,44	456	600	1193
0,152	27	40	0,606	37,2	2113	565	1,42	438	621	1151
0,216	27	40	0,606	37,2	2820	681	1,35	424	573	1083
0,064	27	45	0,67	41,9	1032	302	1,83	490	790	1345
0,089	27	45	0,67	41,9	1268	343	1,74	443	681	1179
0,127	27	45	0,649	40,2	1717	418	1,64	440	601	1117
0,152	27	45	0,642	39,6	1970	454	1,6	425	557	1069
0,216	27	45	0,646	39,9	2584	520	1,51	405	507	993

Tabla 4.3. Datos experimentales- AISI 1045: A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining [44]

V (m/min)	**t1 (mm)**	**tc (mm)**	φ **°**	**Fc (N/mm)**	**Ft (N/mm)**	α **[°]**	**w(mm)**	μ
100	0,125	0,4	16,9	350	325	-5	4	0,94
200	0,125	0,3	21,8	325	225	-5	4	0,65
400	0,125	0,3	21,8	300	225	-5	4	0,72
100	0,25	0,7	19	625	450	-5	4	0,71
200	0,25	0,55	23,5	625	375	-5	4	0,57
400	0,25	0,5	25,5	550	325	-5	4	0,56
100	0,5	1,1	23,5	1125	625	-5	4	0,53
200	0,5	0,9	27,8	1050	500	-5	4	0,44

Tabla 4.4. Datos experimentales -Al 6082-T6: A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining [44]

V (m/min)	t1 (mm)	tc (mm)	φ °	Fc (N/mm)	Ft (N/mm)	α [°]	w(mm)	μ
180	0,2	0,52	21,92	180	130	8	3	1,4964
240	0,2	0,415	27,09	155	85	8	3	1,01
360	0,2	0,39	28,67	150	70	8	3	0,8289
480	0,2	0,375	29,7	140	60	8	3	0,7575
180	0,4	0,8	28,02	300	165	8	3	1,0262
240	0,4	0,685	32,18	270	105	8	3	0,7046
360	0,4	0,605	35,79	255	95	8	3	0,6317
480	0,4	0,59	36,55	245	80	8	3	0,5799

Las (Tablas 4.3 y 4.4) representan a la fuerza por cada milímetro de ancho de corte, es decir una fuerza lineal distribuida.

Tabla 4.5. Datos Experimentales - AISI 1018: Utilización del Criterio de desgaste de Flanco y la Ecuación de Taylor para simular el tiempo de vida de una herramienta de corte mediante el proceso de torneado en CNC para un material AISI 1018 [45]

V (m/min)	RPM (rpm)	V_B (mm)	T (min)	$t1$ (mm)	w (mm)	Experimental V_B (mm)
300	1542,47	0,084	0,358	0,15	0,4	0,084
381,14	1381,78	0,099	0,375	0,15	0,4	0,099
405	1685,16	0,114	0,268	0,15	0,4	0,114
450	2325,21	0,13	0,241	0,15	0,4	0,13
570	3372,42	0,151	0,167	0,15	0,4	0,151

4.2 Modelos usados para el ángulo de cizalladura

Para este cálculo se usaron modelos que datan desde 1945 hasta 2020 para así obtener una correcta estimación en cada modelo que se empleó, a continuación se describe cada ecuación y una breve explicación de su funcionalidad.

4.2.1 Merchant 1945

Este modelo establece al ángulo de cizalladura φ dependiente del ángulo de ataque α y del ángulo de fricción β, además este al poder ser descrito en un plano bidimensional puede relacionar los ángulos de corte con fuerzas que se involucran en el proceso de corte, por medio del círculo de Merchant [34].

$$\varphi = 45° + \frac{\alpha - \beta}{2} \tag{2.3}$$

Cabe destacar que existen dos ecuaciones aparte, con ligeras modificaciones, ver(Ecuación 4.2 y 4.3) donde k_s se obtiene a través de τ_s/σ_n .

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{r_c \cos\alpha}{1 - r_c \operatorname{sen}\alpha}\right) \tag{4.2}$$

$$\varphi = \frac{\cot^{-1} k_s + \alpha - \beta}{2} \tag{4.3}$$

$r_c =$ Razón de corte.

$\beta =$ Ángulo de fricción.

$\alpha =$ Ángulo de ataque.

$k_s =$ Coeficiente de resistencia de cizallamiento

$\tau_s =$ Esfuerzo cortante real o resistencia al cizallamiento

$\sigma_n =$ Esfuerzo o tensión normal

4.2.2 Lee Shaffer 1949

Este modelo es basado en la teoría de plasticidad, donde este puede sobreestimar o subestimar los valores reales, ya que no considera el endurecimiento por deformación del material, ver (Ecuación 2.8) , por lo cual hace a este modelo linealmente dependiente de los ángulos de corte

[35].

$$\varphi = 45° + \alpha - \beta \tag{2.8}$$

4.2.3 Oxeley et al 1961

A diferencia de los modelos anteriores, Oxeley ver (Ecuación 2.9) establece un mayor cuidado en las propiedades del material y a las condiciones de corte [36].

$$\varphi = \tan^{-1}\left\{[1 + 2\,(45° - \varphi)] + \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{\tan\beta} - \operatorname{sen} 2(\varphi - \alpha)\right\} - \beta + \alpha \tag{2.9}$$

Este modelo es más robusto para predecir de manera detallada el comportamiento de aceros, debido a que φ aparece en ambos lados de la ecuación.

4.2.4 Lee et al 2003

Se utiliza para ajustar la predicción del ángulo de cizalla a comportamientos reales de materiales metálicos bajo condiciones de corte.

$$\varphi = m_{k1} - m_{k2}(\beta - \alpha) \tag{4.4}$$

Donde m_{k1} y m_{k2}, son parámetros de ajuste calibrados experimentalmente y se las tratan como constantes que dependen netamente del material [29].

4.2.5 Shaw and Cookson 2005

Este modelo incorpora efectos de fricción (*Herramienta-viruta*) más realistas como el coeficiente de fricción μ

$$\varphi = 45° - \frac{1}{2}\tan^{-1}(2\mu) + \alpha \tag{4.5}$$

Además, si la fricción es muy alta o cambia drásticamente debido a la velocidad de corte, el ángulo de cizalladura no cae de forma lineal, debido a la configuración de su tangente [46].

4.2.6 Wang 2020

Este considera parámetros del material como el endurecimiento y velocidad de deformación, también introduce un factor de corrección multiplicativo basado en las propiedades mecánicas del material [29] y [47].

$$\varphi = (k_a M + k_b)\left(45^\circ + \frac{\alpha - \beta}{2}\right) \tag{4.6}$$

$K_a =$ Coeficiente de endurecimiento por deformación.

$M =$ Exponente de endurecimiento por deformación.

$K_b =$ Coeficiente de sensibilidad a la velocidad de deformación.

4.2.7 Número Térmico de Boothroyd

Este es un parámetro adimensional que permite cuantificar qué tan rápido se genera el calor por el corte, en comparación con qué tan rápido ese calor se disipa en el material [44].

$$R_t = \frac{V t_1}{2\delta} \tag{4.7}$$

Donde:

$\delta =$ difusividad térmica del material.

$t_1 =$ espesor de viruta sin cortar

El uso de R_t como variable independiente (x),al ser un número adimensional facilita la identificación de tendencias asintóticas, es decir cuando un valor se estabiliza hacia un límite, pero no

lo alcanza exactamente; esto permite demostrar gráficamente que a partir de cierto valor crítico el incremento de temperatura tiende a estabilizarse.

Para determinar la difusividad térmica se usaron datos de la siguiente Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Propiedades térmicas y físicas de los materiales [48], [49], [50], [51], [52].

Material	k **(W/m·K)**	c_p **(J/kg·K)**	ρ **(kg/m^3)**
Acero SAE 4130	42.7	477	7850
Acero NE 9445	50	486	7850
Acero AISI 1045	51.9	486	7850
Aluminio 6061-T6	167	896	2700
AISI 1018	52	486	7870

Donde

$$\delta = \frac{k}{\rho c_p} \tag{4.8}$$

$k =$ conductividad térmica

$c_p =$ calor específico

$p =$ densidad

4.3 Resultados del ángulo de cizalla φ

Con la aplicación de estos modelos se obtuvieron los siguientes resultados donde en la gráfica al ángulo experimental (φ), se lo representa de forma continua respecto a los valores calculados, que a estos se los representó de forma discontinua, para distinguir de una mejor manera y poder compararlos, (ver Tabla 4.7). Estos resultados pertenecen al material Acero NE 9445 de la Tabla 4.1.

Tabla 4.7. Resultados del ángulo de corte (φ) incluyendo Boothroyd

K_s	Merchant φ_1 1945 (°)	Merchant φ_2 1945 (°)	Merchant φ_3 1945 (°)	Lee and Shaffer 1949 (°)	Oxley et al 1961 (°)	Lee et al. 2003 (°)	Shaw and Cookson 2005 (°)	Wang et al 2020 (°)	N. Boothroyd
0,74	26,80	16,74	8,57	8,60	33,15	14,06	22,73	8,85	6,70
0,64	26,01	19,02	9,65	7,02	30,12	12,71	22,12	8,59	14,91
0,70	28,23	21,28	10,77	11,47	34,36	16,50	23,88	9,32	26,04
0,72	30,50	25,13	12,71	15,99	38,29	20,34	25,84	10,07	51,95
0,58	23,69	16,62	8,59	2,38	26,30	8,77	9,00	7,82	18,80
0,59	24,94	18,90	9,62	4,89	28,61	10,90	10,38	8,24	31,96
0,61	26,49	21,93	10,79	7,98	31,69	13,53	12,22	8,75	62,09
0,63	25,88	19,02	9,82	6,76	29,80	12,50	22,03	8,55	30,69
0,66	26,40	18,45	9,66	7,80	31,37	13,38	22,42	8,72	32,45
0,69	28,08	21,28	10,70	11,17	33,97	16,24	23,76	9,27	34,20
0,77	31,38	25,13	12,63	17,77	40,72	21,85	26,67	10,36	35,95
0,58	31,02	39,46	16,07	17,05	45,32	21,24	26,33	10,24	37,71
0,56	32,50	17,31	17,92	20,01	47,78	23,76	27,77	10,73	39,46
0,57	34,52	21,28	19,61	24,04	51,91	27,18	29,90	11,40	41,21
0,65	37,65	26,21	21,09	30,30	59,29	32,50	33,69	12,43	42,97

Como se ve en la (Figura 4.1) se observa ligeras variaciones entre los modelos calculados, respecto al valor experimental del ángulo de cizalladura.

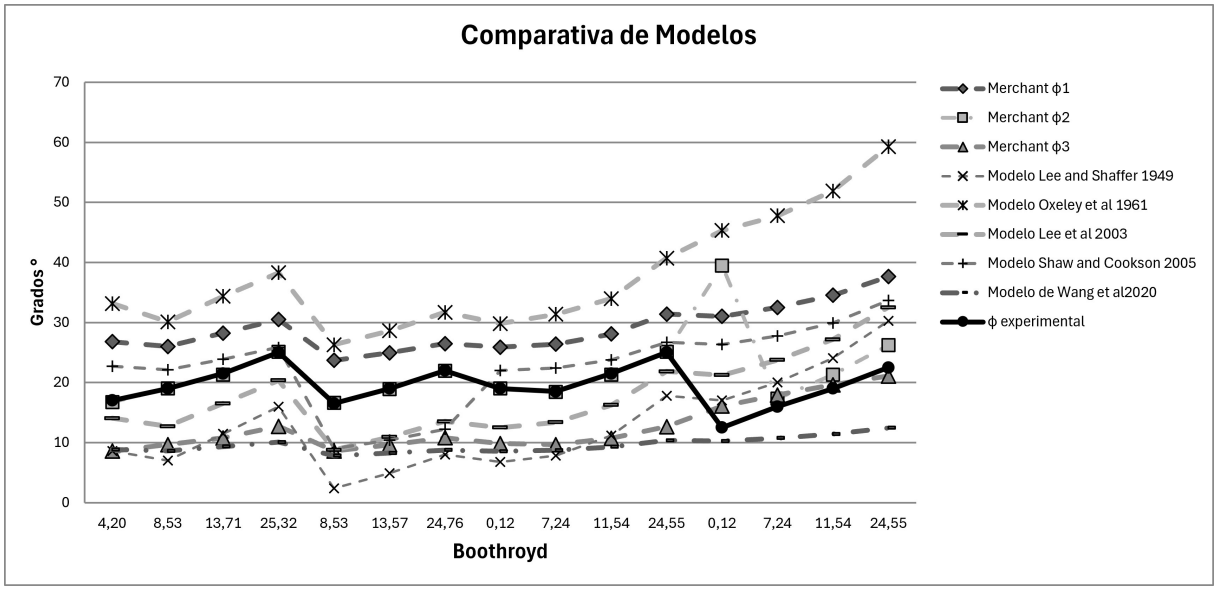


Fig. 4.1. Comparación entre el ángulo de cizalladura obtenido experimentalmente y los valores por los diferentes modelos matemáticos para el acero NE 9445, mostrando el comportamiento de cada modelo bajo las distintas condiciones de corte

La (Tabla 4.8) muestra los resultados obtenidos del acero SAE 4130 de la (Tabla 4.2).

Tabla 4.8. Resultados de (φ) según diversos modelos teóricos

K_s	**Merchant φ_1 1945 (°)**	**Merchant φ_2 1945 (°)**	**Merchant φ_3 1945 (°)**	**Lee and Shaffer 1949 (°)**	**Oxley et al 1961 (°)**	**Lee et al. 2003 (°)**	**Shaw and Cookson 2005 (°)**	**Wang et al 2020 (°)**	**N. Boothroyd**
0,7963738	29,704236	20,921805	10,4378	14,40847	38,8551786	19,0267778	34,452288	10,693525	1,25217391
0,776435	29,704236	21,425301	10,7907	14,40847	38,5600253	19,0267778	34,452288	10,693525	1,74130435
0,7550725	30,464251	24,012728	11,9365	15,9285	39,0673905	20,2428019	34,958203	10,9671304	2,48478261
0,761745	30,663413	20,105033	12,0143	16,32683	41,48983478	20,56146076	35,092902	11,0388287	2,97391304
0,796875	30,464251	22,496971	11,189	15,9285	39,9161633	20,2428019	34,958203	10,9671304	4,22608696
0,7432024	34,08421	31,745704	15,7743	23,16842	44,09770153	26,03473666	44,048628	12,2703157	1,25217391
0,7288428	34,170354	31,815429	16,1273	23,34071	44,11282133	26,17256588	44,104242	12,3013273	1,74130435
0,7517483	34,522969	31,885163	16,056	24,04594	44,92237443	26,73674989	44,333457	12,4282687	2,48478261
0,6972177	34,98256	32,164189	17,5401	24,96512	45,93490714	27,47209662	44,636099	12,5937217	2,97391304
0,7222222	35,464251	32,094419	17,5454	25,9285	47,2645068	28,24280192	44,958203	12,7671304	4,22608696
0,7607362	36,498853	35,685985	17,8681	27,99771	47,76214733	29,89816408	48,993667	13,1395869	1,25217391
0,7900172	36,845034	35,314317	17,6904	28,69007	48,84265799	30,45205402	49,217474	13,2642122	1,74130435
0,76	37,388916	37,62383	18,7715	29,77783	48,69428559	31,32226509	49,574069	13,4600096	2,48478261
0,705314	37,577089	37,250608	19,9792	30,15418	49,40444033	31,62334211	49,698906	13,527752	2,97391304
0,7399651	38,264428	37,250608	20,0144	31,52886	51,16796686	32,72308429	50,161568	13,775194	4,22608696
0,6202532	36,827157	41,99605	20,9225	28,65431	44,07582569	30,42345125	52,640804	13,2577765	1,25217391
0,650514	37,443263	41,99605	20,921	29,88653	45,69732501	31,40922155	53,01617	13,4795748	1,74130435
0,7321131	38,186503	40,302519	20,0823	31,37301	49,12682413	32,59840411	53,477657	13,7471409	2,48478261
0,7630162	38,502692	39,73933	19,8306	32,00538	50,41857867	33,10430657	53,677012	13,860969	2,97391304
0,7988166	39,257292	40,060882	19,9481	33,51458	52,11742881	34,31166664	54,16052	14,132625	4,22608696

A continuación se puede observar la gráfica de los resultados, ver (Figura 4.2) donde se presentan ligeras variaciones entre los valores calculados respecto al ángulo de cizalladura φ experimental.

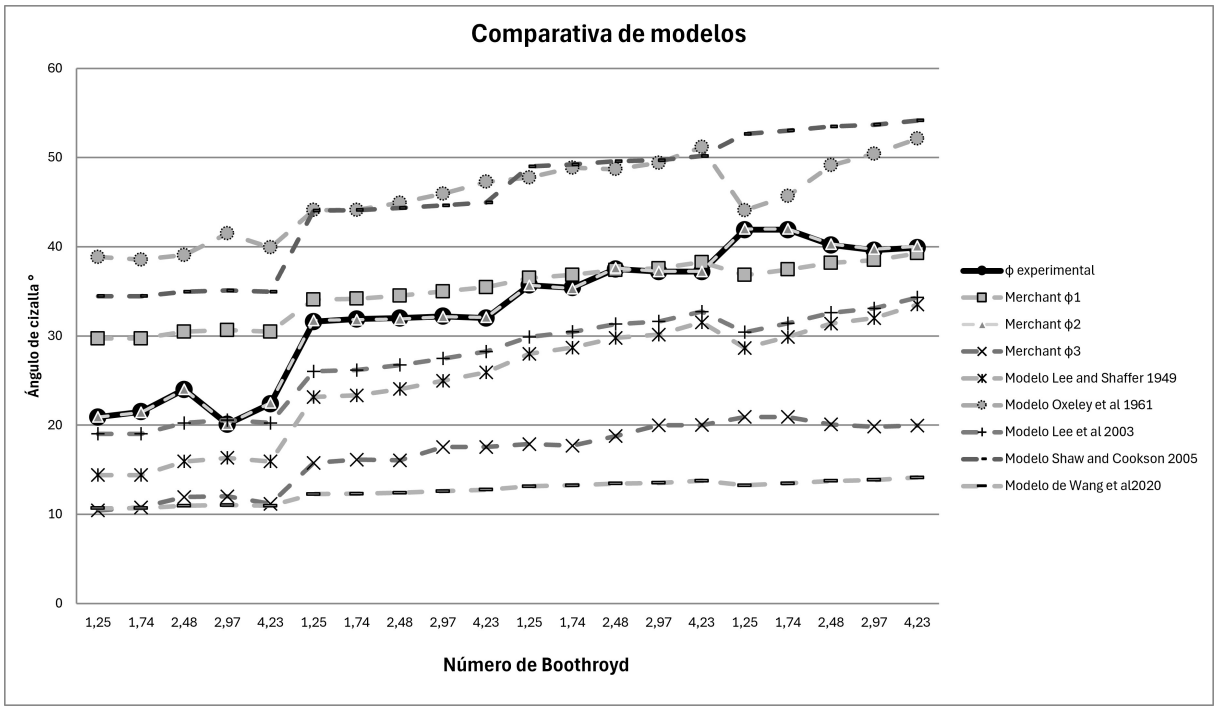


Fig. 4.2. Comparación entre el ángulo de cizalladura experimental y las predicciones obtenidas mediante los diferentes modelos matemáticos para el acero SAE 4130

La (Tabla 4.9) muestra los resultados del material AISI 1045, ver (Tabla 4.3)

Tabla 4.9. Datos transcritos de ángulos de cizallamiento por modelos

Merchant φ_1 1945 (°)	Merchant φ_2 1945 (°)	Lee and Shaffer 1949 (°)	Oxley et al 1961 (°)	Lee et al. 2003 (°)	Shaw and Cookson 2005 (°)	Wang et al 2020 (°)	N. Boothroyd
21,0605482	16,859786	23,1	18,51219068	23,3908605	9,00458835	9,161338466	17,3611111
25,1524232	21,827865	18,2	26,75360696	26,8280355	13,784296	10,94130411	34,7222222
24,0650518	21,827865	18,2	23,63752628	25,914643	12,3889157	10,46829726	69,4444444
24,6230564	19,0366683	21	26,90468814	26,3833674	12,5770888	10,71102952	34,7222222
27,0181217	23,5360391	16,5	31,21566406	28,3952223	15,6285059	11,75288295	69,4444444
27,2103866	25,5150372	14,5	30,59178577	28,5567247	15,8801499	11,83651816	138,888889
27,9726979	23,5360391	16,5	34,09402499	29,1970663	16,6658313	12,16812361	69,4444444
29,7683275	27,8287465	12,2	37,37319618	30,7053951	19,3261114	12,94922245	138,888889

La (Figura 4.3) muestra ligeras variaciones del ángulo experimental φ respecto a los calculados por los modelos.

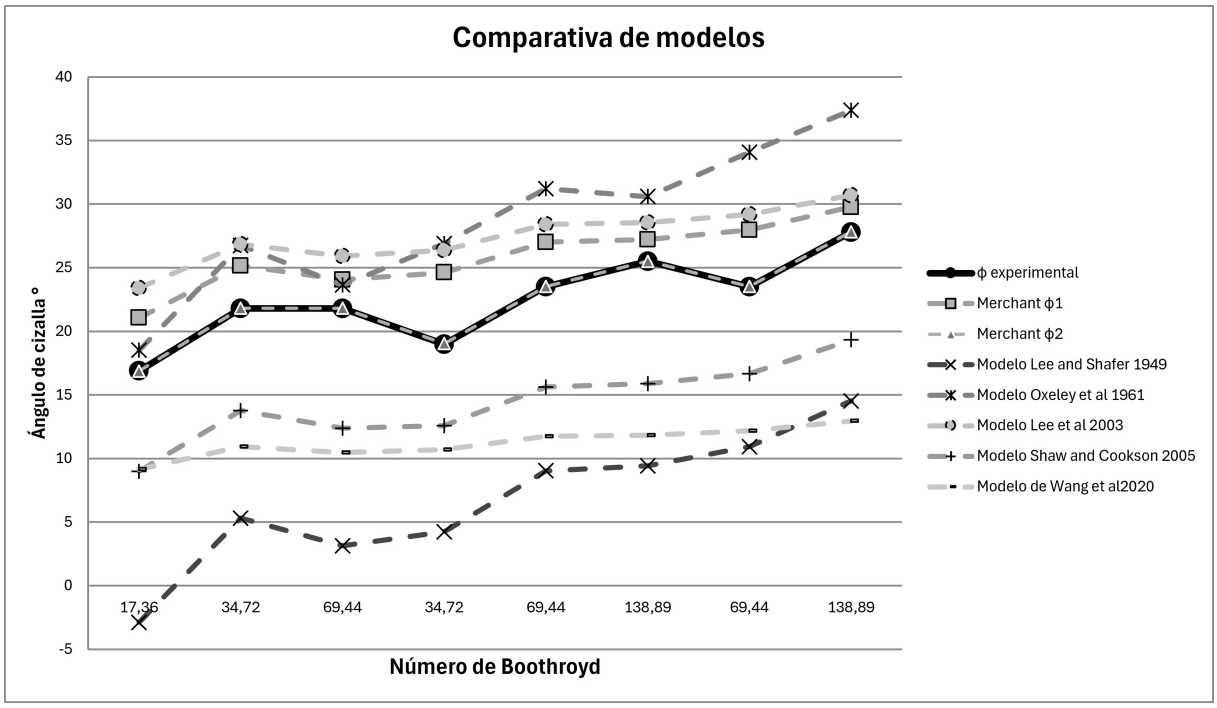


Fig. 4.3. Comparativa de modelos predictivos respecto al ángulo de cizalla AISI 1045

La (Tabla 4.10) muestra los resultados obtenidos del material Al 6082-T6 tabulados en la (Tabla 4.4).

Tabla 4.10. Datos transcritos del ángulo de cizallamiento por modelos

Merchant φ_1 1945 (°)	Merchant φ_2 1945 (°)	Lee and Shaffer 1949 (°)	Oxley et al 1961 (°)	Lee et al. 2003 (°)	Shaw and Cookson 2005 (°)	Wang et al 2020 (°)	N. Boothroyd
31,08117352	21,920482	31,08	41,71821494	31,6379266	17,2381455	12,27706354	81,0810811
34,63010235	27,0919166	25,91	49,1443634	35,0448983	21,1688441	13,67889043	108,108108
36,49155326	28,6724671	24,33	54,04489939	36,8318911	23,5493805	14,41416354	162,162162
37,40070474	29,7042308	23,3	56,45178781	37,7046766	24,7137227	14,77327837	216,216216
34,59460313	28,0203722	24,98	48,56968015	35,010819	20,9884697	13,66486824	162,162162
38,37474725	32,1867317	20,82	58,57444744	38,6397574	25,6801842	15,15802516	216,216216
38,78358566	35,7943315	17,21	58,36459683	39,0322422	27,1810708	15,31951634	324,324324
39,95827731	36,5500825	16,45	62,28003524	40,1599462	28,3842455	15,78351954	432,432432

Por último se presenta la siguiente (Figura 4.4), que al igual presenta ligeras variaciones, entre cada modelo calculado.

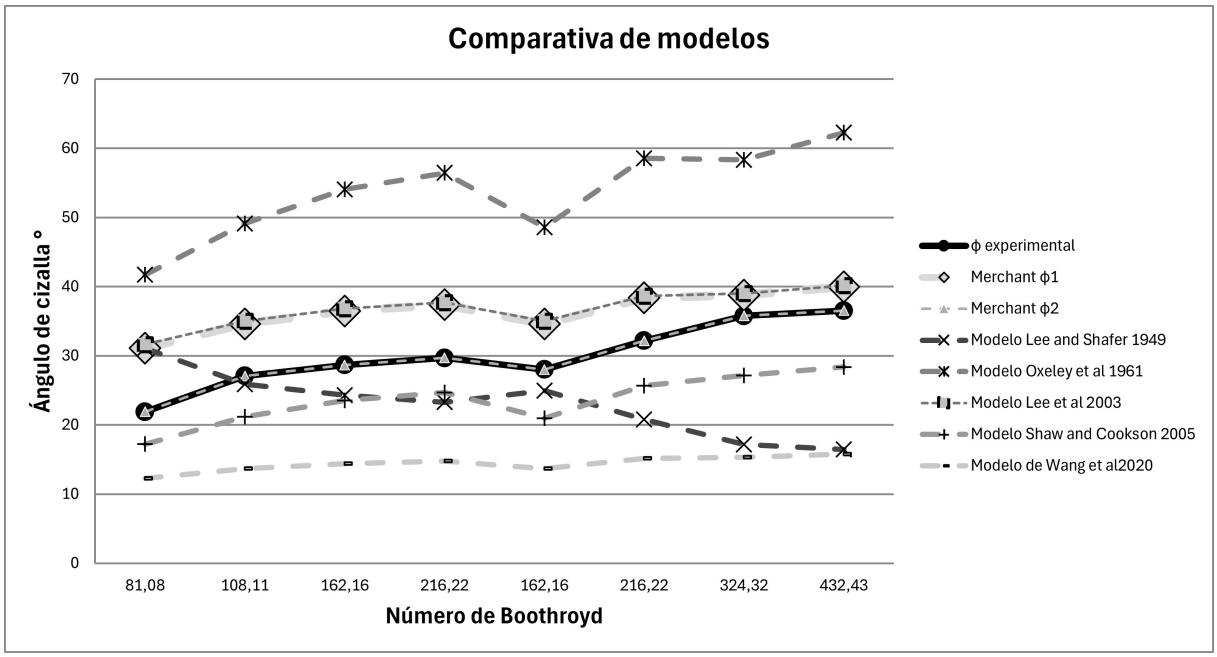


Fig. 4.4. Comparativa de modelos predictivos respecto al ángulo de cizalla Al 6082-T6

4.3.1 Análisis comparativo de pendientes ángulo de cizalla

Para graficar las líneas de tendencia se relacionó la similitud de la derivada y la pendiente:

$$\frac{dF}{dR_t} \approx \frac{\Delta F}{\Delta R_t} \tag{4.9}$$

Debido a que cuando R_t tenga cambios pequeños, la derivada de esta se puede asumir usando diferencias entre datos medidos, es decir, en una gráfica la pendiente existente entre 2 puntos medidos se puede aproximar a su derivada real.

Por ende el cálculo de pendiente es:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{4.10}$$

A continuación se presenta la (Tabla 4.11), donde se puede observar el cálculo de las pendientes para cada modelo, con la finalidad de poder graficar las líneas de tendencia y para posteriormente llegar a un análisis de error, para así determinar la eficiencia de cada modelo descrito anteriormente. Los siguientes resultados corresponde a la (Tabla 4.1).

Tabla 4.11. Cálculo de pendientes de modelos predictivos φ

deriv.expe	deriv.calc Merchant φ 1945	deriv.calc Merchan φ_2 1945	deriv.calc Merchan φ_3 1945	deriv.calc Lee and Shaffer 1949	deriv.calc Oxley et al 1961	deriv.calc Lee et al. 2003	deriv.calc Shaw and Cookson 2005	deriv.calc Wang et al 2020
0,4612	-0,1830	0,5265	0,2493	-0,3660	-0,6973	-0,3111	-0,1400	-0,0604
0,4830	0,4302	0,4356	0,2155	0,8604	0,8180	0,7313	0,3390	0,1421
0,3015	0,1948	0,3323	0,1671	0,3896	0,3391	0,3312	0,1692	0,0643
0,5064	0,4055	0,5071	0,2452	0,8109	0,7143	0,6893	1,0035	0,1339
0,4965	0,2488	0,4522	0,2041	0,4975	0,4574	0,4229	0,2745	0,0821
0,2681	0,1382	0,2705	0,1050	0,2763	0,2759	0,2349	0,1639	0,0456
0,1218	0,0247	0,1180	0,0395	0,0494	0,0767	0,0420	-0,3983	0,0082
-0,0702	0,0728	-0,0798	-0,0206	0,1456	0,2204	0,1238	0,0551	0,0240
0,6982	0,3923	0,6570	0,2406	0,7847	0,6042	0,6670	0,3106	0,1296
0,2690	0,2534	0,2965	0,1485	0,5069	0,5186	0,4308	0,2240	0,0837
0,5116	0,0147	-0,5865	-0,1406	0,0294	-0,1885	0,0250	0,0139	0,0049
0,4915	0,2080	-3,1111	0,2603	0,4160	0,3454	0,3536	0,2020	0,0687
0,6982	0,4687	0,9227	0,3942	0,9375	0,9603	0,7969	0,4966	0,1548
0,2690	0,2406	0,3794	0,1135	0,4811	0,5671	0,4090	0,2913	0,0794

Por ende se realizaron sus respectivas gráficas para su análisis, cabe mencionar que se hicieron 3 ilustraciones por motivo de visibilidad y mayor facilidad al análisis, donde en la (Figura 4.5) se compara los valores experimentales con el Modelo de Merchant 1945 y sus versiones representadas por φ enumerada de 1 al 3.

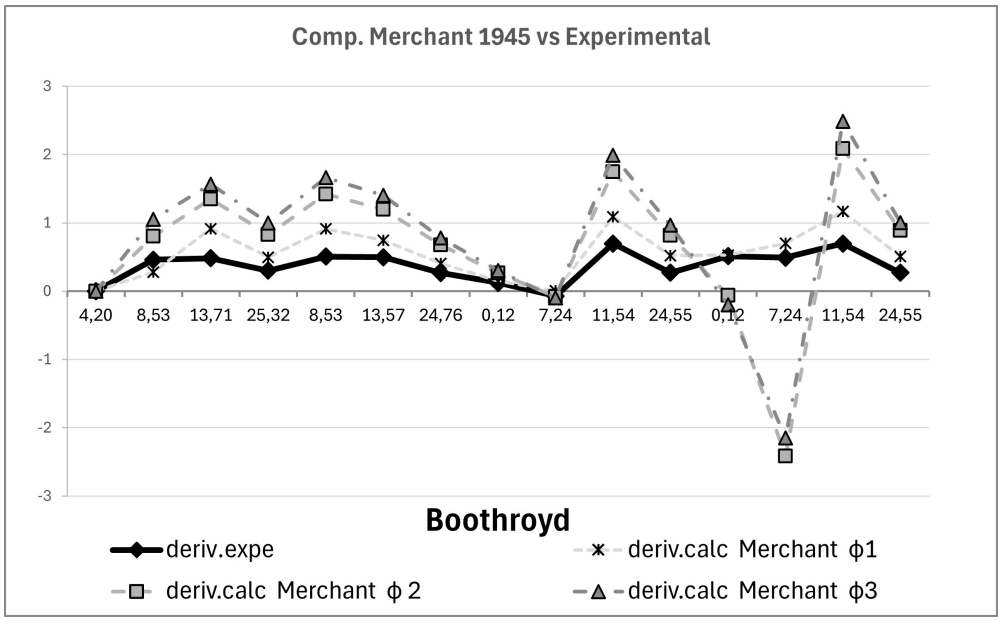


Fig. 4.5. Comparativa de Merchant vs Experimental

La (Figura 4.6) representa una comparativa entre la derivada experimental con los autores Lee and Shaffer 1949 y Oxley et al 1961.

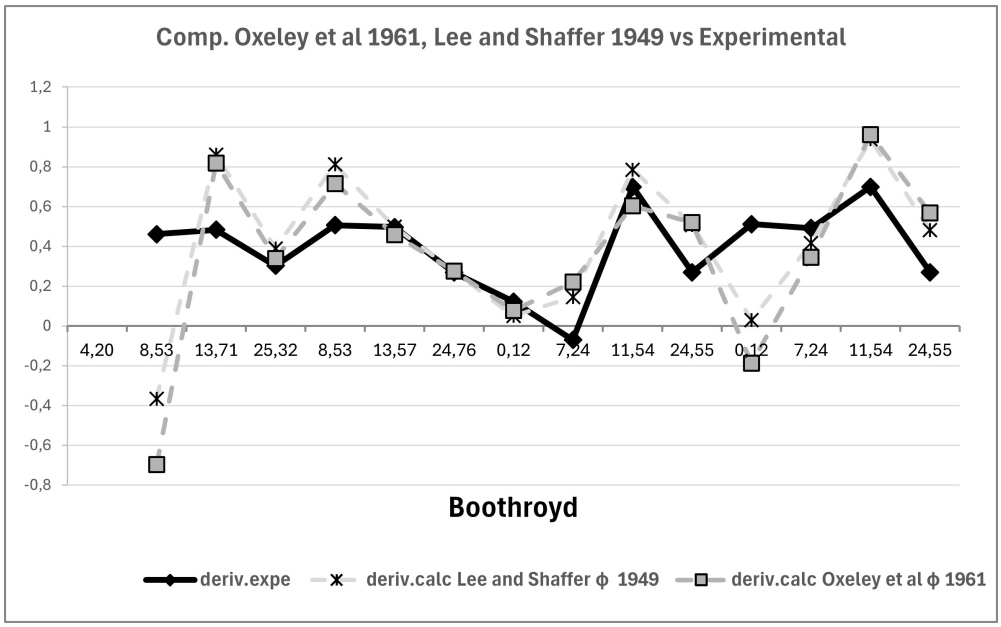


Fig. 4.6. Comparativa de modelos predictivos respecto al ángulo de cizalla

La (Figura 4.7) es una comparativa de lo experimental con Lee et al 2003, Shaw and Cookson 2005 y Wang et al 2020.

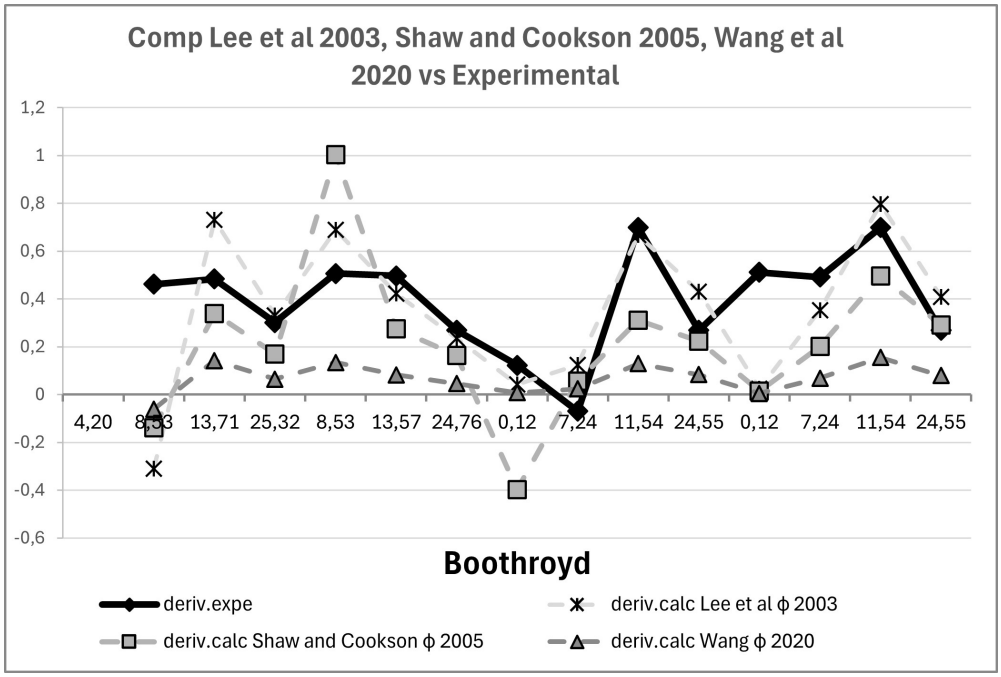


Fig. 4.7. Comparativa de modelos predictivos respecto al ángulo de cizalla

Para la (Tabla 4.8) los resultados obtenidos para la pendiente fueron los siguientes, ver (Tabla 4.12)

Tabla 4.12. Cálculo de pendientes de modelos predictivos

deriv.expe	deriv.calc Merchant φ 1945	deriv.calc Merchan φ_2 1945	deriv.calc Merchan φ_3 1945	deriv.calc Lee and Shaffer 1949	deriv.calc Oxley et al 1961	deriv.calc Lee et al. 2003	deriv.calc Shaw and Cookson 2005	deriv.calc Wang et al 2020
1,226667	0	1,029369	0,721566	0	-0,603425	0	0	0
3,362573	1,022243	3,480165	1,541134	2,044485	0,682421	1,635588	0,680471	0,368007
-7,973333	0,407175	-7,989127	0,159076	0,81435	4,952553	0,65148	0,275384	0,146583
1,836806	-0,159053	1,910252	-0,659107	-0,318106	-1,256752	-0,254484	-0,107572	-0,057259
-3,093567	-1,217238	-3,109954	-1,541834	-2,434475	-1,406073	-1,94758	-3,056722	-0,438206
0,613333	0,176115	0,142548	0,721626	0,35223	0,030912	0,281784	0,1137	0,063401
0,134503	0,474277	0,093794	-0,095869	0,94855	1,088873	0,758844	0,308301	0,17074
0,408889	0,93961	0,570454	3,034205	1,879219	2,070067	1,503376	0,618734	0,338259
-0,159722	0,384684	-0,055719	0,00424	0,769367	1,061833	0,615494	0,257236	0,138486
-1,244152	-0,347892	-1,20769	-0,108492	-0,695785	-0,167335	-0,556628	-1,356954	-0,125241
-0,613333	0,707748	-0,759855	-0,363317	1,415497	2,209044	1,132397	0,457561	0,254789
2,824561	0,731537	3,106363	1,45416	1,463074	-0,199565	1,170459	0,47963	0,263353
-0,613333	0,38471	-0,763033	2,469001	0,769419	1,51872	0,65535	0,255223	0,138495
0	0,548916	0	0,028104	1,097833	1,08372	0,878266	0,369487	0,19761
-1,580409	0,483293	-1,59569	-0,305358	0,966586	2,384784	0,773268	-0,833661	0,173985
0	1,259595	0	-0,003027	2,519191	3,315065	2,015353	0,767415	0,453454
-2,28655	0,999678	-2,278208	-1,128013	1,999357	4,612777	1,599485	0,620713	0,359884
-1,226667	0,646431	-1,150862	-0,514679	1,292862	2,64092	1,034289	0,407572	0,232715
0,239583	0,602632	0,256795	0,093828	1,205264	1,356721	0,964211	0,386135	0,216948

Dado la cantidad dispuesta de datos para observar el comportamiento de estas pendientes se lo dividió de igual manera en 3 gráficas, donde la (Figura 4.8) compara a Merchant y sus variantes con la derivada experimental.

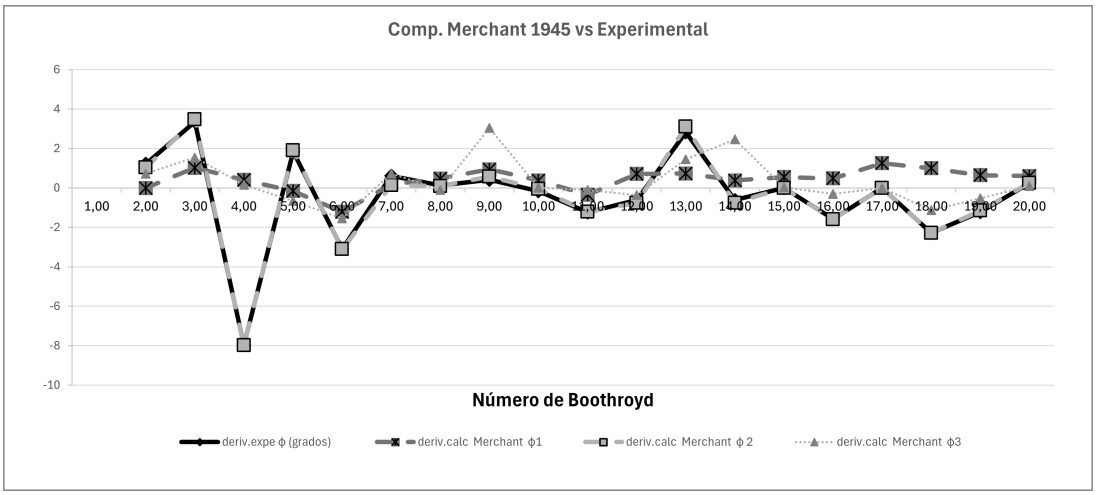


Fig. 4.8. Comparativa de Merchant vs Experimental

La (Figura 4.9) representa a la comparativa entre Lee and Shaffer, Oxeley et al con respecto al valor real de la pendiente.

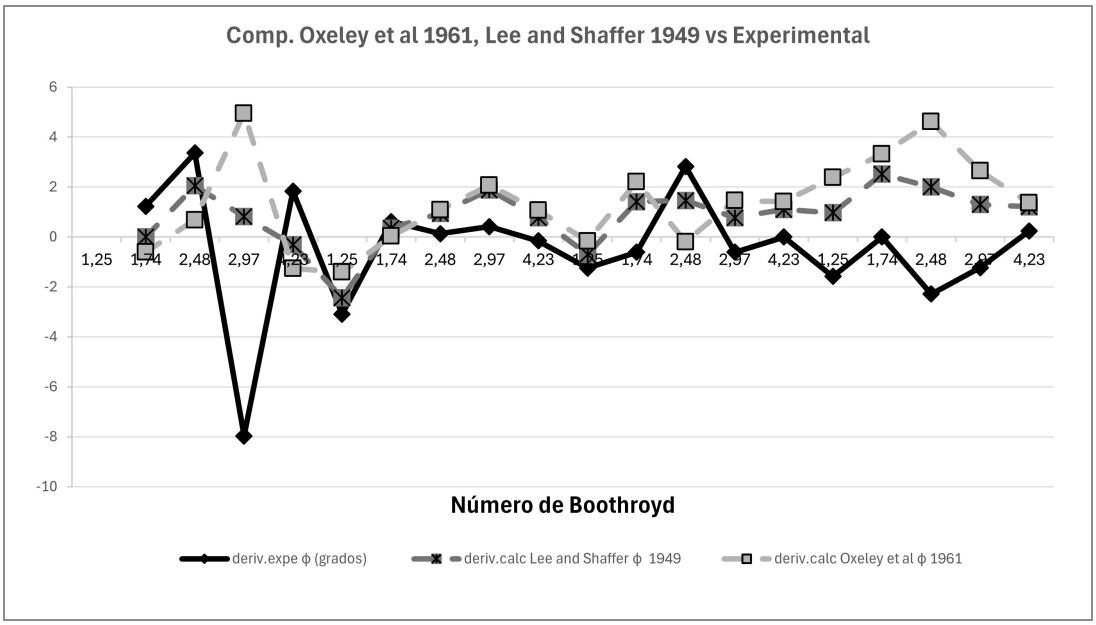


Fig. 4.9. Comparativa de Lee and Shaffer, Oxley et al vs Experimental

Y por último la (Figura 4.10) que es la comparación del valor real de la derivada entre Lee et al, Shaw and Cookson y Wang et al.

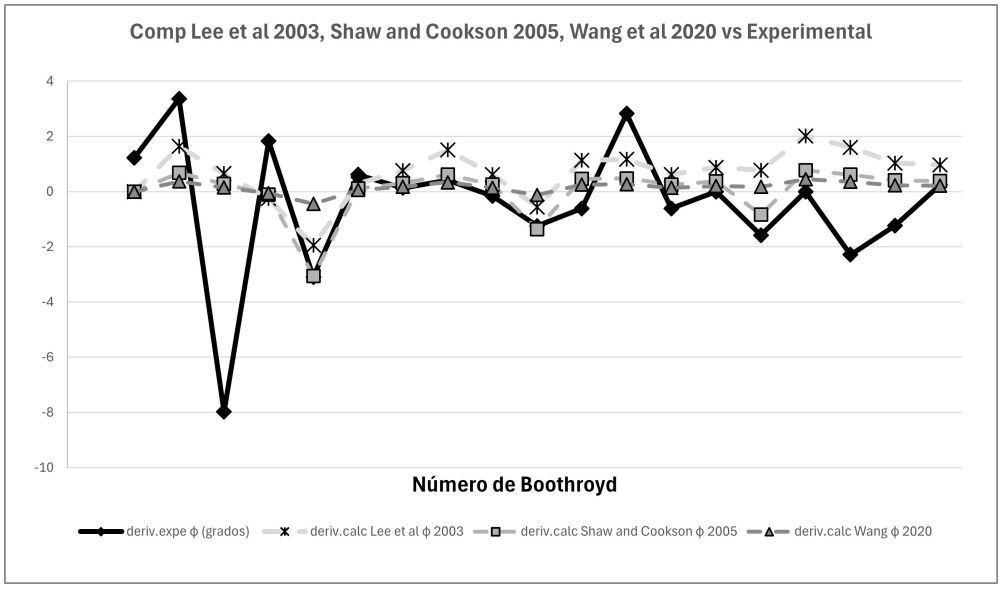


Fig. 4.10. Comparativa de Lee et al, Shaw and Cookson, Wang et al. vs Experimental

Para la (Tabla 4.9) se obtuvo los siguientes resultados, ver (Tabla 4.13)

Tabla 4.13. Cálculo de pendientes de modelos predictivos

deriv.expe	deriv.calc Merchant φ 1945	deriv.calc Merchan φ_2 1945	deriv.calc Lee and Shaffer 1949	deriv.calc Oxley et al 1961	deriv.calc Lee et al. 2003	deriv.calc Shaw and Cookson 2005	deriv.calc Wang et al 2020
0,28224	0,235692	0,286161351	0,4713	0,474705577	0,197981282	0,27531116	0,10252602
0	-0,0313163	0	-0,061256	-0,089743123	-0,026305705	-0,040187	-0,0136226
0,08064	-0,0160705	0,080386467	-0,03214	-0,094094262	-0,013499262	-0,0054194	-0,0069907
0,1296	0,0689778	0,129581879	0,1379	0,124156106	0,057941421	0,08788081	0,03000538
0,0288	0,00276861	0,028497573	0,0055	-0,008983847	0,002325635	0,00362367	0,00120435
0,0288	-0,0109773	0,028497573	-0,02189	-0,005043225	-0,009220919	-0,0113138	-0,0047751
0,06192	0,02585707	0,061814988	0,051714	0,047220065	0,021719935	0,03830803	0,01124782

Entonces para su comparación se presenta la siguiente (Figura 4.11) donde está dividida en 2, esto con la finalidad de obtener una mejor visualización.

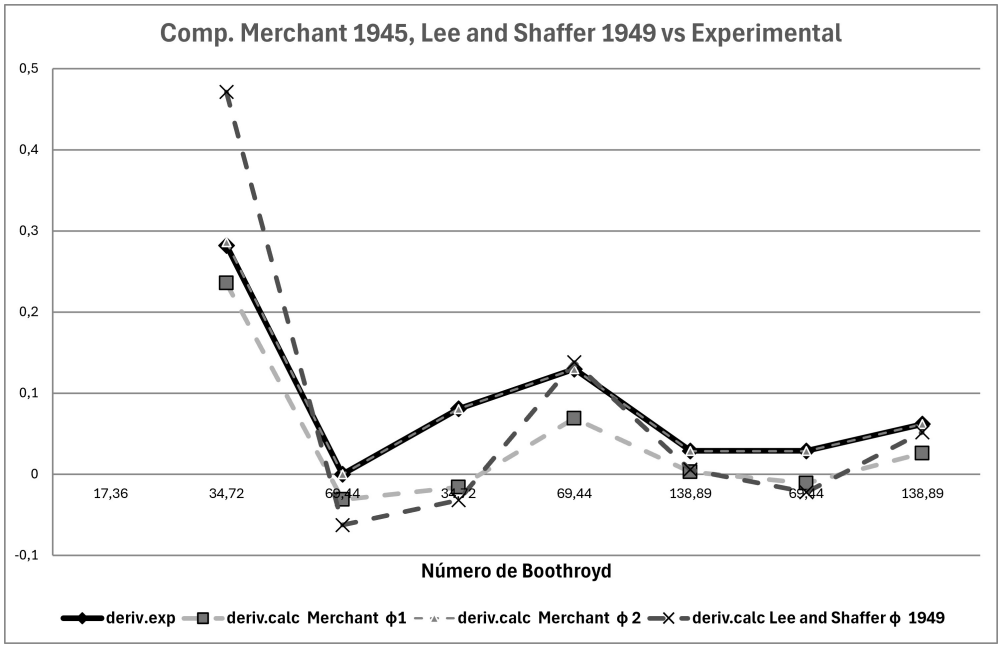


Fig. 4.11. Comparativa de Merchant, Lee and Shaffer vs Experimental

Para la (Figura 4.12) se presenta una comparativa entre Oxley et al, Lee et al, Shaw and Cookson y Wang et al respecto a la derivada experimental.

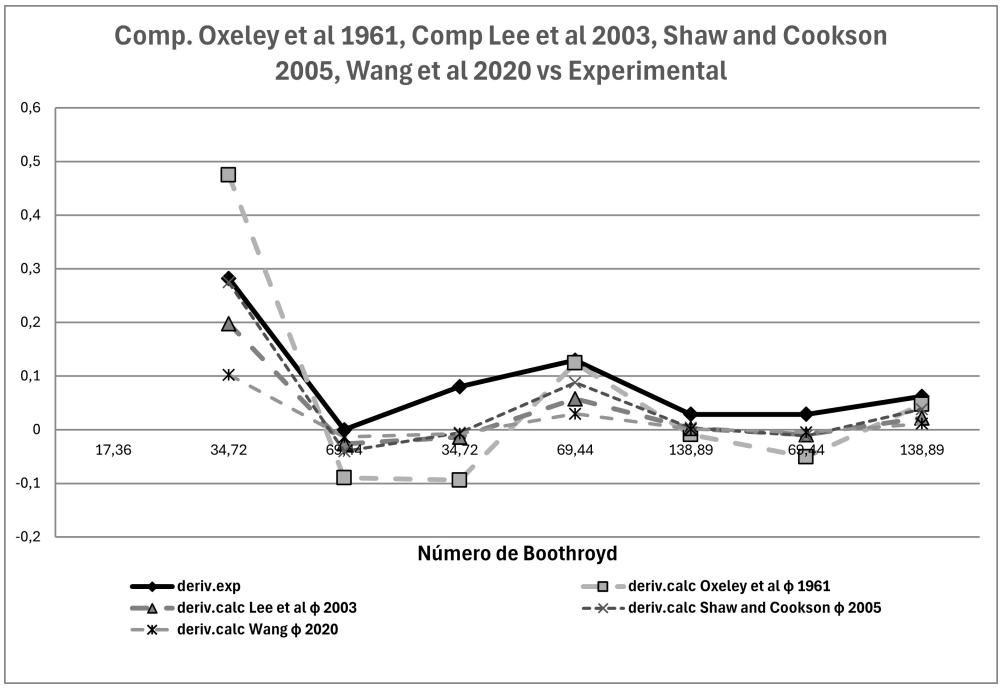


Fig. 4.12. Comparativa de Merchant, Lee and Shaffer vs Experimental

Para la (Tabla 4.10) los resultados obtenidos fueron los siguientes, ver (Tabla 4.14)

Tabla 4.14. Cálculo de pendientes de modelos predictivos

deriv.expe	deriv.calc Merchant φ 1945	deriv.calc Merchan φ_2 1945	deriv.calc Lee and Shaffer 1949	deriv.calc Oxley et al 1961	deriv.calc Lee et al. 2003	deriv.calc Shaw and Cookson 2005	deriv.calc Wang et al 2020
0,19129	0,13131037	0,191343081	0,2626	0,274767493	0,126057952	0,14543585	0,05186759
0,02923	0,03443684	0,029240185	0,068878	0,090659916	0,033059368	0,04403992	0,01360255
0,019055	0,0168193	0,019087628	0,0336	0,044527436	0,01614653	0,02154033	0,00664362
0,03108	0,05191288	0,031151384	0,103825	0,145818992	0,049836365	0,06891718	0,02050559
0,07696	0,06993267	0,07707765	0,139865	0,185088195	0,06713536	0,08679672	0,0276234
0,0333925	0,00378176	0,033370298	0,007563511	-0,001941118	0,003630485	0,0138832	0,00149379
0,00703	0,0108659	0,006990697	0,0217331	0,036217805	0,010431262	0,01112937	0,00429203

Para observar el comportamiento de los datos se realizaron 2 gráficas, donde la primera (Figura 4.13) es una comparativa entre Merchant, Lee and Shaffer respecto al valor de la pendiente experimental.

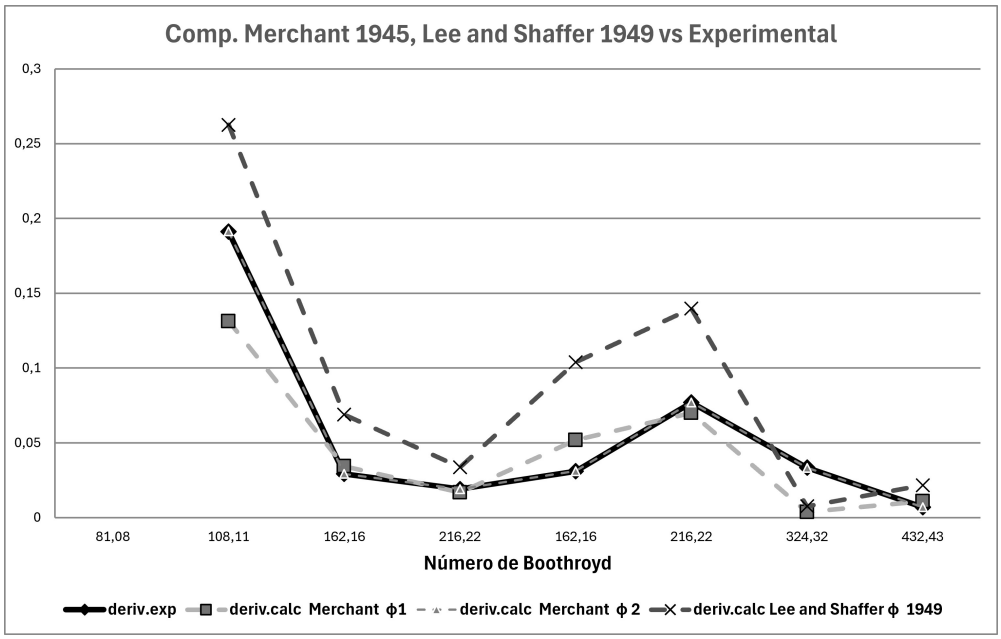


Fig. 4.13. Comparativa de Merchant, Lee and Shaffer vs Experimental

Y por último la (Figura 4.14) que es una comparativa de Oxeley et al, Lee et al, Shaw and Cookson y Wang et al

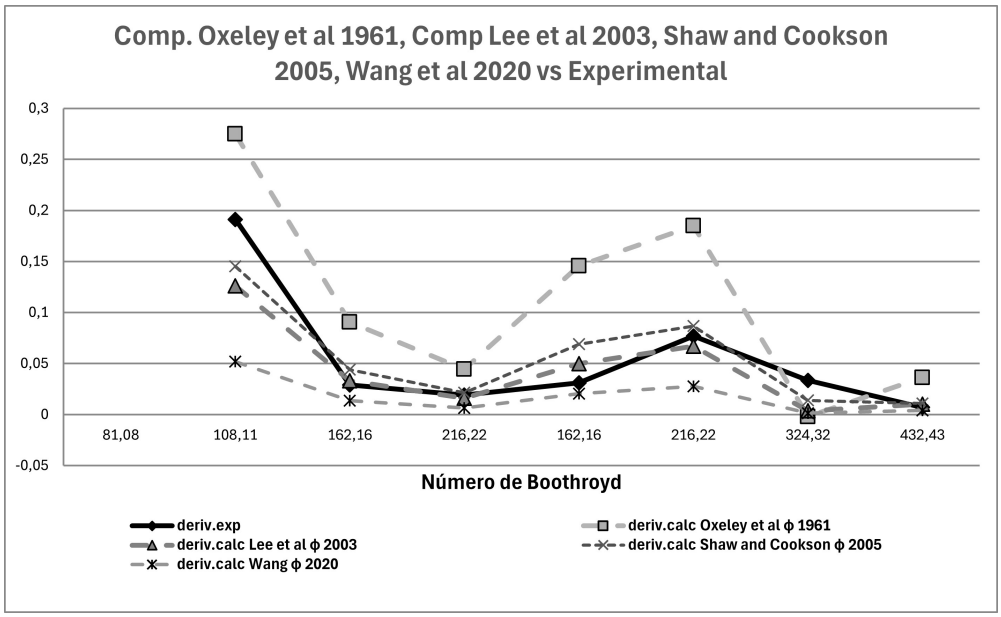


Fig. 4.14. Comparativa de Merchant, Lee and Shaffer vs Experimental

4.4 Error porcentual y promedio

Se usó el error porcentual como un evaluador de desempeño, ya que permite comparar la precisión de los modelos predictivos, facilitando el análisis entre los resultados obtenidos. A diferencia de otros métodos, el error porcentual proporciona una medida normalizada, es decir valores ajustados a la referencia lo cual, permite interpretar de manera más sencilla la desviación de lo calculado con respecto a los valores teóricos.

Para esa parte se utilizo la formula de error porcentual

$$\text{Error Porcentual} = \left| \frac{V_{real} - V_{calculado}}{V_{real}} \right| \times 100\,\% \tag{4.11}$$

4.4.1 Porcentaje de error Acero NE 9445

Como resultado final se obtuvo un promedio de manera general para cada uno de los modelos y así determinar su eficiencia. Resultados obtenidos:

Tabla 4.15. Porcentaje de error por modelo, respecto al valor del ángulo experimental- Acero NE 9445 (Figura 4.1)

Experimental Ángulo φ°	**Merch. φ 1945(%)**	**Merch. φ_2 1945(%)**	**Merch. φ_3 1945(%)**	**Lee and Shaffer 1949(%)**	**Oxley et al 1961 (%)**	**Lee et al. 2003 (%)**	**Shaw 2005 (%)**	**Wang 2020 (%)**
17	57,66	1,54	49,59	49,40	94,98	17,28	33,72	47,94
19	36,88	0,11	49,21	63,08	58,54	33,09	16,45	54,80
21,5	31,32	1,04	49,92	46,66	59,79	23,26	11,07	56,64
25	21,99	0,54	49,17	36,03	53,17	18,63	3,37	59,72
16,5	43,58	0,75	47,93	85,57	59,41	46,83	45,46	52,59
19	31,28	0,53	49,38	74,28	50,56	42,61	45,36	56,65
22	20,41	0,33	50,94	63,73	44,06	38,49	44,47	60,24
19	36,21	0,11	48,31	64,42	56,86	34,23	15,94	55,02
18,5	42,70	0,25	47,76	57,85	69,58	27,69	21,20	52,88
21,5	30,63	1,04	50,24	48,05	57,99	24,45	10,49	56,87
25	25,53	0,54	49,48	28,94	62,87	12,60	6,68	58,55
12,5	148,18	215,71	28,52	36,37	262,58	69,91	110,64	18,05
16	103,15	8,19	12,00	25,05	198,63	48,48	73,56	32,92
19	81,67	11,98	3,23	26,51	173,20	43,06	57,38	40,01
22,5	67,33	16,50	6,27	34,66	163,50	44,46	49,75	44,75
Promedio	**51,90**	**17,28**	**39,46**	**49,37**	**97,71**	**35,00**	**36,37**	**49,84**

4.4.1.1 Análisis Acero NE 9445

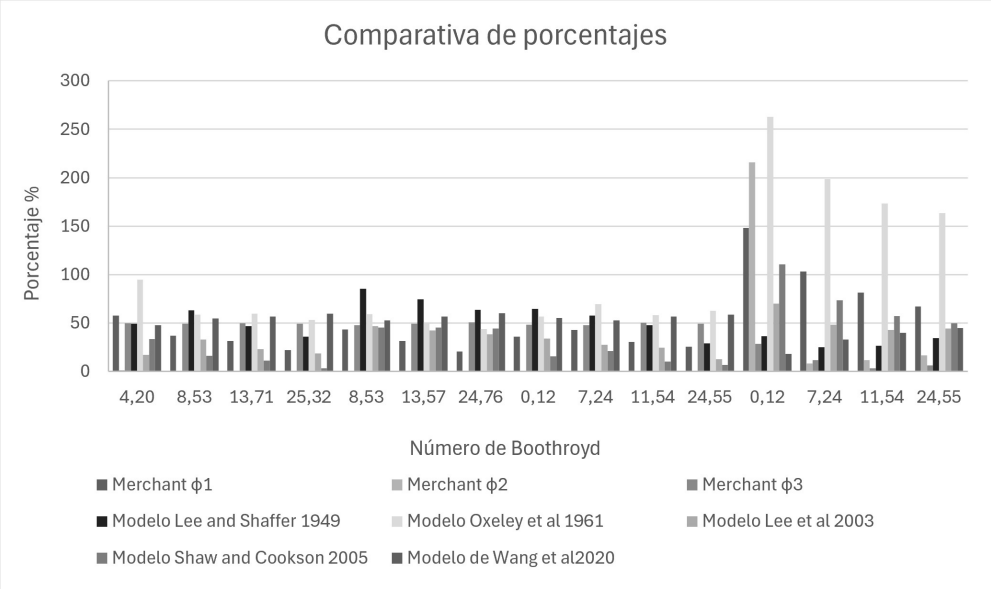


Fig. 4.15. Comparación del error porcentual obtenido por los diferentes modelos matemáticos en la estimación del ángulo de cizalladura para el acero NE 9445, permitiendo identificar el nivel de precisión de cada modelo respecto a los valores experimentales.

La (Figura 4.15) presenta el análisis comparativo del porcentaje de error de modelos predictivos frente al ángulo experimental para el Acero NE 9445. Los resultados indicaron que el modelo de Merchant φ_2 ofrece la mayor precisión con el menor error promedio (17.28 %), mostrando una estabilidad en la mayoría de las mediciones. Por el contrario, el modelo de Oxley et al. (1961) mostró la menor confiabilidad al alcanzar el error promedio de (97.71 %), lo que evidencia sus limitaciones predictivas para este material específico.

4.4.2 Porcentaje de error Acero SAE 4130

Tabla 4.16. Porcentaje de error por modelo, respecto al valor del ángulo experimental - Acero SAE 4130 (Figura 4.2)

Experimental Ángulo φ°	Merchant φ_1 (%)	Merchant φ_2 (%)	Merchant φ_3 (%)	Modelo Lee and Shafer 1949 (%)	Modelo Oxley et al 1961 (%)	Modelo Lee et al. 2003 (%)	Modelo Shaw and Cookson 2005 (%)	Modelo de Wang et al 2020 (%)
20,9	42,13	0,10	50,06	31,06	85,91	8,96	64,84	48,83
21,5	38,16	0,35	49,81	32,98	79,35	11,50	60,24	50,26
24,0	26,93	0,05	50,26	33,63	62,78	15,65	45,66	54,30
20,1	52,55	0,02	40,23	18,77	106,42	2,30	74,59	45,08
22,4	36,00	0,43	50,05	28,89	78,20	9,63	56,06	51,04
31,6	7,86	0,46	50,08	26,68	39,55	17,61	39,35	61,17
31,9	7,12	0,27	49,44	26,83	38,28	17,95	38,26	61,44
32,0	7,88	0,36	49,83	24,86	40,38	16,45	38,54	61,16
32,2	8,64	0,11	45,53	22,47	42,65	14,68	38,62	60,89
32,0	10,83	0,30	45,17	18,97	47,70	11,74	40,49	60,10
35,7	2,24	0,04	49,95	21,58	33,79	16,25	37,24	63,19
35,4	4,08	0,24	50,03	18,95	37,97	13,97	39,03	62,53
37,5	0,30	0,33	49,94	20,59	29,85	16,47	32,20	64,11
37,2	1,01	0,14	46,29	18,94	32,81	14,99	33,60	63,64
37,2	2,86	0,14	46,18	15,25	37,55	12,03	34,84	62,97
41,9	12,11	0,23	50,07	31,61	5,19	27,39	25,63	68,36
41,9	10,64	0,23	50,07	28,67	9,06	25,04	26,53	67,83
40,2	5,01	0,25	50,04	21,96	22,21	18,91	33,03	65,80
39,6	2,77	0,35	49,92	19,18	27,32	16,40	35,55	64,99
39,9	1,61	0,40	50,00	16,00	30,62	14,01	35,74	64,58
PROMEDIO	**14,04**	**0,24**	**48,65**	**23,89**	**44,38**	**15,10**	**41,51**	**60,11**

4.4.2.1 Análisis Acero Acero SAE 4130

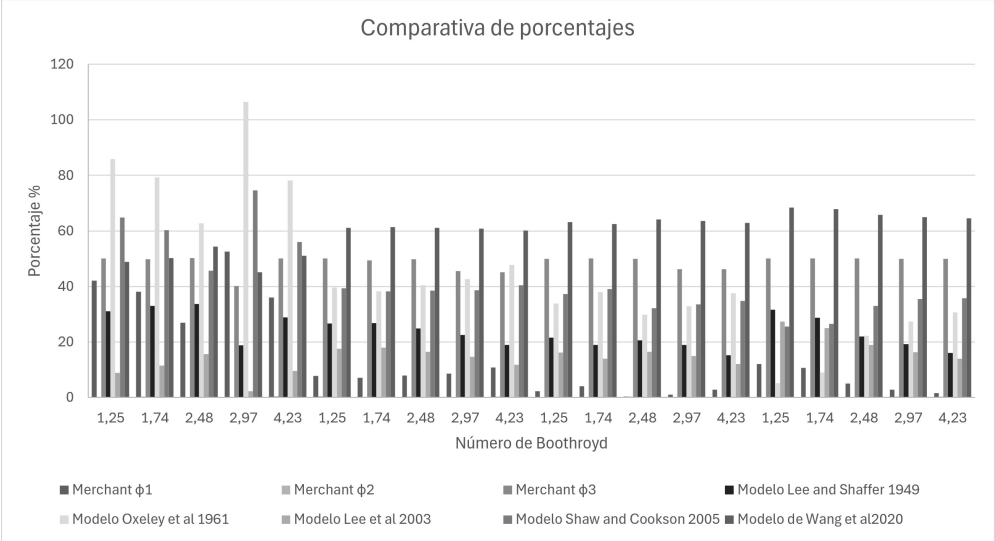


Fig. 4.16. Error porcentual de los modelos matemáticos empleados para estimar el ángulo de cizalladura del acero SAE 4130, mostrando la diferencia entre las predicciones

La (Figura 4.16) indica la comparación del porcentaje de error de modelos predictivos respecto al ángulo experimental para el Acero SAE 4130. El modelo de Merchant φ_2 indicó un error promedio casi nulo de apenas 0.24 % con una consistencia en todas las pruebas. Por el contrario, el modelo de Wang (2020) registró el menor desempeño al promediar un error del 60.11 %, lo que evidencia su baja capacidad predictiva para las condiciones y el material evaluado.

4.4.3 Porcentaje de error AISI 1045

Tabla 4.17. Porcentaje de error por modelo para el segundo conjunto de datos AISI 1045 (Figura 4.3)

Experimental Ángulo $\varphi°$	Merchant φ_1 (%)	Merchant φ_2 (%)	Modelo Lee and Shafer 1949 (%)	Modelo Oxley et al 1961 (%)	Modelo Lee et al. 2003 (%)	Modelo Shaw and Cookson 2005 (%)	Modelo de Wang et al 2020 (%)
16,9	24,62	0,24	36,69	9,54	38,41	46,72	45,79
21,8	15,38	0,13	16,51	22,72	23,06	36,77	49,81
21,8	10,39	0,13	16,51	8,43	18,87	43,17	51,98
19,0	29,60	0,19	10,53	41,60	38,86	33,80	43,63
23,5	14,97	0,15	29,79	32,83	20,83	33,50	49,99
25,5	6,71	0,06	43,14	19,97	11,99	37,72	53,58
23,5	19,03	0,15	29,79	45,08	24,24	29,08	48,22
27,8	7,08	0,10	56,12	34,44	10,45	30,48	53,42
PROMEDIO	**15,97**	**0,14**	**29,88**	**26,83**	**23,34**	**36,41**	**49,55**

4.4.3.1 Análisis Acero AISI 1045

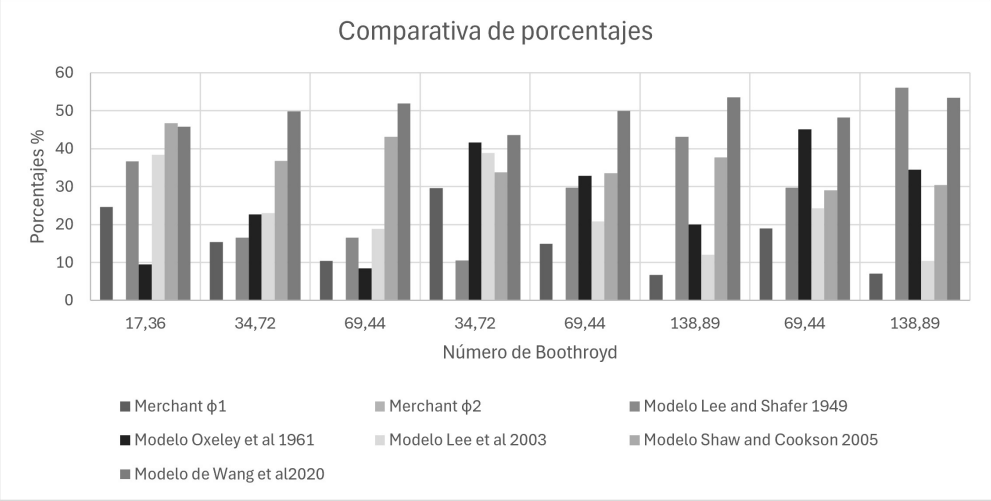


Fig. 4.17. Comparación del error porcentual asociado a cada modelo predictivo para el acero AISI 1045.

La (Figura 4.17) detalla el porcentaje de error de los modelos predictivos para el conjunto de datos del acero AISI 1045. El modelo de Merchant φ_2 tiene una precisión con un error promedio de apenas 0.14 %. Por otro lado, el modelo de Wang et al. (2020) indicó la menor efectividad predictiva, promediando el error más elevado con un 49.55 %.

4.4.4 Porcentaje de error AL 6082-T6

Tabla 4.18. Porcentaje de error por modelo para el tercer conjunto de datos- AL 6082-T6 (Figura 4.4)

Experimental Ángulo $\varphi°$	Merchant φ_1 (%)	Merchant φ_2 (%)	Modelo Lee and Shafer 1949 (%)	Modelo Oxley et al 1961 (%)	Modelo Lee et al. 2003 (%)	Modelo Shaw and Cookson 2005 (%)	Modelo de Wang et al 2020 (%)
21,92	41,79	0,00	41,79	90,32	44,33	21,36	43,99
27,09	27,83	0,01	4,36	81,41	29,36	21,86	49,51
28,67	27,28	0,01	15,14	88,51	28,47	17,86	49,72
29,70	25,93	0,01	21,55	90,07	26,95	16,79	50,26
28,02	23,46	0,00	10,85	73,34	24,95	25,09	51,23
32,18	19,25	0,02	35,30	82,01	20,07	20,20	52,90
35,79	8,36	0,01	51,91	63,08	9,06	24,05	57,20
36,55	9,32	0,00	54,99	70,40	9,88	22,34	56,82
PROMEDIO	**22,91**	**0,01**	**29,49**	**79,89**	**24,13**	**21,19**	**51,45**

4.4.4.1 Análisis AL 6082-T6

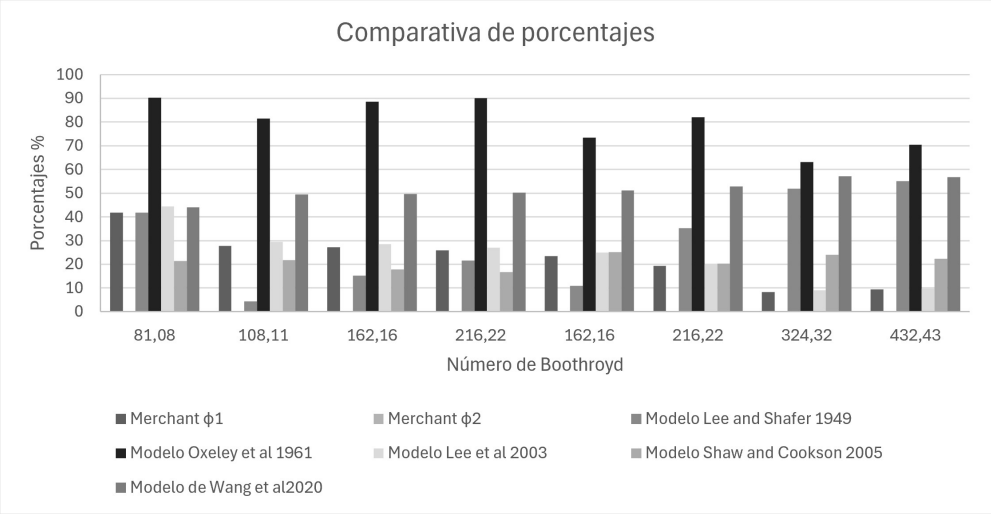


Fig. 4.18. Error porcentual de los diferentes modelos matemáticos en la predicción del ángulo de cizalladura para el aluminio 6082-T6, permitiendo comparar la precisión alcanzada por cada uno de ellos.

La (Figura 4.18) indica la comparación del porcentaje de error de los modelos predictivos correspondiente al aluminio AL 6082-T6. El comportamiento con menos error es el modelo de Merchant φ_2, el cual alcanzó una precisión con un error promedio insignificante de 0.01 %. Por otra parte, el modelo de Oxley et al. (1961) demuestra la menor capacidad de ajuste para este material, registrando la desviación con un error promedio del 79.89 %.

4.5 Cálculo de fuerzas en el proceso de corte

Para calcular las fuerzas internas se usaron relaciones geométricas por medio del Círculo de Merchant, ver (Figura 2.11) para determinar F_s (Fuerza cortante), F_n (Fuerza normal al plano de cizalla) y F (Fuerza de fricción)-*Herramienta-viruta*.

$$F = F_c \,\text{sen}(\alpha) + F_t \cos(\alpha) \tag{2.4}$$

$$F_s = F_c \cos(\varphi) - F_t \,\text{sen}(\varphi) \tag{2.6}$$

$$F_n = F_c \,\text{sen}(\varphi) + F_t \cos(\varphi) \tag{2.7}$$

4.5.1 Obtención de Fc y Ft

Estas fuerzas de corte se obtuvieron a través de componentes de fuerza que se establecen en el plano de cizalla (F_n y F_s), es decir se usaron fórmulas dependientes del ángulo de cizalla φ con la finalidad de incorporar el valor previemante calculado [34].

$$F_c = F_s \cos(\varphi) + F_n \,\text{sen}(\varphi) \tag{4.12}$$

$$F_t = F_s \,\text{sen}(\varphi) - F_n \cos(\varphi) \tag{4.13}$$

4.5.2 Análisis de Fuerzas

De acuerdo a los autores Li, Wang, Hu y Li con el modelo de cizallamiento desigual (unequal division shear-zone model) hace referencia o se fundamenta al modelo Clásico de corte ortogonal propuesto por Merchant 1945, para los cálculos de se denominó Modelo 1 [53].

$$F_c = \frac{S_s \cdot t_1 \cdot w \cdot \cos(\beta - \alpha)}{\sin\varphi \cdot \cos(\varphi + \beta - \alpha)} \tag{4.14}$$

$$F_t = \frac{S_s \cdot t_1 \cdot w \cdot \text{sen}(\beta - \alpha)}{\sin\varphi \cdot \cos(\varphi + \beta - \alpha)} \tag{4.15}$$

$t_1 =$ Espesor sin deformar o avance.

$w =$ Ancho de corte.

$\alpha =$ Ángulo de ataque.

$\beta =$ Ángulo de Fricción.

$S_s =$ Esfuerzo cortante o resistencia al cizallamiento.

4.5.3 Johnson Cook + Oxley

Aquí primero se calcula el esfuerzo cortante τ_s mediante Johson Cook que permite considerar el efecto de la deformación plástica, la velocidad de deformación y la temperatura sobre el comportamiento del material durante el proceso de corte. A diferencia de Merchant este calcula el esfuerzo del flujo del material y posteriormente se su esfuerzo cortante equivalente [33].

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \tag{4.16}$$

Este modelo incorpora el comportamiento termomecánico del material, es una formulación específica del artículo 2023 derivada del Equal Shear Zone Model, para los cálculos se lo denominó Modelo 2 [54].

$$F_c = A_s \tau_s \frac{\cos(\beta - \alpha)}{\cos(\varphi + \beta - \alpha)} \tag{4.17}$$

$$F_t = A_s \tau_s \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\cos(\varphi + \beta - \alpha)} \tag{4.18}$$

$\sigma_n =$ Esfuerzo normal o equivalente.

$A_s =$ Área de cizalla.

$\alpha =$ Ángulo de ataque.

$\varphi =$ Ángulo de cizalla.

$\beta =$ Ángulo de Fricción.

4.6 Basado en el trabajo

A continuación se presenta un modelo simple que relaciona a la fuerza de corte como proporcional a la sección de viruta eliminada, para esto se llegó por investigadores clásicos de la teoría del corte como F.W. Taylor, Merchant y Oxley, donde K_c y W_t son exactamente la misma magnitud física, es decir ambas representan la resistencia del material en el plano de corte, para los cálculos se lo denominó Modelo 3 [55].

$$F_c = W_t \cdot w \cdot t_1 \tag{4.19}$$

$$F_t = F_c \cdot \tan(\beta - \alpha) \tag{4.20}$$

Donde:

$W_t =$ Trabajo específico de corte.

$w =$ Ancho de corte.

$t_1 =$ Espesor sin deformar o avance.

$\alpha =$ Ángulo de ataque.

$\beta =$ Ángulo de Fricción.

4.7 Resultados de fuerzas de corte Fc y empuje Ft

A partir de estos modelos se obtuvieron las siguientes tablas, cabe mencionar que se utilizaron únicamente modelos que permitieron un cálculo adecuado con datos disponibles, por eso, no todos fueron incluidos en algunas tablas de resultados. Además para una mayor apreciación se dividió los gráficos en 2 tipos en fuerza de corte Fc y fuerza de avance Ft.

La (Tabla 4.19) muestra resultados obtenidos de la fuente: Teoría de Corte de metales [25] de la (Tabla 4.1) del material Acero NE 9445.

Tabla 4.19. Comparativa de fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) según diferentes modelos teóricos y experimentales

Fc Mod1	Ft Mod1	Fc Mod2	Ft Mod2	Fc Mod3	Ft Mod3	Boothroyd
1615,02529	1190,57669	1035,521939	1032,77548	1646,2502	1213,59531	4,19642857
1609,83507	1257,02996	1037,39075	1103,64952	1605,0641	1253,30458	8,5327381
1471,00568	974,789756	950,3817941	934,282364	1465,3895	971,06809	13,7083333
1347,28195	747,040299	873,2058232	807,844099	1350,1878	748,651534	25,3184524
1850,10998	1702,41047	1042,237816	1215,55132	1852,1807	1704,31588	8,5327381
1696,20773	1429,03453	993,7205504	1115,10961	1707,7309	1438,74266	13,5684524
1601,62005	1207,8534	932,9362131	1001,82185	1584,7695	1195,14564	24,7589286
20,1001144	15,8397946	10,36559509	11,0982285	20,3581	16,0430988	0,12276786
1064,80968	808,310642	631,9837583	655,486773	1069,62575	811,966585	7,24330357
1491,22221	999,449835	954,22366	944,76491	1494,0407	1001,33885	11,5401786
2678,79293	1378,77198	1840,531052	1636,40503	2688,59	1383,81453	24,5535714
24,1809277	12,8324606	8,069939831	5,92773768	29,0703	15,4271781	0,12276786
1080,48098	503,653365	522,4397619	378,099095	1304,5313	608,091756	7,24330357
1447,46284	554,578646	820,576608	564,419407	1785,9248	684,25643	11,5401786
2502,70365	656,685472	1566,69191	979,340013	3100,07	813,428682	24,5535714

A continuación se observa el comportamiento, ver (Figura 4.19) de los modelos que van desde 1945 con Merchant.

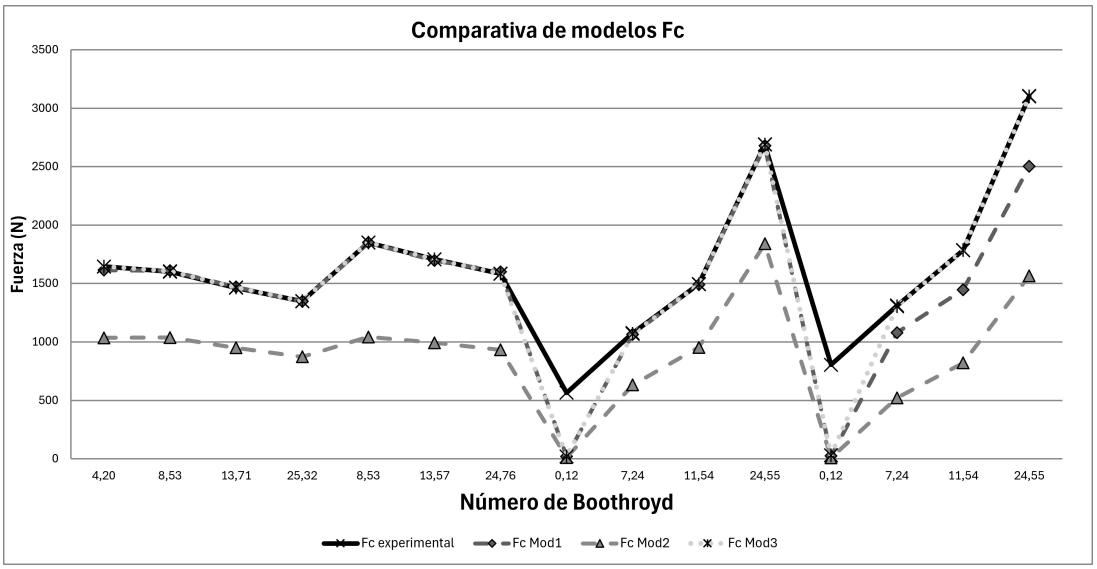


Fig. 4.19. Comparativa de Modelo 1, Modelo 3 y Modelo 3 vs Experimental

En la (Figura 4.20) se observa el comportamiento que tiene la fuerza de empuje en cada modelo empleado.

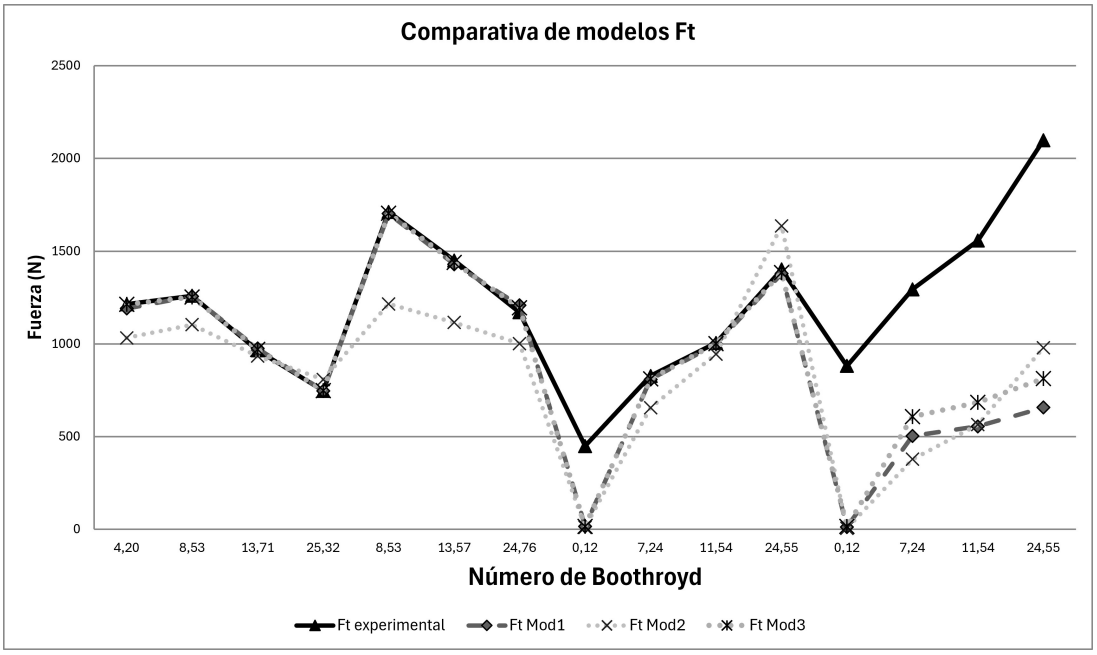


Fig. 4.20. Comparativa de Modelo 1, Modelo 3 y Modelo 3 vs Experimental

La (Tabla 4.20) pertenece a la misma fuente: Teoría de Corte de metales [25] de la (Tabla 4.2) que pertenece al material Acero SAE 4130.

Tabla 4.20. Comparativa de fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) para el segundo conjunto de datos de fuerzas

Fc Mod1	Ft Mod1	Fc Mod2	Ft Mod2	Fc Mod3	Ft Mod3	Boothroyd
1713,692	1013,1326	1305,416368	1186,673799	1708,3264	1009,960488	1,2521739
2116,028	1250,9935	1854,89739	1700,130243	2123,6468	1255,497403	1,7413043
2863,446	1591,9085	2508,842488	2294,623582	2861,3354	1590,735002	2,4847826
3234,645	1768,9483	3229,051981	2768,031997	3233,3136	1768,220395	2,973913
4417,169	2455,6873	4444,471397	3978,085703	4432,6656	2464,302619	4,226087
1132,929	453,86376	1121,054342	969,328901	1143,0144	457,9040719	1,2521739
1345,595	534,3701	1578,483359	1366,314208	1366,5861	542,7062898	1,7413043
1932,895	740,19152	2225,246231	1901,861321	1928,5585	738,5307151	2,4847826
2255,527	822,50014	2623,889669	2207,86907	2256,6984	822,9271628	2,973913
2989,619	1033,5831	3692,214307	3039,098041	3008,2536	1040,025562	4,226087
1038,783	317,63346	1039,487136	864,7032252	1041,568	318,4849129	1,2521739
1321,655	386,7278	1438,605088	1176,483497	1321,3563	386,6402851	1,7413043
1833,801	498,99469	2018,99811	1664,94744	1833,2831	498,853761	2,4847826
2094,082	555,07244	2405,404273	1962,167731	2116,9192	561,1257555	2,973913
2812,48	673,71877	3347,353492	2662,501068	2830,5288	678,0423463	4,226087
1036,002	303,84497	1070,635625	948,7211413	1041,568	305,4775406	1,2521739
1266,696	342,10042	1457,452702	1266,30924	1269,6651	342,9022533	1,7413043
1724,866	418,14935	1995,779336	1657,734953	1716,4939	416,1197333	2,4847826
1967,034	453,93102	2373,095737	1934,630081	1966,1048	453,7164923	2,973913
2591,239	526,50682	3272,810066	2609,502482	2595,3048	527,3328478	4,226087

La (Figura 4.21) muestra el comportamiento de la fuerza de corte del material Acero SAE 4130.

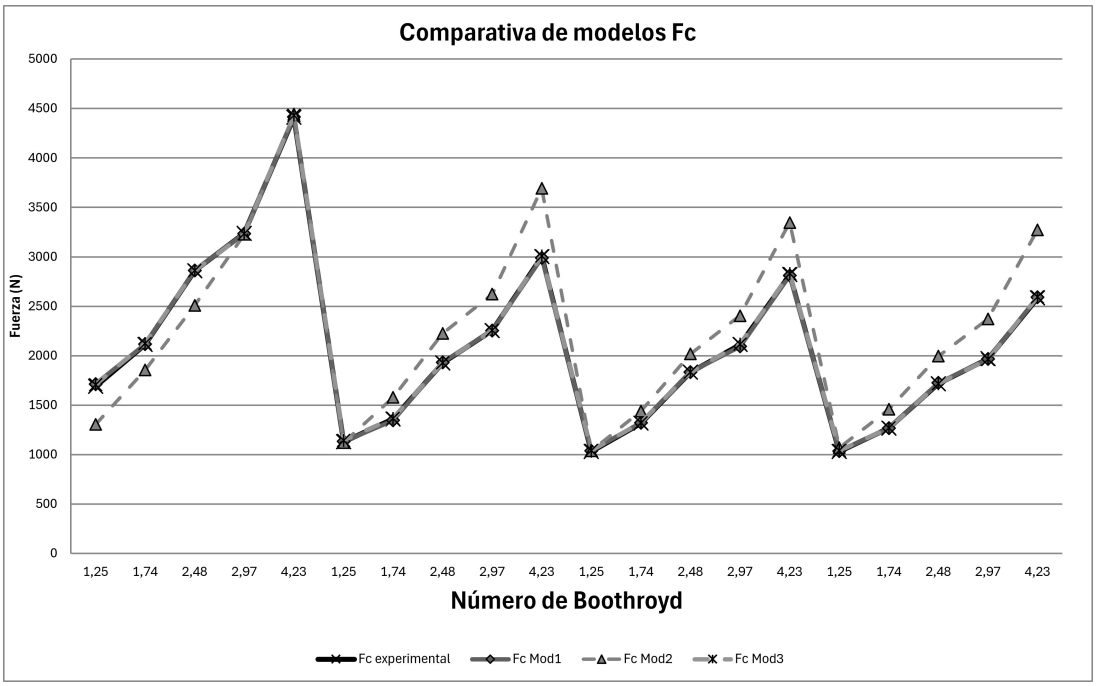


Fig. 4.21. Comparativa de Merchant, Oxley, Bsada en trabajo vs Experimenta

La (Figura 4.22) representa a la fuerza de empuje del mismo material.

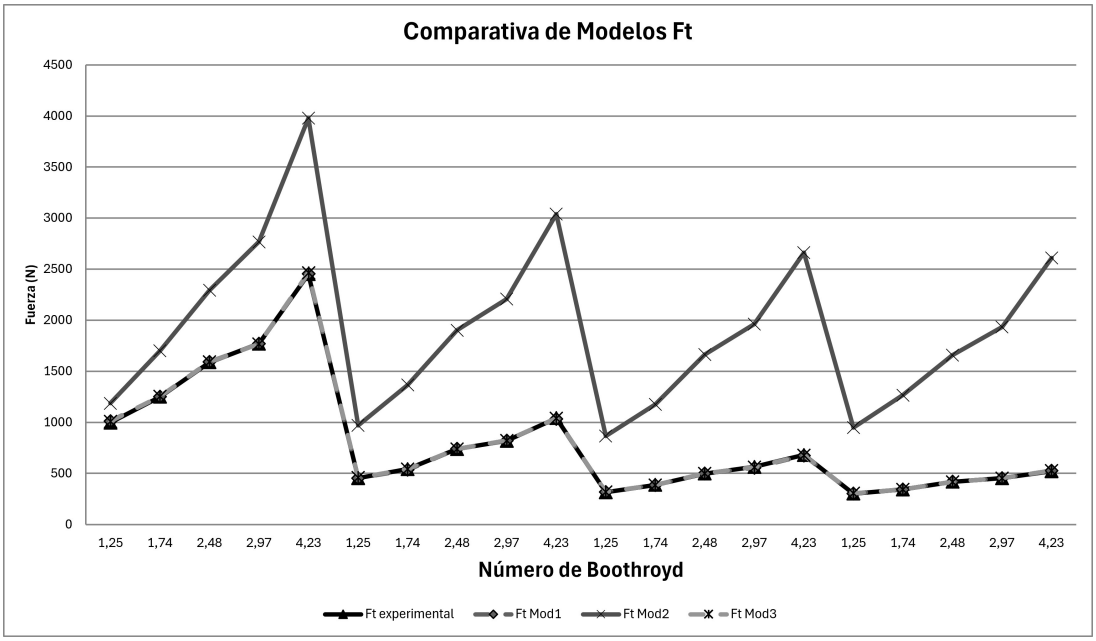


Fig. 4.22. Comparativa de Merchant, Oxley, Basada en trabajo vs Experimental

La (Tabla 4.21) tiene los resultados de la fuente:A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining [44] que pertenece a la (Tabla 4.3) del material AISI 1045

Tabla 4.21. Comparativa de fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) según los modelos predictivos.

Modelo 1 F_c **(N)**	**Modelo 1** F_t **(N)**	**Modelo 2** F_c **(N)**	**Modelo 2** F_t **(N)**	**Boothroyd**
609,6888418	682,5836006	1508,48594	1688,84141	17,36111111
397,9458012	311,173808	1094,12177	855,5558363	34,72222222
475,5285311	409,7978155	1176,75262	1014,094052	69,44444444
889,2859581	756,1662097	2426,91585	2063,623906	34,72222222
808,1403291	559,2311446	1976,7382	1367,898036	69,44444444
807,5914169	549,8452119	1996,91819	1359,593335	138,8888889
1468,473935	950,856253	3981,13323	2577,836308	69,44444444
1304,797361	715,821368	3538,00143	1940,973443	138,8888889

La (Figura 4.23) muestra la comparativa de los resultados de los modelos de fuerza de corte empleados desde 1945 hasta 2005, del material AISI 1045.

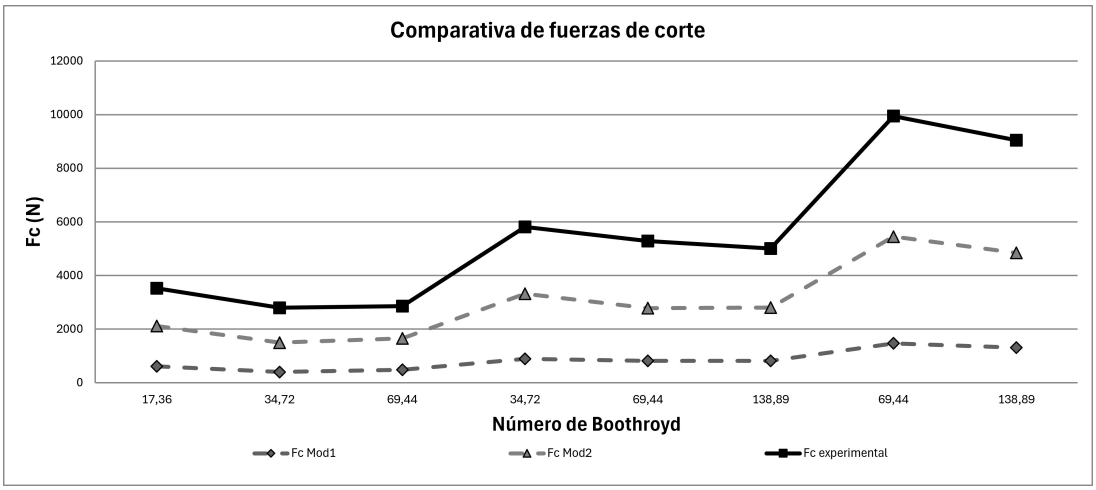


Fig. 4.23. Comparativa de Merchant, Oxley, Shaw vs Experimental

Y la (Figura 4.24) muestra los resultados calculados del material AISI 1045 enfocado a la fuerza de corte Ft.

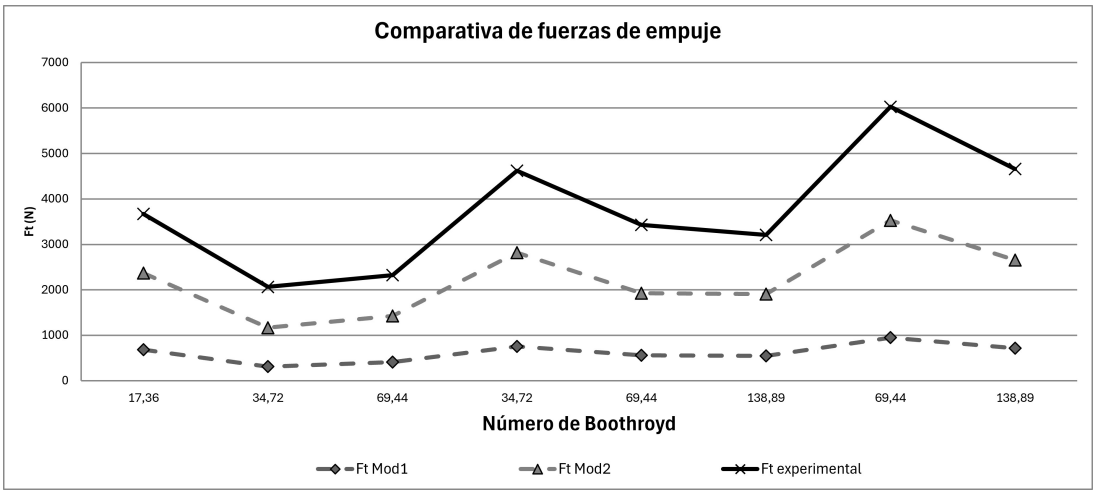


Fig. 4.24. Comparativa de Merchant, Oxeley, Shaw vs Experimental

Y por último la siguiente (Tabla 4.22) que pertenece a la misma fuente:A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining [44] de la (Tabla 4.4) del material AL 6082-T6

Tabla 4.22. Comparativa de fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t)

Modelo 1 F_c **(N)**	**Modelo 1** F_t **(N)**	**Modelo 2** F_c **(N)**	**Modelo 2** F_t **(N)**	**Boothroyd**
697,1537331	780,9949066	989,028083	1107,970679	81,08108108
547,8027768	417,0880617	699,47587	532,5694702	108,1081081
505,3157087	311,5454329	588,712088	362,9623209	162,1621622
464,0665769	258,7623684	562,566085	313,6854488	216,2162162
1082,448103	837,8437416	1432,49201	1108,787071	162,1621622
900,4230889	462,1294899	1080,53343	554,5685883	216,2162162
828,4940016	373,7417613	1036,51749	467,5831935	324,3243243
796,8158602	323,7063994	984,416435	399,9191226	432,4324324

La (Gráfica 4.25) pertenece al material AL 6082-T6, donde se observa la variación de los modelos que se emplearon.

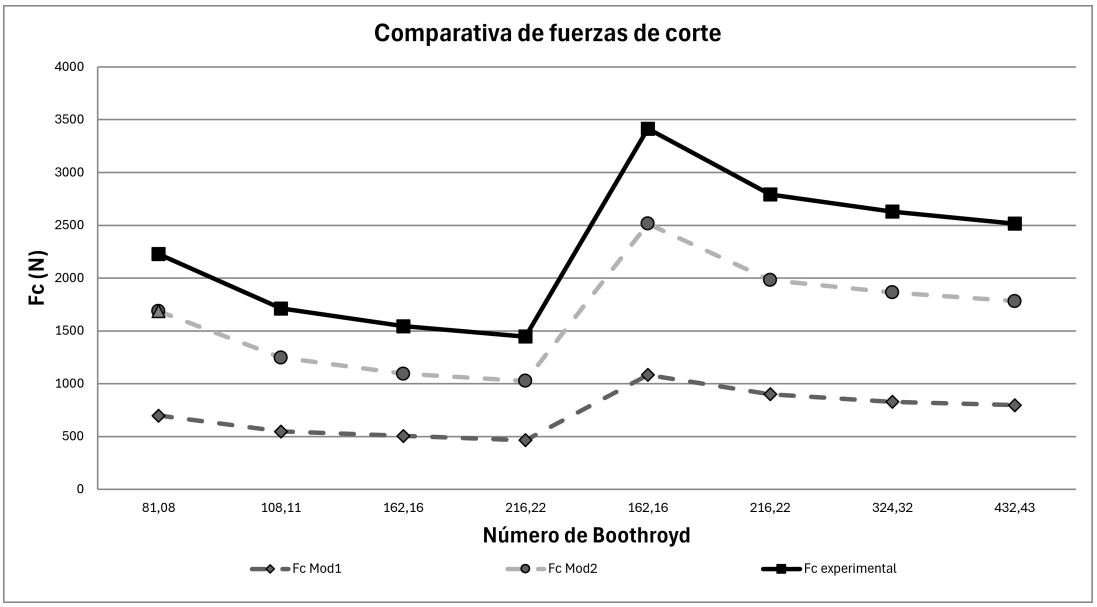


Fig. 4.25. Comparativa de Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental

Y por último la (Figura 4.26) muestra el comportamiento de la fuerza de empuje empleada en ese mismo material.

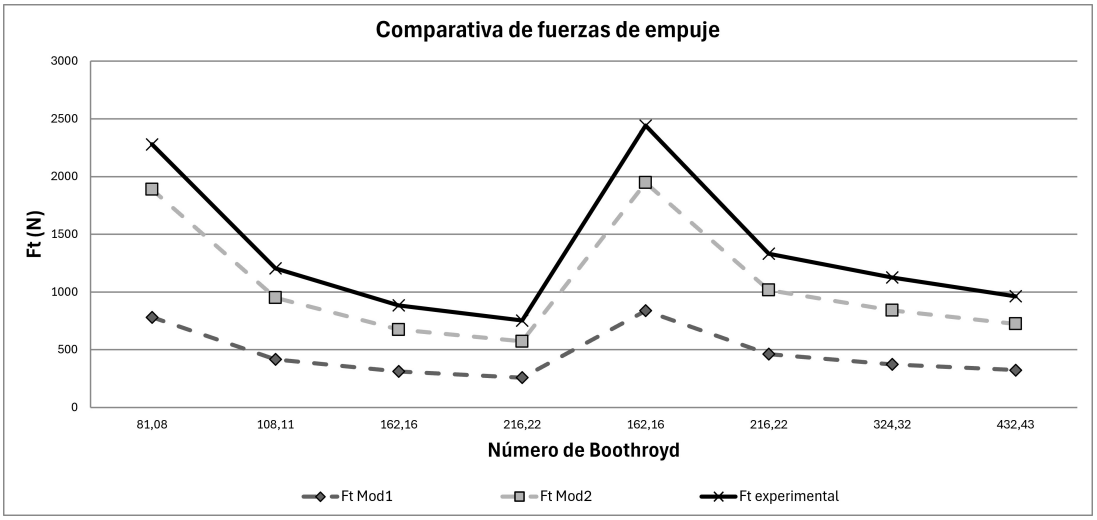


Fig. 4.26. Comparativa de Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental

4.7.1 Análisis comparativo de pendientes de fuerzas

Para los resultados de las pendientes que se ven en la (Tabla 4.23) se lo calculó de la (Tabla 4.19) donde se tiene lo siguiente:

Tabla 4.23. Comparativa de derivadas calculadas para las fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) respecto a los valores experimentales

Experimental deriv.expe F_c	**Experimental deriv.expe** F_t	**deriv. Mod1** F_c	**deriv. Mod1** F_t	**deriv. Mod2** F_c	**deriv. Mod2** F_t	**deriv. Mod3** F_c	**deriv. Mod3** F_t
-10,377488	10,377488	-1,196921	15,324845	0,4309681	16,344323	-9,4979613	9,1573884
-26,6636	-56,80506	-26,82385	-54,532897	-16,811391	-32,72419	-26,987157	-54,532179
-9,9051525	-18,77672	-10,656543	-19,616462	-6,6473023	-10,89035	-9,9225253	-19,15713
-29,906383	-57,48936	-29,955712	-56,91567	-10,069991	-24,28894	-29,90596	-56,933195
-28,198582	-52,02836	-30,562149	-54,28742	-9,6346344	-19,94587	-28,685067	-52,737943
-11,170213	-25,02127	-8,4525158	-19,765122	-5,4317918	-10,12359	-10,98804	-21,768244
41,321374	29,265924	64,195065	48,384715	37,447824	40,214205	63,500617	47,860645
71,764263	53,085893	146,71783	111,29371	87,299353	90,4972	147,35796	111,7786
97,512727	41,425455	99,237825	44,483303	74,994013	67,322912	98,729934	44,072091
91,905317	30,430189	91,257579	29,148597	68,107326	53,148332	91,79384	29,390927
77,197624	21,284605	108,6584	55,910544	75,006174	66,738586	108,85928	56,010738
71,202508	58,001254	148,34559	68,930334	72,237517	52,267325	179,1243	83,233145
109,84727	61,207273	85,406687	11,851702	69,38458	43,361818	112,0334	17,725597
101,51081	41,6494	81,08883	7,8462878	57,334416	31,884122	100,98406	9,926101

Para apreciar esta variación de mejor manera observar la (Figura 4.27 y Figura 4.28)

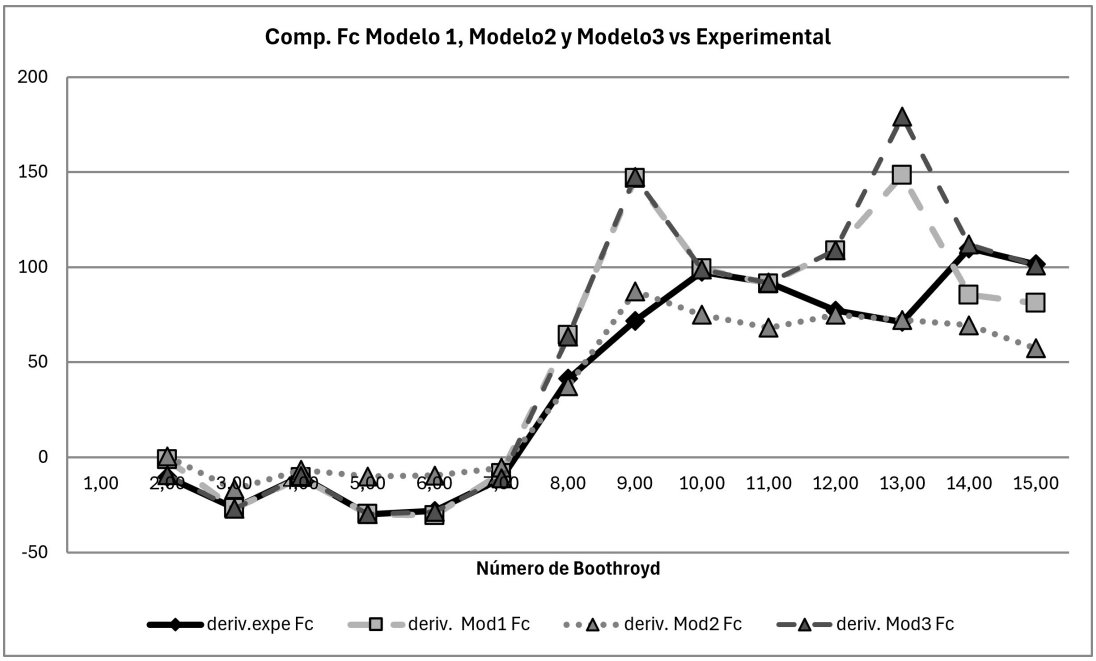


Fig. 4.27. Comparativa de modelos en fuerzas de corte vs Experimental

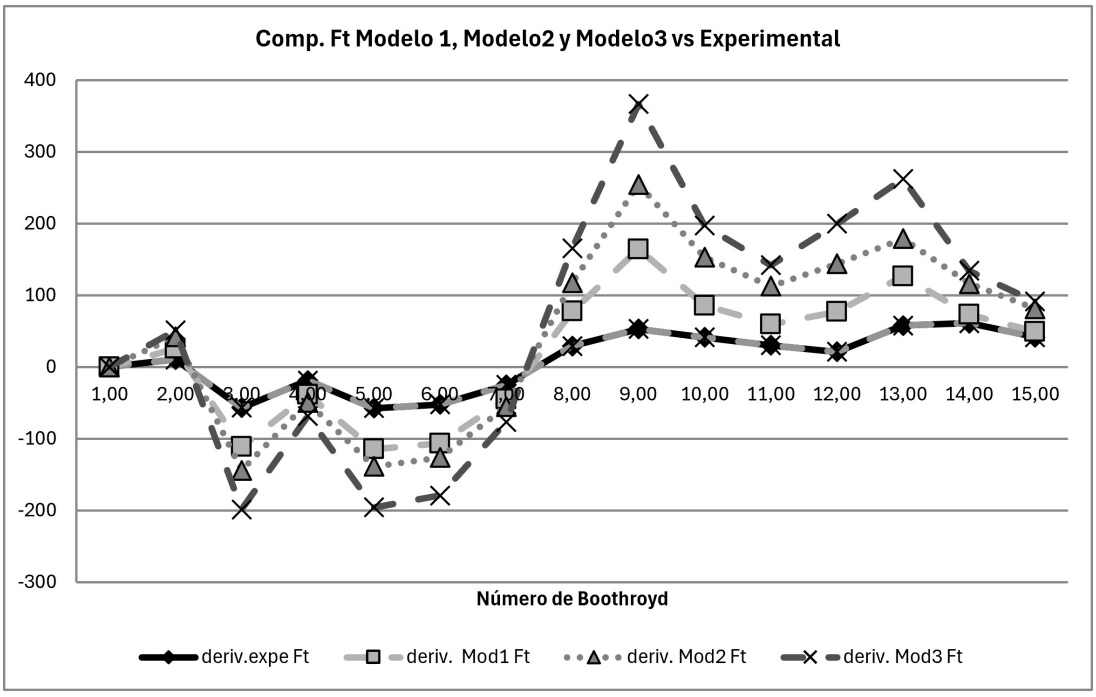


Fig. 4.28. Comparativa de modelos en fuerzas de empuje vs Experimental

La siguiente (Tabla 4.24) se muestra los resultados calculados de la (Tabla 4.20) donde se observa el comportamiento que tiene cada modelo.

Tabla 4.24. Comparativa de derivadas calculadas asociadas a las fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t)

Experimental deriv.expe F_c	**Experimental deriv.expe** F_t	**deriv. Mod1** F_c	**deriv. Mod1** F_t	**deriv. Mod2** F_c	**deriv. Mod2** F_t	**deriv. Mod3** F_c	**deriv. Mod3** F_t
864,8	519,28889	822,55459	486,29327	1123,3834	1049,7332	849,09948	501,98658
1004,7368	454,61988	1005,2986	458,54061	879,57528	799,61092	992,21274	450,90437
772,8	372,08889	758,89457	361,94808	1472,4283	967,8572	760,48876	362,85903
937,56944	543,85417	944,377	548,43743	970,64745	966,36233	957,81583	555,899
1103,5965	671,50585	1104,3496	673,1278	1117,2533	1011,5134	1106,1693	674,66618
472,26667	181,95556	434,7833	164,59073	935,18821	810,37958	457,07992	173,37342
759,94152	262,2807	789,93658	276,83584	869,91497	720,32653	755,86931	263,38958
672,62222	163,55556	659,60306	168,27539	815,00436	625,61584	670,8638	172,54385
596,5625	178,09028	586,25368	168,57321	853,17593	663,82869	600,20033	173,37719
662,4269	243,78655	655,9827	240,7433	891,9989	731,15615	661,31241	242,62332
582,66667	145,15556	578,31604	141,25955	815,97448	637,41745	572,01164	139,33987
694,03509	149,29825	688,85083	151,00225	780,64559	656,99829	688,55651	150,93041
572,44444	136,97778	532,13057	114,64783	789,98593	607,65037	579,87825	127,31163
564,61806	92,638889	573,72023	94,752282	752,25111	559,29398	569,89656	93,70888
601,22807	127,44152	597,3538	124,37277	765,56303	576,27103	601,55115	125,27764
482,48889	83,222222	471,64235	78,211144	790,82602	649,29122	466,33185	76,512746
603,91813	100,87719	616,25194	102,88804	724,06506	526,47903	600,9978	98,479652
517,24444	73,6	495,09973	73,153635	771,40242	566,09671	510,31562	76,864485
490,34722	52,708333	498,49709	57,959844	718,52186	538,9606	502,48611	58,790839

Para apreciar de mejor manera observar las (Figuras 4.29 y 4.30)

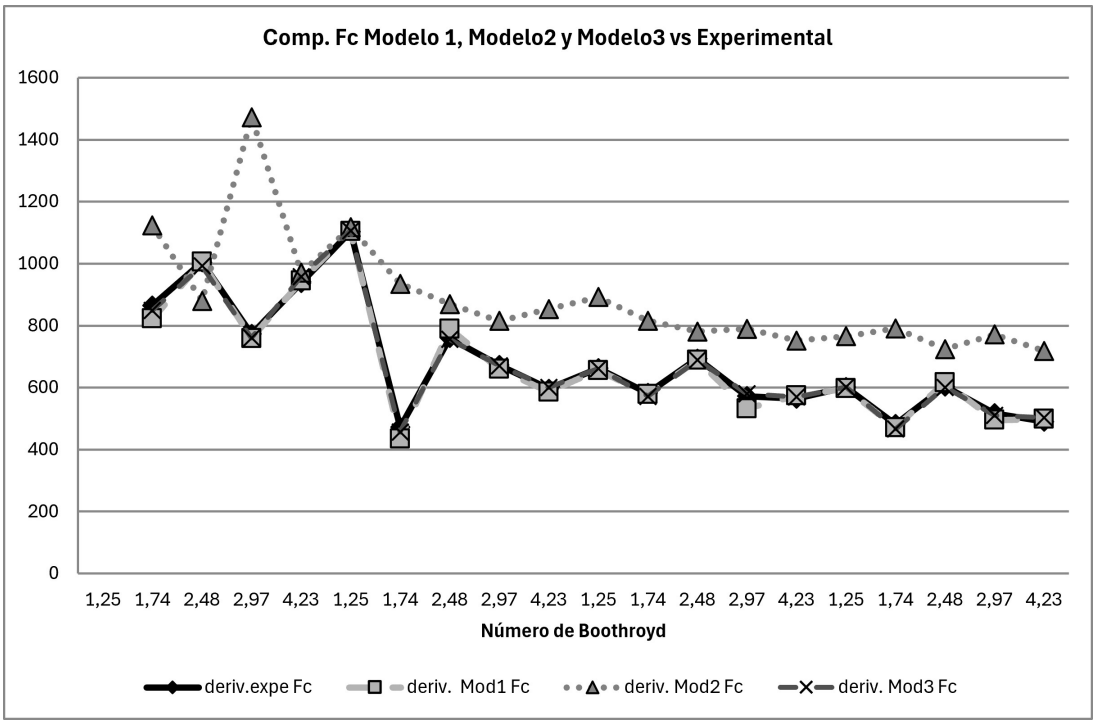


Fig. 4.29. Comp. Fc Merchant, Oxley y basada en trabajo vs Experimental

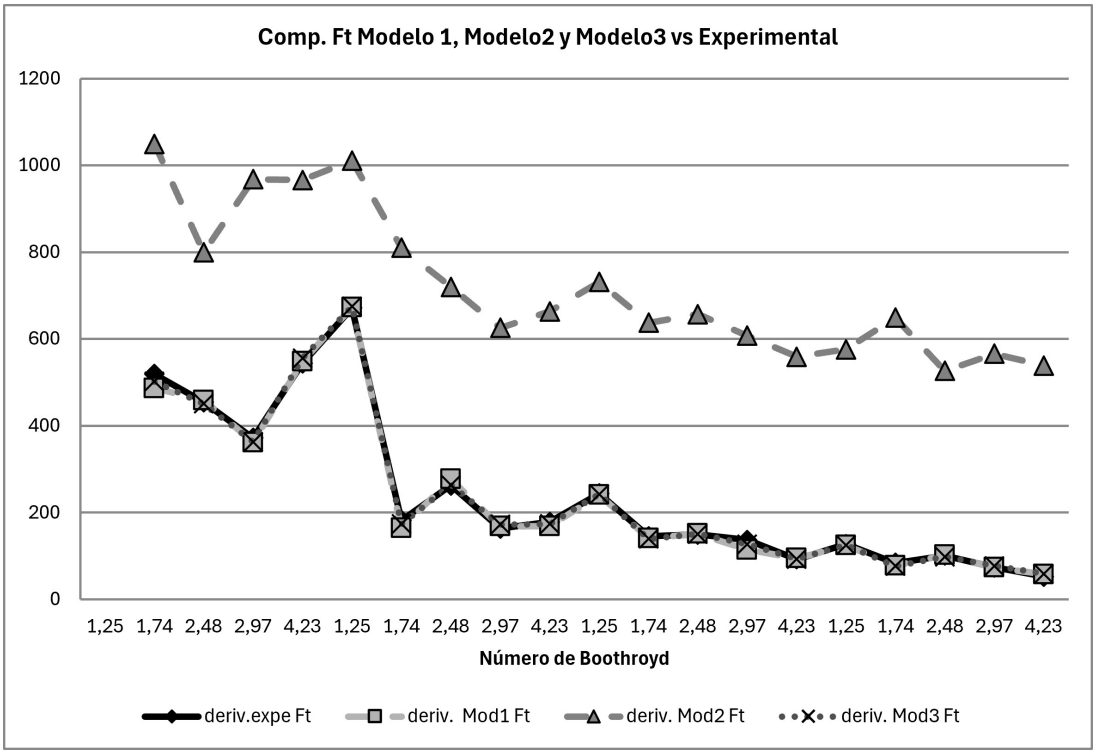


Fig. 4.30. Comp. Ft Merchant, Oxley y basada en trabajo vs Experimental

Para los resultados de la (Tabla 4.25) se obtuvo de la (Tabla 4.21)

Tabla 4.25. Comparativa de derivadas numéricas de fuerzas según los modelos combinados

Experimental deriv. F_c	**Experimental deriv.** F_t	**Modelo 1 deriv.** F_c	**Modelo 1 deriv.** F_t	**Modelo 2 deriv.** F_c	**Modelo 2 deriv.** F_t
-5,76	-23,04	-12,19639914	-21,39305586	-23,867376	-47,997249
-2,88	0	2,23438262	2,840297321	2,3797686	4,5659006
-37,44	-25,92	-11,9162139	-9,975409751	-36,004701	-30,22646
0	-8,64	-2,336994116	-5,671729874	-12,965116	-20,036905
-4,32	-2,88	-0,007904335	-0,13515743	0,2905919	-0,1195877
-33,12	-17,28	-9,516708255	-5,774558991	-28,572697	-17,542699
-4,32	-7,2	-2,356942665	-3,384502343	-6,3810979	-9,1708253

Para apreciar de mejor manera los resultados obtenidos se obtuvieron las siguientes (Figuras 4.31 y 4.32) donde se observa su comportamiento del material AISI1045.

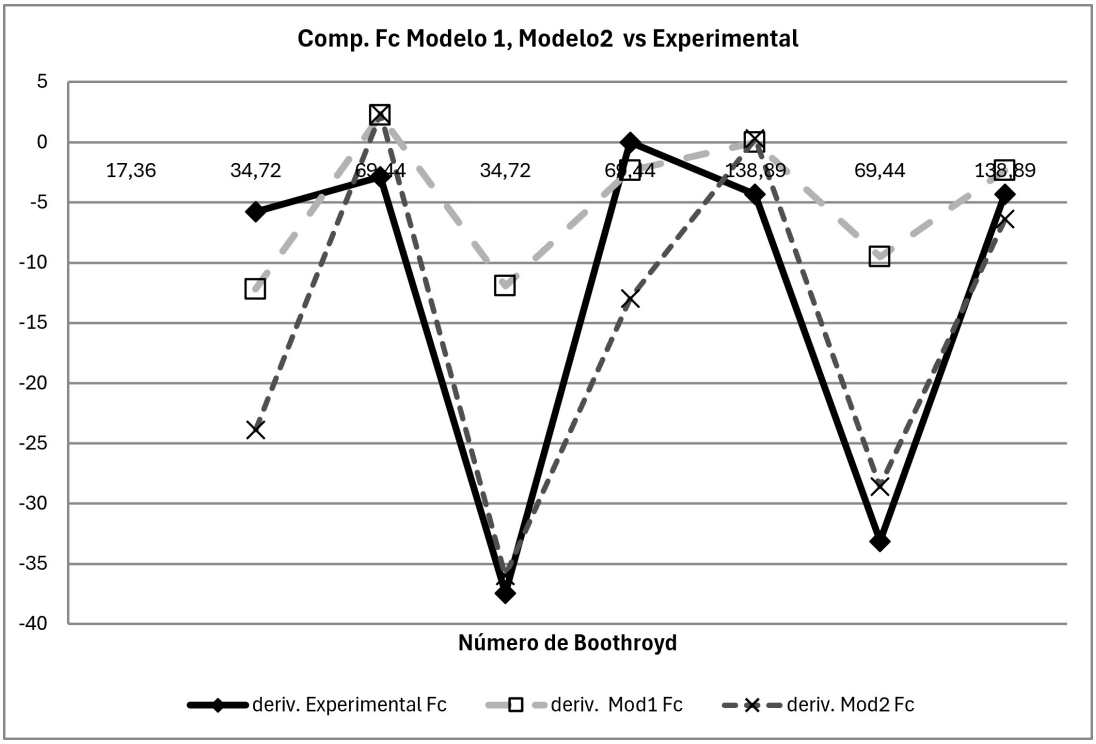


Fig. 4.31. Comparativa Fc de pendientes Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental

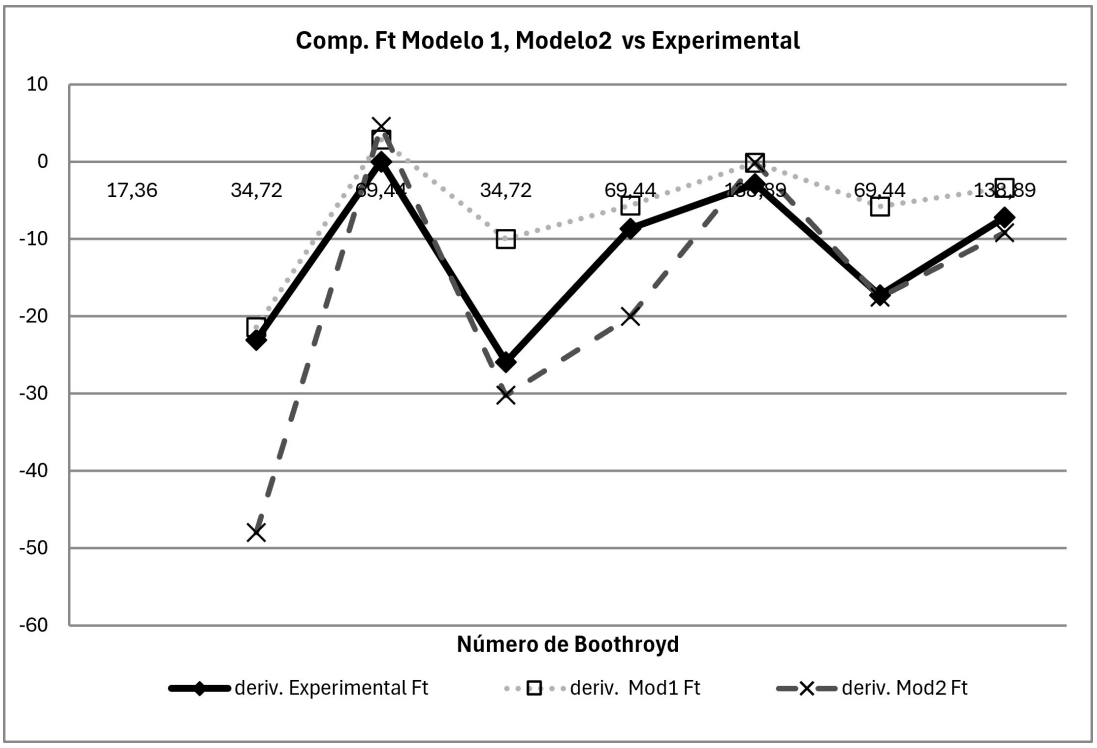


Fig. 4.32. Comparativa Ft de pendientes Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental

Para los resultados que se muestran a continuación se lo realizó usando la (Tabla 4.22)

Tabla 4.26. Comparativa de derivadas numéricas de fuerzas de corte (F_c) y avance (F_t) según los modelos combinados restantes

Experimental deriv. F_c	**Experimental deriv.** F_t	**Modelo 1 deriv.** F_c	**Modelo 1 deriv.** F_t	**Modelo 2 deriv.** F_c	**Modelo 2 deriv.** F_t
-2,775	-4,995	-5,525985383	-13,46455326	-10,713432	-21,289845
-0,2775	-0,8325	-0,786010761	-1,952538632	-2,04913	-3,1377323
-0,555	-0,555	-0,763108938	-0,976486695	-0,4837011	-0,9116221
-8,88	-5,8275	-11,44005823	-10,7130054	-16,09363	-14,70938
-1,665	-3,33	-3,367462761	-6,950713657	-6,5112337	-10,253042
-0,41625	-0,2775	-0,665344058	-0,81758649	-0,4071474	-0,8046149
-0,2775	-0,41625	-0,293022808	-0,462827097	-0,4819347	-0,6258927

Y por último se obtuvieron las (Figuras 4.33 y 4.34) donde se observa su comportamiento,

perteneciente al material Al 6082-T6.

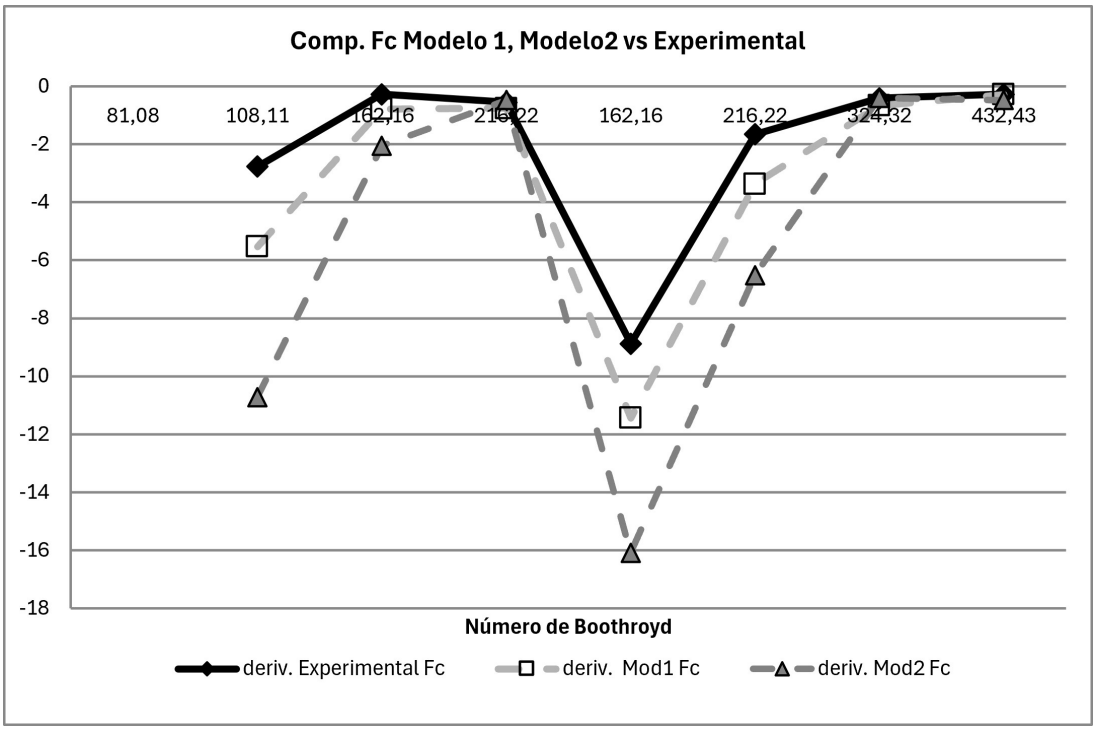


Fig. 4.33. Comparativa Fc de pendientes Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental

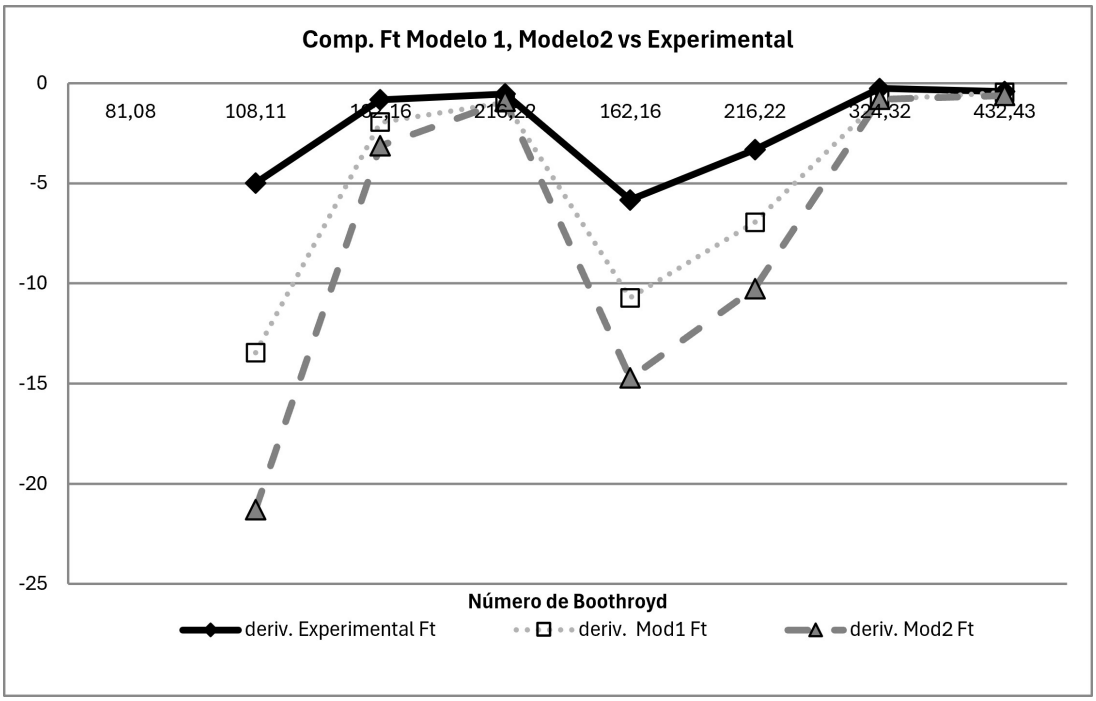


Fig. 4.34. Comparativa Ft de pendientes Modelo 1, Modelo 2 vs Experimental

4.8 Cálculo del error

4.8.1 Porcentaje de error Acero NE 9445

Los resultados obtenidos fueron los siguientes, donde la (Tabla 4.27 y 4.28) pertenecen al material Acero NE 9445, la (Tabla 4.29 y 4.30) pertenecen al material Acero SAE 4130, la (Tabla 4.31 y 4.32) al material AISI 1045 y la (Tabla 4.33 y 4.34) al material AL 6082-T6.

Tabla 4.27. Comparativa de la Fuerza de Corte (F_c) calculada y sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Modelo 1 F_c **(N)**	**Error** F_c **Mod1 (%)**	**Modelo 2** F_c **(N)**	**Error** F_c **Mod2 (%)**	**Modelo 3 (N)**	**Error** F_c **Mod3 (%)**	**Fuerza** F_c **Experimental (N)**
1615,02529	1,88181718	1035,52194	37,0885821	1646,2502	0,01520049	1646
1609,83507	0,55184693	1037,39075	35,2035759	1605,0641	0,2538476	1601
1471,00568	0,54720967	950,381794	35,0388384	1465,3895	0,16332878	1463
1347,28195	0,05326783	873,205823	35,2221199	1350,1878	0,1622997	1348
1850,10998	0,00594484	1042,23782	43,6628207	1852,1807	0,11787568	1850
1696,20773	0,69041397	993,72055	41,8196399	1707,7309	0,01575527	1708
1601,62005	1,17625095	932,936213	41,0653056	1584,7695	0,11178143	1583
20,1001144	96,4424576	10,3655951	98,1653814	20,3581	96,3967965	565
1064,80968	1,03999287	631,983758	41,26545	1069,62575	0,59240242	1076
1491,22221	0,25269528	954,22366	36,1723304	1494,0407	0,06416722	1495
2678,79293	0,45362591	1840,53105	31,6041972	2688,59	0,08955779	2691
24,1809277	96,9961581	8,06993983	98,997523	29,0703	96,3887826	805
1080,48098	17,6462665	522,439762	60,1798962	1304,5313	0,56926067	1312
1447,46284	18,8641904	820,576631	54,0035521	1785,9248	0,10789238	1784
2502,70365	19,397628	1566,69191	49,5429337	3100,07	0,15877617	3105
PROMEDIO	**17.066**		**49.26**		**13,01**	

Tabla 4.28. Comparativa de la Fuerza de Avance (F_t) calculada y sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Modelo 1 F_t **(N)**	**Error** F_t **Mod1 (%)**	**Modelo 2** F_t **(N)**	**Error** F_t **Mod2 (%)**	**Modelo 3 (N)**	**Error** F_t **Mod3 (%)**	**Fuerza** F_t **Experimental (N)**
1190,57669	1,92943259	1032,77548	14,9278846	1213,59531	0,03333553	1214
1257,02996	0,1564766	1103,64952	12,3391958	1253,30458	0,45237672	1259
974,789756	1,0144825	934,282364	3,1831747	971,06809	0,62881759	965
747,040299	0,00539478	807,844099	8,14512704	748,651534	0,22108883	747
1702,41047	0,5601362	1215,55132	28,9981704	1704,31588	0,44883895	1712
1429,03453	1,44589447	1115,10961	23,0958887	1438,74266	0,77636812	1450
1207,8534	3,23533313	1001,82185	14,374201	1195,14564	2,14920013	1170
15,8397946	96,4722061	11,0982285	97,5282342	16,0430988	96,4269268	449
808,310642	2,25989813	655,486773	20,7392052	811,966585	1,81782524	827
999,449835	0,55225519	944,76491	5,99354131	1001,33885	0,36429332	1005
1378,77198	1,58658223	1636,40503	16,8026431	1383,81453	1,22665763	1401
12,8324606	98,543421	5,92773768	99,327158	15,4271781	98,2489015	881
503,653365	61,0777925	378,099095	70,7805955	608,091756	53,0068195	1294
554,578646	64,3815899	564,419407	63,7495564	684,25643	56,0528947	1557
656,685472	68,7143653	979,340013	53,3425434	813,428682	61,246847	2099
PROMEDIO	**26.79**		**35.55**		**24.87**	

4.8.1.1 Análisis Acero NE 9445 Fc y Ft

Comparación del error porcentual obtenido por los diferentes modelos matemáticos en la estimación de la fuerza de corte (Fc) y avance (Ft) para el acero NE 9445, utilizando como referencia los valores experimentales.

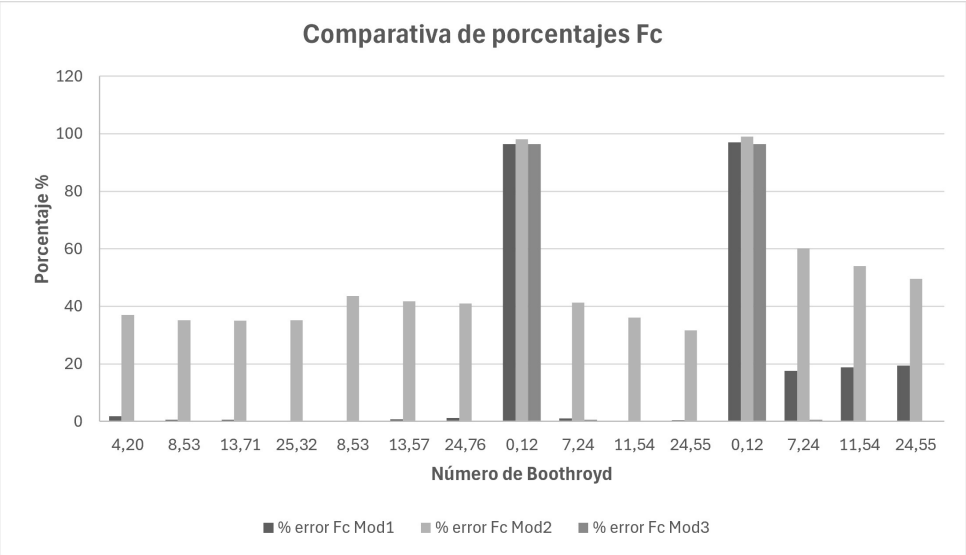


Fig. 4.35. Comparativa de porcentajes Fc

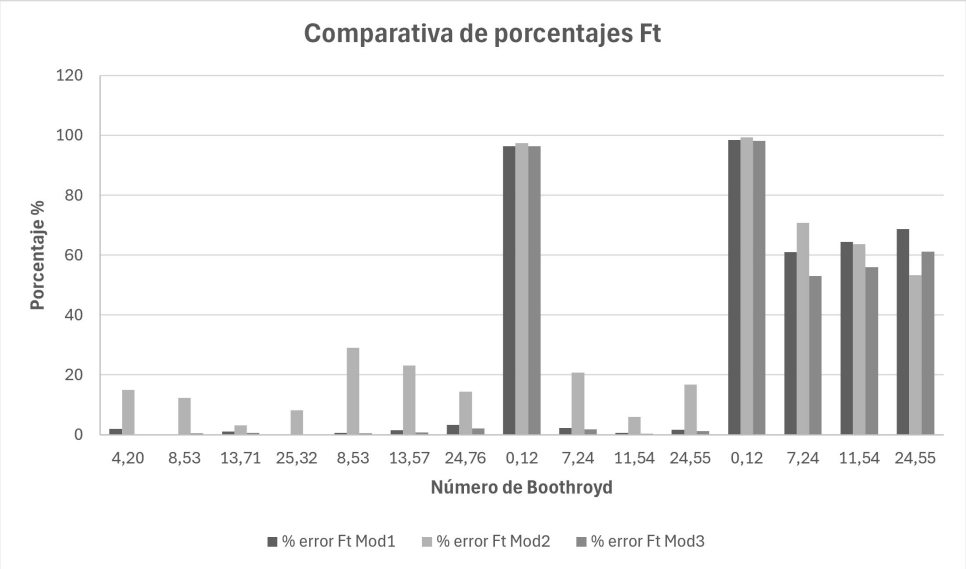


Fig. 4.36. Comparativa de porcentajes Ft

Las (Figuras 4.35 y 4.36) presentadas muestran la evaluación del porcentaje de error para las fuerzas de corte (F_c) y de avance (F_t) del Acero NE 9445 bajo tres modelos distintos. Para la fuerza de corte (F_c), el Modelo 3 tiene el menor error promedio del grupo (13.01 %), superando la alta desviación del Modelo 2 (49.26 %). En cuanto a la fuerza de avance F_t (Tabla 4.28), el Modelo 3 registró un error promedio del 24.87 %, siendo como la alternativa más precisa y confiable en comparación con los Modelos 1 y 2.

4.8.2 Porcentaje de error Acero SAE 4130

Tabla 4.29. Comparativa de la Fuerza de Corte (F_c) calculada y sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Modelo 1 F_c **(N)**	**Error** F_c **Mod1 (%)**	**Modelo 2** F_c **(N)**	**Error** F_c **Mod2 (%)**	**Modelo 3 (N)**	**Error** F_c **Mod3 (%)**	**Fuerza** F_c **Experimental (N)**
1713,69201	1,40189423	1305,41637	22,7564279	1708,3264	1,08440237	1690
2116,0285	0,14332694	1854,89739	12,2149839	2123,6468	0,50387127	2113
2863,44614	0,1204945	2508,84249	12,2782347	2861,3354	0,04669231	2860
3234,64457	0,10362651	3229,05198	0,27634402	3233,3136	0,14473132	3238
4417,16881	0,11715355	4444,4714	0,73597907	4432,6656	0,46839529	4412
1132,92903	0,25920618	1121,05434	0,79165116	1143,0144	1,15171681	1130
1345,59477	1,13190507	1578,48336	15,9796737	1366,5861	0,41044085	1361
1932,89544	0,35801885	2225,24623	15,5371875	1928,5585	0,13284008	1926
2255,52737	0,02338682	2623,88967	16,3587436	2256,6984	0,07531707	2255
2989,61893	0,41242734	3692,21431	22,9918157	3008,2536	0,20831446	3002
1038,78342	0,65730818	1039,48714	0,72549765	1041,568	0,92713178	1032
1321,6554	0,35348507	1438,60509	9,23349185	1321,3563	0,33077449	1317
1833,80102	0,04369972	2018,99811	10,1471964	1833,2831	0,01544463	1833
2094,08227	0,89530186	2405,40427	13,8383471	2116,9192	0,18548036	2113
2812,47978	0,2666746	3347,35349	18,7004785	2830,5288	0,37333617	2820
1036,00152	0,38774394	1070,63562	3,74376208	1041,568	0,92713178	1032
1266,69615	0,10282765	1457,4527	14,9410648	1269,6651	0,13131703	1268
1724,86607	0,45812854	1995,77934	16,2364203	1716,4939	0,02947583	1717
1967,03442	0,1505373	2373,09574	20,4617125	1966,1048	0,19772589	1970
2591,23946	0,280165	3272,81007	26,6567363	2595,3048	0,43749226	2584
PROMEDIO	**0.38**		**12.73**		**0.39**	

Tabla 4.30. Comparativa de la Fuerza de Avance (F_t) calculada y sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Modelo 1 F_t **(N)**	**Error** F_t **Mod1 (%)**	**Modelo 2** F_t **(N)**	**Error** F_t **Mod2 (%)**	**Modelo 3 (N)**	**Error** F_t **Mod3 (%)**	**Fuerza** F_t **Experimental (N)**
1013,13263	1,72014376	1186,6738	19,1439557	1009,96049	1,40165545	996
1250,99347	0,0794778	1700,13024	36,0104194	1255,4974	0,43979226	1250
1591,90845	0,24612414	2294,62358	44,4977066	1590,735	0,17222934	1588
1768,94827	0,05941965	2768,032	56,3859885	1768,2204	0,10054264	1770
2455,68731	0,19124087	3978,0857	62,3045982	2464,30262	0,54274253	2451
453,863762	0,0300083	969,93289	113,641606	457,904072	0,85992774	454
534,370097	1,58930081	1366,31421	151,623243	542,70629	0,05409028	543
740,191523	0,29695436	1901,86132	157,704786	738,530715	0,07191261	738
822,500136	0,55013891	2207,86907	169,910644	822,927163	0,60234264	818
1033,58311	0,71247753	3039,09804	191,940254	1040,2556	0,09360599	1041
317,63346	0,51691759	864,703225	173,640261	318,484913	0,78636486	316
386,727804	0,07033492	1176,4835	204,000904	386,640285	0,09294959	387
498,994691	0,19973712	1664,94744	234,326795	498,853761	0,17143796	498
555,072436	1,757091	1962,16773	247,286324	561,125755	0,68570699	565
673,718772	1,06919652	2662,50107	290,96932	678,042346	0,43431039	681
303,844968	0,61091656	948,721141	214,414607	305,477541	1,15150352	302
342,100419	0,26226856	1266,30924	269,186367	342,902253	0,02849758	343
418,14935	0,03572957	1657,73495	296,587309	416,119733	0,44982456	418
453,931019	0,01519407	1934,63008	326,129974	453,716492	0,06244463	454
526,506823	1,25131217	2609,50248	401,8274	527,332848	1,41016304	520
PROMEDIO	**0.56**		**183**		**0.48**	

4.8.2.1 Análisis Acero SAE 4130 Fc y Ft

Para mayor apreciación de la comparativa de porcentajes, se realizó la misma Figura, pero a diferente escala para un mayor análisis.

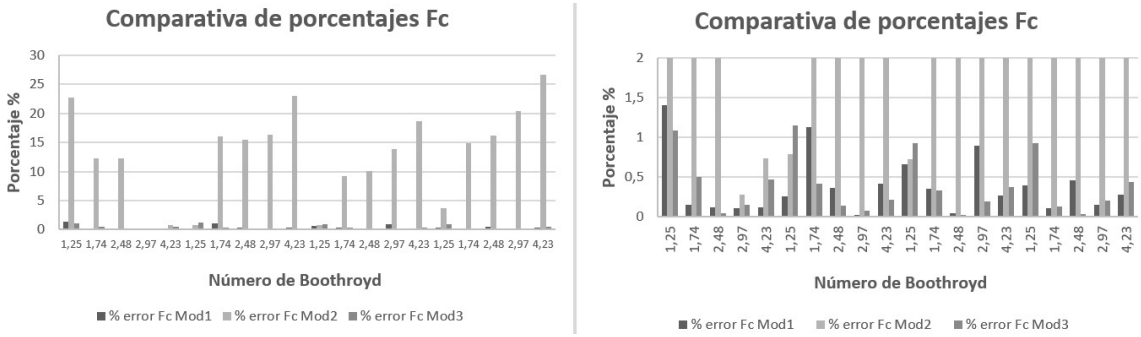


Fig. 4.37. Error porcentual de los modelos predictivos de la fuerza de corte (Fc) para el acero SAE 4130, permitiendo comparar la precisión alcanzada por cada modelo

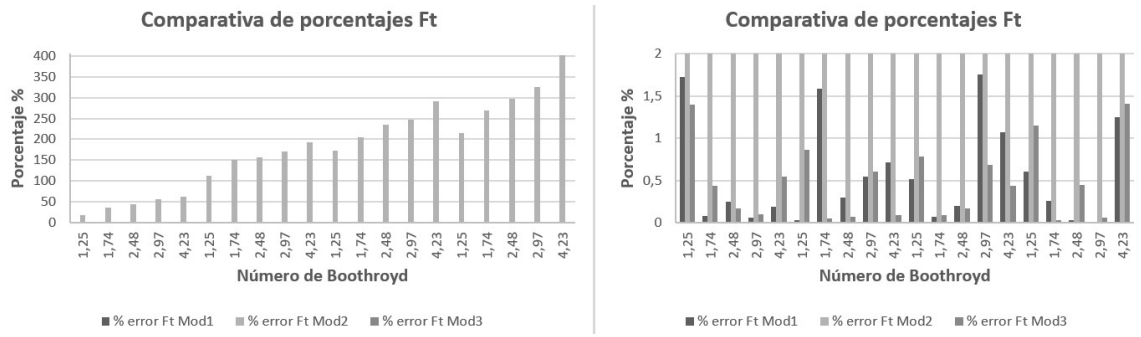


Fig. 4.38. Error porcentual de los modelos predictivos de la fuerza de corte (Ft) para el acero SAE 4130, permitiendo comparar la precisión alcanzada por cada modelo

Las (Figuras 4.37 y 4.37) exponen la comparativa del porcentaje de error predictivo para las fuerzas de corte (F_c) y de avance (F_t) del Acero SAE 4130. Con respecto a la fuerza de corte F_c, el Modelo 1 indicó un error promedio de apenas 0.38 %, seguido muy de cerca por el Modelo 3 con un 0.39 %, mientras que el Modelo 2 queda rezagado al promediar un 12.73 %. En cuanto a la fuerza de avance F_t, el Modelo 3 registró un error promedio de 0.48 %, contrastando con la baja predictibilidad del Modelo 2, cuyo error se dispara hasta un 183 %.

4.8.3 Porcentaje de error AISI 1045

Tabla 4.31. Comparativa de la Fuerza de Corte (F_c) calculada por los modelos predictivos, junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Modelo 1 F_c **(N)**	**Error** F_c **(%)**	**Modelo 2** F_c **(N)**	**Error** F_c **(%)**	**Fuerza** F_c **Experimental (N)**
609,6888	56,450797	1508,485939	7,748995616	1400
397,9458	69,3887845	1094,121771	15,83678686	1300
475,5285	60,3726224	1176,752625	1,937281286	1200
889,286	64,4285617	2426,915854	2,923365857	2500
808,1403	67,6743868	1976,738205	20,93047181	2500
807,5914	63,2912992	1996,918195	9,23099115	2200
1468,474	67,3672459	3981,13323	11,53037266	4500
1304,797	68,9333962	3538,001432	15,76187068	4200
PROMEDIO	**64,73**		**10,73**	

Tabla 4.32. Comparativa de la Fuerza de Avance (F_t) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Modelo 1 F_t **(N)**	**Error** F_t **(%)**	**Modelo 2** F_t **(N)**	**Error** F_t **(%)**	**Fuerza** F_t **Experimental (N)**
682,583601	47,4935692	1688,84141	29,9108777	1300
311,176381	65,4248466	855,555836	4,93824041	900
409,797816	54,4669094	1014,09405	12,6771169	900
756,16621	57,9907661	2063,62391	14,6457725	1800
559,231145	62,7179237	1367,89804	8,80679761	1500
549,845212	57,7042145	1359,59334	4,58410271	1300
950,856253	61,9657499	2577,83631	3,11345232	2500
715,821368	64,2089316	1940,97344	2,95132787	2000
PROMEDIO	**58,99**		**10,20**	

4.8.3.1 Análisis AISI 1045 Fc y Ft

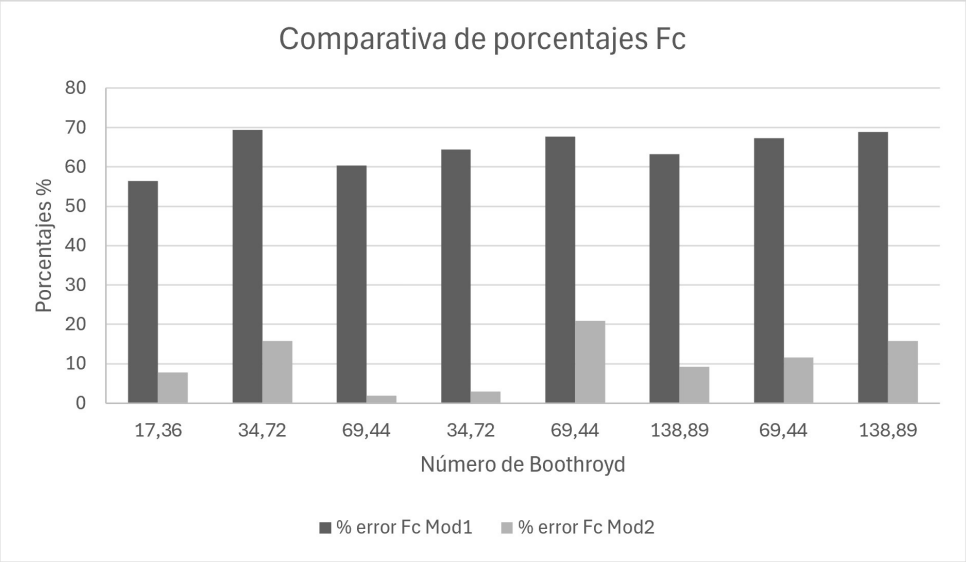


Fig. 4.39. Comparación del error porcentual asociado a las predicciones de la fuerza de corte (Fc) realizadas por los diferentes modelos matemáticos para el acero AISI 1045.

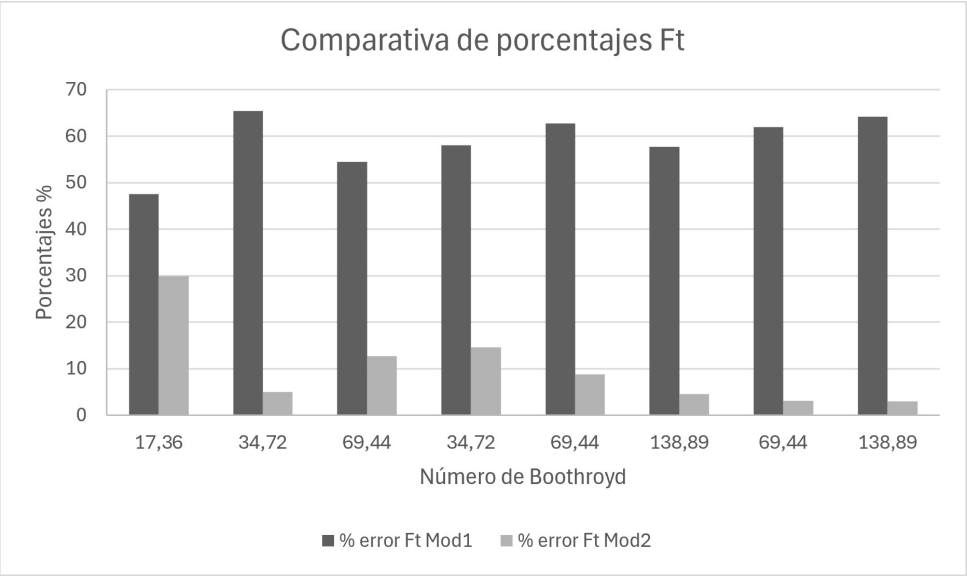


Fig. 4.40. Comparación del error porcentual asociado a las predicciones de la fuerza de corte (Ft) realizadas por los diferentes modelos matemáticos para el acero AISI 1045.

Las (Figuras 4.39 y 4.40) exponen el análisis del porcentaje de error predictivo para las fuerzas de corte (F_c) y de avance (F_t) del acero AISI 1045 evaluadas bajo dos modelos distintos. En relación con la fuerza de corte F_c, el Modelo 2 tiene una precisión al promediar un error de solo 10.73 %, contrastando con la baja predictibilidad del Modelo 1, cuyo promedio alcanza el 64.73 %. Esta tendencia se consolida de igual manera para la fuerza de avance F_t (Tabla 4.32), donde el Modelo 2 registra un error promedio de 10.20 %, frente al elevado 58.99 % obtenido por el Modelo 1.

4.8.4 Porcentaje de error AL 6082-T6

Tabla 4.33. Comparativa de la Fuerza de Corte (F_c) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Modelo 1 F_c **(N)**	**Error** F_c **(%)**	**Modelo 2** F_c **(N)**	**Error** F_c **(%)**	**Fuerza** F_c **Experimental (N)**
697,1537	29,102543	989,0280831	83,15334872	540
547,8028	17,807049	699,4758695	50,42491818	465
505,3157	12,29238	588,7120882	30,8249085	450
464,0666	10,492042	562,5660846	33,94430586	420
1082,448	20,272011	1432,492006	59,16577845	900
900,4231	11,163344	1080,533427	33,39918848	810
828,494	8,2998695	1036,517487	35,49248191	765
796,8159	8,4103211	984,4164349	33,93420883	735
PROMEDIO	**14,72**		**45,04**	

Tabla 4.34. Comparativa de la Fuerza de Avance (F_t) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Modelo 1 F_t **(N)**	**Error** F_t **(%)**	**Modelo 2** F_t **(N)**	**Error** F_t **(%)**	**Fuerza** F_t **Experimental (N)**
780,994907	100,255104	1107,97068	184,095046	390
417,088062	63,5639458	532,56947	108,850773	255
311,545433	48,3549681	362,962321	72,8392004	210
258,762368	43,7568713	313,685449	74,2696938	180
837,843742	69,2613619	1108,78707	123,997388	495
462,12949	46,7077746	554,568588	76,0535201	315
373,741761	31,1374601	467,583193	64,0642784	285
323,706399	34,8776664	399,919123	66,6329678	240
PROMEDIO	**54,73**		**96,35**	

4.8.4.1 Análisis AL 6082-T6 Fc y Ft

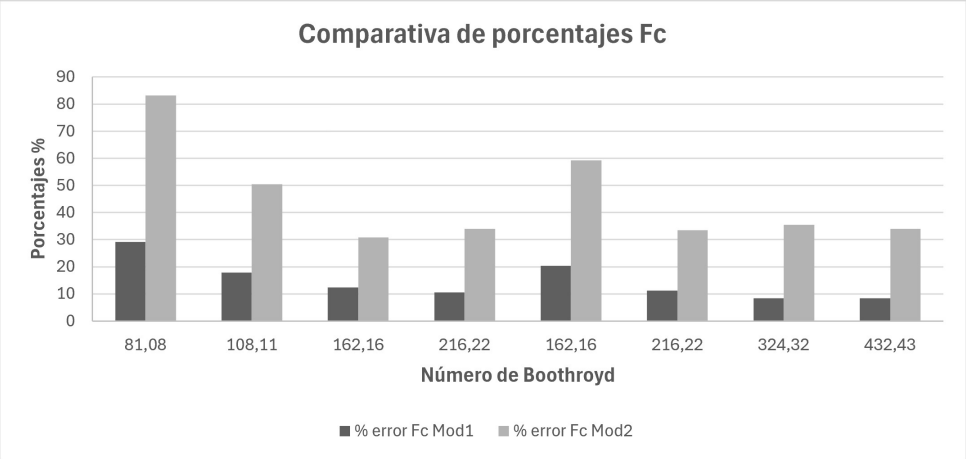


Fig. 4.41. Error porcentual de los modelos matemáticos empleados para la fuerza de corte (Fc) del aluminio 6082-T6, mostrando la diferencia entre los valores calculados y los datos experimentales.

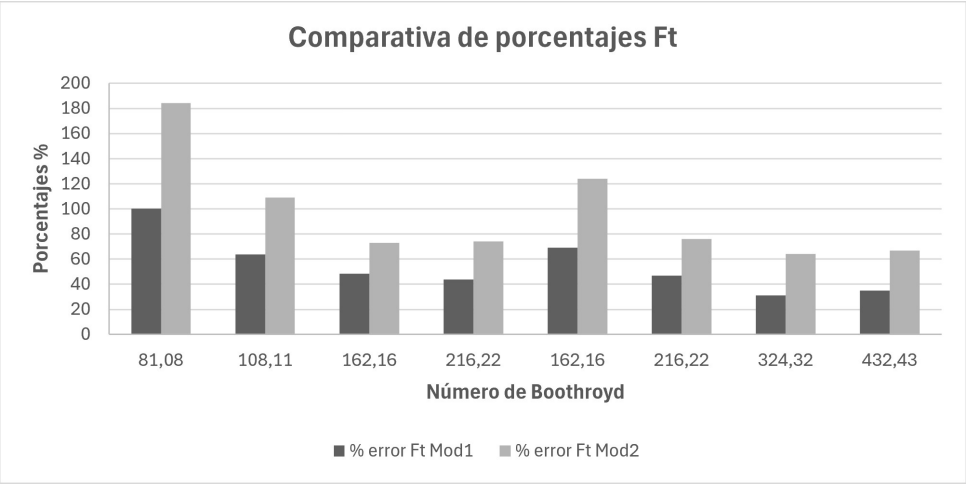


Fig. 4.42. Error porcentual de los modelos matemáticos empleados para la fuerza de corte (Ft) del aluminio 6082-T6, mostrando la diferencia entre los valores calculados

Las (Figuras 4.41 y 4.42) exponen la comparativa del porcentaje de error predictivo para las fuerzas de corte (F_c) y de avance (F_t) de la aleación de aluminio AL 6082-T6 evaluada bajo dos modelos. En relación con la fuerza de corte F_c, el Modelo 1 indicó un mejor ajuste analítico al registrar un error promedio del 14.72 %, superando la desviación del Modelo 2, la cual asciende al 45.04 %. Esta ventaja predictiva es igual también para la fuerza de avance F_t (Tabla 4.34), donde el Modelo 1 vuelve a posicionarse como la alternativa al promediar un error del 54.73 %, frente al severo 96.35 % alcanzado por el Modelo 2.

4.9 Obtención de esfuerzos

Para obtener los esfuerzos cortantes τ se usó el modelo constitutivo de Johnson Cook, donde para ser expresado al plano de cizalla se dividió para $\sqrt{3}$ y así obtener el esfuerzo normal real que actúa en ese plano [56].

4.10 Modelo independiente

A esta parte se lo relaciona con Merchant, donde se lo expresa de manera formal, además para cada parámetro varía netamente las fuerzas actuantes ya sea F_s y F_n para cada caso, ver

(Ecuación 4.21) [44], [33] y [53].

$$\tau_s = \frac{F_s \cdot \sin\varphi}{t_1 \cdot w} \tag{4.21}$$

4.10.1 Modelo Constitutivo de Johnson Cook

Es una ecuación empírica utilizada para describir el comportamiento de fluencia en metales sometidos a grandes deformaciones, altas velocidades de deformación y temperaturas elevadas. Debido a su facilidad para calibrar experimentalmente sus parámetros, es popular en simulaciones numéricas o desgaste [56].

$$\sigma_s = (A + B\varepsilon^n)\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m\right] \tag{2.12}$$

$A =$ Esfuerzo de fluencia

$B =$ Coeficiente de endurecimiento por deformación

$\varepsilon =$ Deformación

$n =$ Exponente de endurecimiento

$\dot{\varepsilon} =$ Velocidad de deformación

$\dot{\varepsilon}_0 =$ Velocidad de referencia

$m =$ Exponente de reblandecimiento térmico

$T =$ Temperatura actual del material durante el proceso de corte.

$T_{room} =$ Temperatura ambiente.

$T_{melt} =$ Temperatura de fusión del material

4.11 Cálculos de los esfuerzos

Para los resultados de la tabla 4.35 que se muestran a continuación se usaron datos de la tabla 4.1 perteneciente a: Teoría del corte de metales - material Acero NE 9445, dado que este presenta similitudes en las propiedades con el material Acero SAE 4130, para Johnson Cook se usó parámetros sacados del artículo: Evaluation of Flow and Failure Properties of Treated 4130 Steel [56].

Tabla 4.35. Comparativa del esfuerzo cortante (τ_s), obtenidos mediante el modelos predictivos incluyendo en Número de Boothroyd

Merchant 1945 τ_s **(MPa)**	**Johnson Cook 1983** σ_s **(MPa)**	**Johnson Cook 1983** τ_s **(MPa)**	**Bootroyd**
597,154575	650,7860282	375,731489	4,19642857
602,093785	677,5015692	391,155713	8,5327381
618,629522	694,9218815	401,213335	13,7083333
641,472821	719,5761971	415,447511	25,3184524
612,653901	599,0985656	345,889718	8,5327381
623,358513	630,1405982	363,811844	13,5684524
646,064472	653,7746648	377,456979	24,7589286
641,96521	655,8661757	378,664513	7,24330357
627,909213	694,9218815	401,213335	11,5401786
614,555527	730,6897311	421,863913	24,5535714
665,458843	554,184982	320,093669	7,24330357
643,552367	636,2786542	367,355652	11,5401786
622,355783	673,3275763	388,745857	24,5535714

A partir de la obtención de los esfuerzos se tiene la siguiente Figura 4.43 perteneciente a: Teoría del corte de metales - material Acero NE 9445.

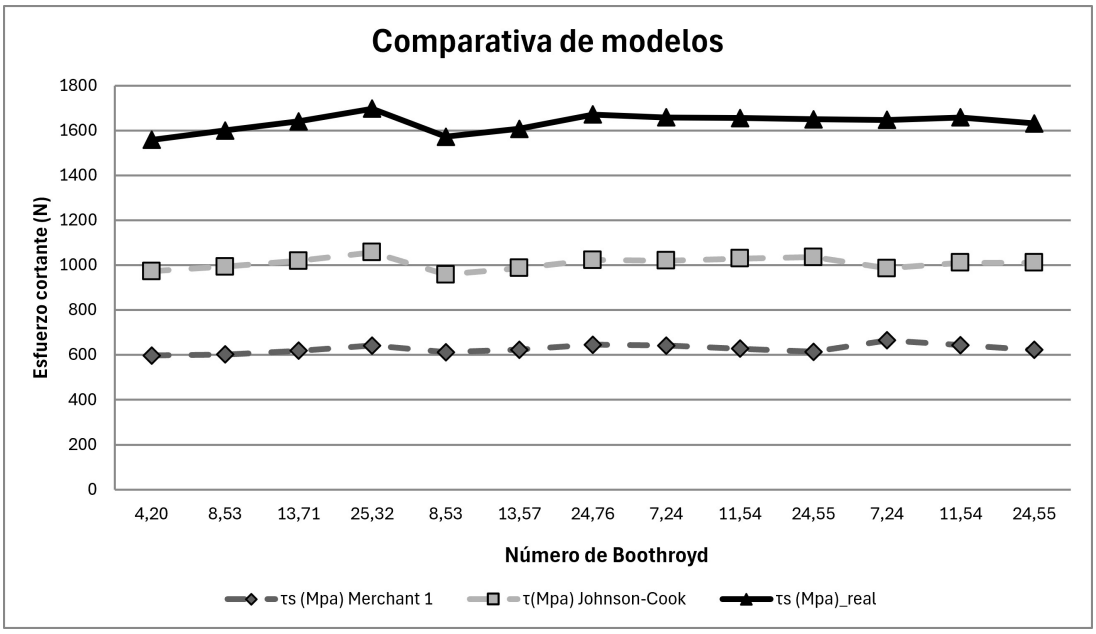


Fig. 4.43. Comparativa Merchant y Johnson Cook vs Experimental

Para la (Tabla 4.36) que se muestra a continuación se usaron datos de la (Tabla 4.2) del material Acero SAE 4130 y para aplicar Johnson Cook se usaron los mismos parámetros de la sección anterior.

Tabla 4.36. Comparativa de los esfuerzos cortantes y normales obtenidos mediante los modelos de Merchant y Johnson-Cook

Merchant 1945 τ_s **(MPa)**	**Johnson Cook 1983** σ_s **(MPa)**	**Johnson Cook 1983** τ_s **(MPa)**	**Boothroyd**
563,6195573	753,3781443	434,9630744	1,252173913
513,1649465	780,408739	450,5691956	1,741304348
520,5874939	790,6471824	456,4803636	2,484782609
454,5212493	784,9914918	453,2150491	2,973913043
458,5636688	799,9252968	461,8370854	4,226086957
490,263674	843,237069	486,8431488	1,252173913
426,1799235	857,4302375	495,0375784	1,741304348
428,3839525	857,4302375	495,0375784	2,484782609
426,5654876	858,3564877	495,5723493	2,973913043
404,3319733	862,058502	497,7097082	4,226086957
492,5672397	859,6791889	496,3360111	1,252173913
456,8739307	865,3597088	499,6156608	1,741304348
455,9881317	869,5792609	502,0518204	2,484782609
440,9803725	871,4231156	503,1163703	2,973913043
424,3673164	874,0547826	504,635764	4,226086957
488,4940601	877,0775727	506,3809727	1,252173913
443,2292698	882,8488877	509,7130429	1,741304348
437,5169297	881,8007157	509,1078806	2,484782609
425,7766966	888,0815715	512,7341344	2,973913043
404,661294	885,9901703	511,5266633	4,226086957

Donde se tiene la siguiente (Figura 4.44) perteneciente al material Acero SAE 4130

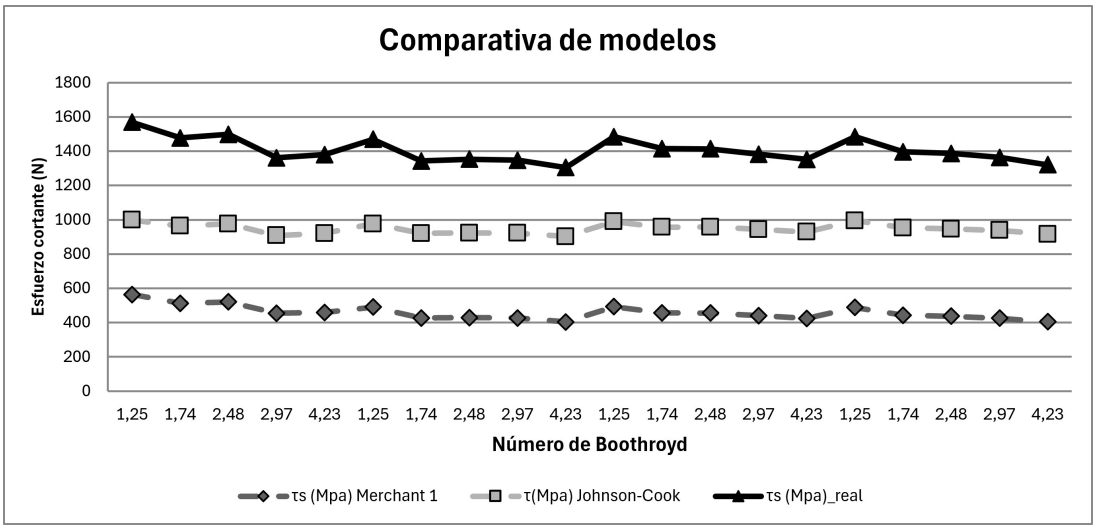


Fig. 4.44. Comparativa Merchant y Johnson Cook vs Experimental

La (Tabla 4.37) presenta datos calculados de la (Tabla 4.3) que pertenece a: A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining material AISI 1045 [44].

Tabla 4.37. Comparativa de los esfuerzos cortantes (τ_s), mediante los modelos de Merchant y Johnson-Cook

Merchant 1945 τ_s **(MPa)**	**Johnson Cook 1983** σ_s **(MPa)**	**Johnson Cook 1983** τ_s **(MPa)**	**Boothroyd**
559,093672	959,077558	553,7237	17,36111
648,260082	898,14002	518,5414	34,72222
579,298128	921,097576	531,7959	69,44444
578,786522	915,122565	528,3463	34,72222
675,690897	875,292728	505,3505	69,44444
613,918812	907,528272	523,9617	138,8889
624,021889	905,802103	522,9651	69,44444
648,852675	898,443006	518,7163	138,8889

La (Figura 4.45) muestra al material AISI 1045

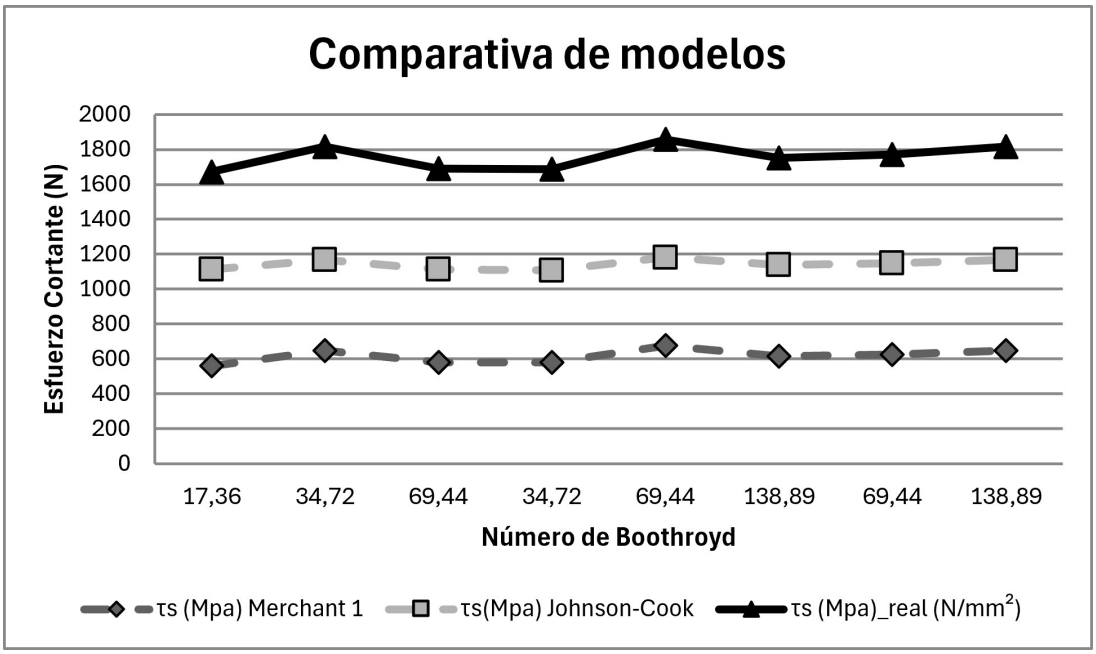


Fig. 4.45. Comparativa Merchant y Johnson Cook vs Experimental

Y la (Tabla 4.38) al material Al 6082-T6 perteneciente al mismo artículo.

Tabla 4.38. Comparativa final de los esfuerzos cortantes (τ_s) obtenidos por los modelos de Merchant y Johnson-Cook

Merchant 1945 τ_s **(MPa)**	**Johnson Cook 1983** σ_s **(MPa)**	**Johnson Cook 1983** τ_s **(MPa)**	**Boothroyd**
221,1061	593,3811	313,52	81,08108108
226,0717	551,6998	288,5240	108,1081081
235,1471	529,2779	273,78	162,1621622
227,6159	531,6370	375,1808	216,2162162
219,9995	549,3487	291,1446	162,1621622
229,8105	524,2739	274,8097	216,2162162
221,1917	526,5598	276,4994	324,3243243
222,0944	523,9560	274,5061	432,4324324

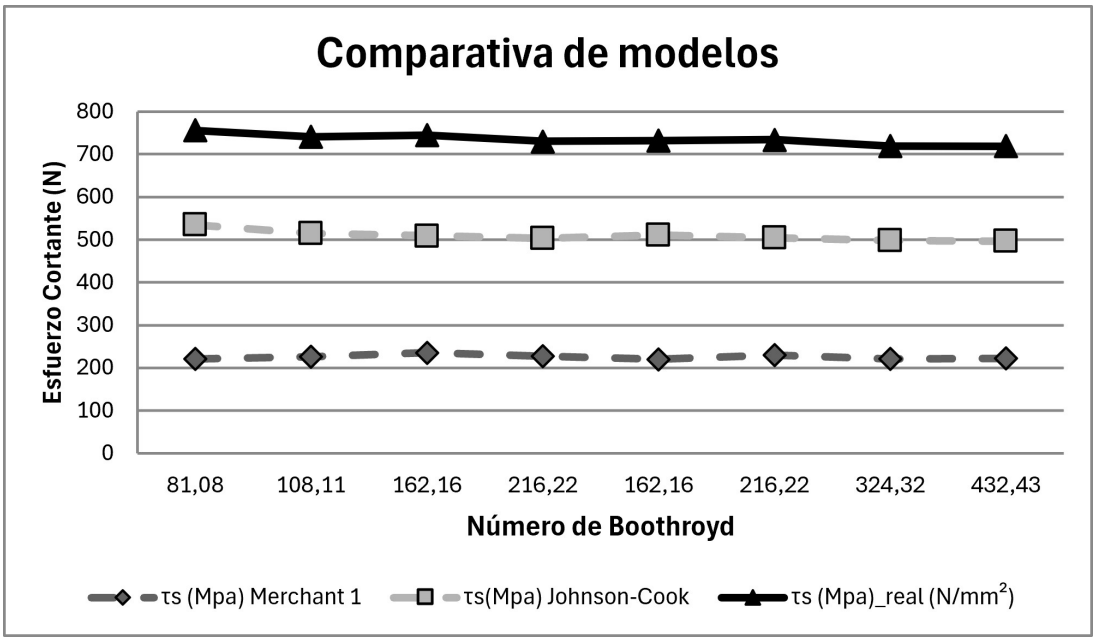


Fig. 4.46. Comparativa Merchant y Johnson Cook vs Experimental

4.12 Análisis comparativo de pendientes (Esfuerzos)

Los resultados de la (Tabla 4.39) se basaron en la (Tabla 4.35) que pertenece al material Acero NE 9445.

Tabla 4.39. Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con el valor experimental

Experimental τ_s **(MPa)**	**Merchant** τ_s **(MPa)**	**Johnson Cook** τ_s **(MPa)**
4.84282773	1.13903533	3.5569935
2.70500288	3.19494388	1.94327831
1.72263522	1.96753361	1.22601462
1.60851064	1.71687183	4.14386852
1.39007092	2.1257385	3.55900372
2.41276596	2.02904317	1.21935247
0.57091882	0.2340346	-0.0689404
-2.56	-3.2712138	5.2477259
-0.9989708	-1.0261495	1.58687114
-2.7729207	-2.9406429	5.87918365
-3.2581818	-5.0982345	10.9991524
-2.0747856	-1.6288284	1.64370702

Para apreciar de mejpr manera las variaciones de los cálculos mirar la (Figura 4.47), que se muestra a continuación.

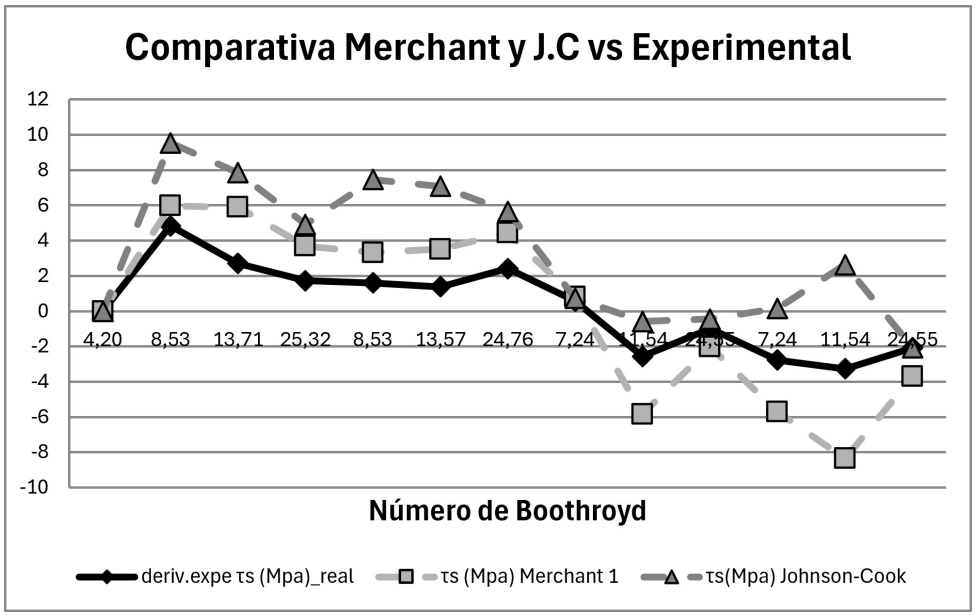


Fig. 4.47. Comparativa de pendientes Merchant y Johnson Cook vs Experimental

Para la siguiente (Tabla 4.40) se baso en la (Tabla 4.36) que pertenece al material Acero SAE 4130.

Tabla 4.40. Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con el valor experimental

Experimental τ_s **(MPa)**	**Merchant** τ_s **(MPa)**	**Johnson Cook** τ_s **(MPa)**
4.84282773	1.13903533	3.5569935
2.70500288	3.19494388	1.94327831
1.72263522	1.96753361	1.22601462
1.60851064	1.71687183	4.14386852
1.39007092	2.1257385	3.55900372
2.41276596	2.02904317	1.21935247
0.57091882	0.2340346	-0.0689404
-2.56	-3.2712138	5.2477259
-0.9989708	-1.0261495	1.58687114
-2.7729207	-2.9406429	5.87918365
-3.2581818	-5.0982345	10.9991524
-2.0747856	-1.6288284	1.64370702

Para el material Acero SAE 4130 la (Figura 4.48) se muestra a continuación.

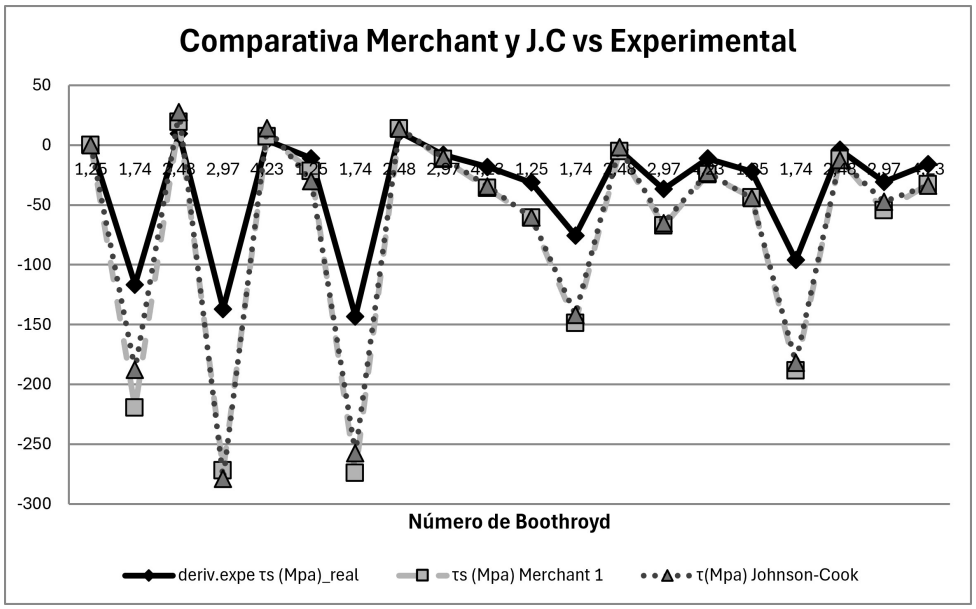


Fig. 4.48. Comparativa de pendientes Merchant y Johnson Cook vs Experimental

Para los resultados obtenidos, ver (Tabla 4.41) se basó en la (Tabla 4.37) que pertenece al material ASI 1045.

Tabla 4.41. Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con el valor experimental

Experimental τ_s **(MPa)**	**Merchant** τ_s **(MPa)**	**Johnson Cook** τ_s **(MPa)**
5,18976	5,135985239	-2,026500702
-1,99008	-1,986104286	0,381731061
0,00576	0,014734235	0,099350617
2,78784	2,79084599	-0,662278086
-0,89424	-0,889518028	0,26800128
-0,14976	-0,145484317	0,014351105
0,35424	0,357563312	-0,061182382

Para visualizar de mejor manera las trayectorias de los modelos, ver (Figura 4.49)

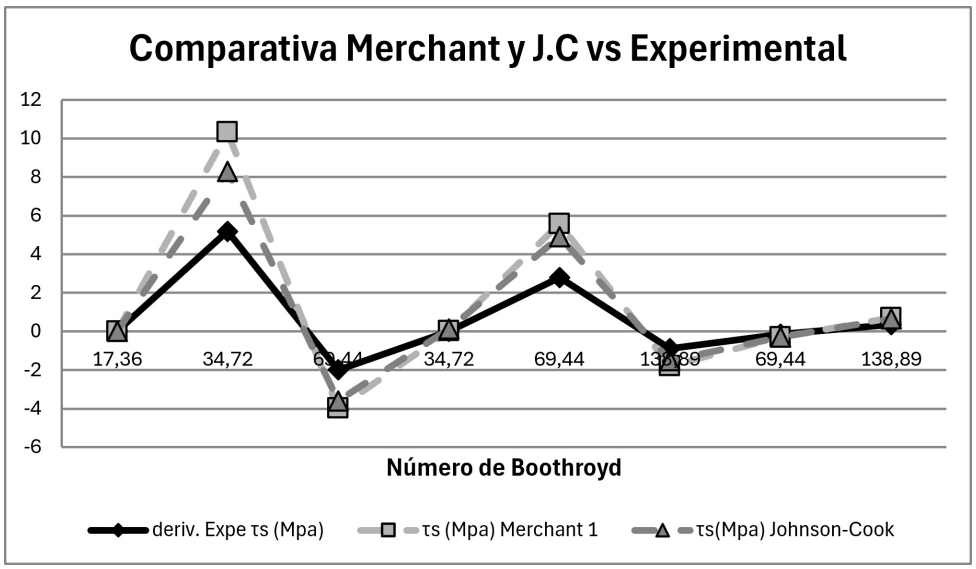


Fig. 4.49. Comparativa de pendientes Merchant y Johnson Cook vs Experimental

Y para la (Tabla 4.42) se basó en la (Tabla 4.38) que pertenece al material Al6082-T6.

Tabla 4.42. Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con el valor experimental

Experimental τ_s **(MPa)**	**Merchant** τ_s **(MPa)**	**Johnson Cook** τ_s **(MPa)**
0,185	0,183729906	-0,923197576
0,1665	0,16789446	-0,273612451
-0,148	-0,139327241	0,025852892
0,1295	0,140902958	-0,295307167
0,1665	0,18150212	-0,302242489
-0,074	-0,079723236	0,015572642
0,00925	0,008349388	-0,020561622

Para apreciar de mejor maner la ilustracion de los resultados obtenidos, ver (Figura 4.50)

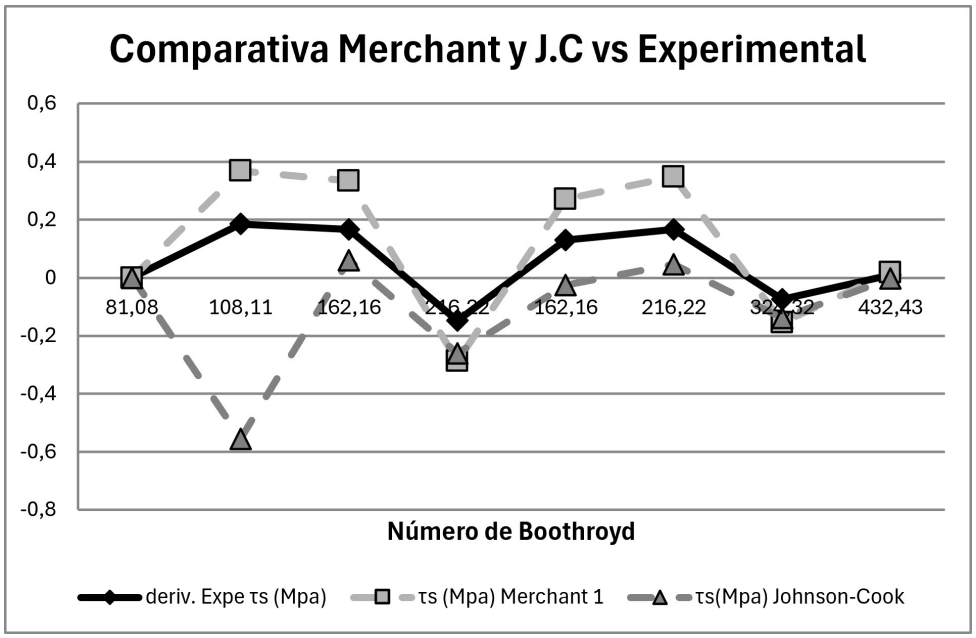


Fig. 4.50. Comparativa de pendientes Merchant y Johnson Cook vs Experimental

4.13 Cálculo del error de los esfuerzos

4.13.1 Porcentaje de error Acero NE 9445

Para la (Tabla 4.43) se extrajo de: Teoría del corte de metales material Acero NE 9445, que pertenece a la (Figura 4.43).

Tabla 4.43. Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Merchant τ_s (MPa)	**Error τ_s (%)**	**Johnson Cook τ_s (MPa)**	**Error τ_s (%)**	**Esfuerzo cortante τ_s Experimental (MPa)**
597,154575	1,90351117	375,731489	35,8819985	586
602,093785	0,80827262	391,155713	35,5591905	607
618,629522	0,38171956	401,213335	35,3923776	621
641,472821	0,07376303	415,447511	35,1875958	641
612,653901	0,21923435	345,889718	43,6661697	614
623,358513	0,37979272	363,811844	41,415162	621
646,064472	0,29869257	377,456979	41,7504662	648
641,96521	0,62150624	378,664513	40,6481954	638
627,909213	0,14501004	401,213335	36,0106323	627
614,555527	0,09047665	421,863913	31,2925223	614
665,458843	0,52248385	320,093669	51,647482	662
643,552367	0,68636317	367,355652	43,3093129	648
622,358513	0,21832257	388,745857	37,400023	621
PROMEDIO	**0,488**		**39,16635**	

4.13.1.1 Análisis esfuerzo cortante Acero NE 9445

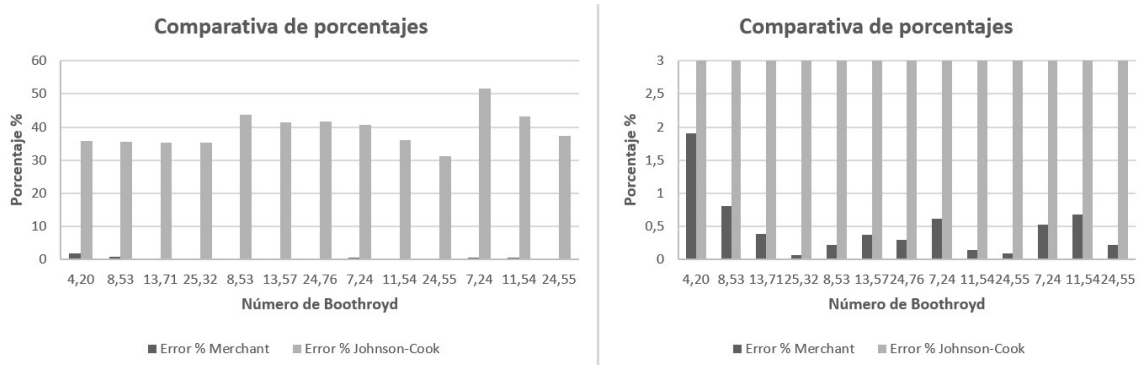


Fig. 4.51. Comparación del error porcentual obtenido por los diferentes modelos matemáticos en la estimación del esfuerzo cortante para el acero NE 9445- Esfuerzo cortante

La (Figura 4.51) presenta el análisis comparativo del porcentaje de error predictivo para el esfuerzo cortante τ_s del Acero NE 9445 utilizando las formulaciones de Merchant y Johnson-Cook. Los resultados mostraron la precisión del modelo de Merchant, el cual alcanza un ajuste con un error promedio de apenas 0.488 % . Por el contrario, la ecuación constitutiva de Johnson-Cook indicó un desempeño menor para este escenario, registrando una desviación promedio del 39.166 %, lo que evidencia sus limitaciones predictivas frente al comportamiento experimental de este material.

4.13.2 Porcentaje de error SAE 4130

Para la (Tabla 4.44) pertenece al mismo documento, pero de material Acero SAE 4130 de la (Figura 4.44).

Tabla 4.44. Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Merchant τ_s (MPa)	**Error τ_s (%)**	**Johnson Cook τ_s (MPa)**	**Error τ_s (%)**	**Esfuerzo cortante τ_s Experimental (MPa)**
563,61956	1,2925469	434,96307	23,82433	571
513,16495	0,1624618	450,5692	12,340623	514
520,58749	0,0791758	456,48036	12,383807	521
454,52125	0,1148126	453,21505	0,1728967	454
458,56367	0,0950613	461,83709	0,6181014	459
490,26367	0,3529118	486,84315	1,0481405	492
426,17992	0,9905032	495,03758	17,307483	422
428,38395	0,375825	495,03758	15,125018	430
426,56549	0,1327436	495,57235	16,331537	426
404,33197	0,3305145	497,70971	23,501168	403
492,56724	0,6920888	496,33601	0,0677442	496
456,87393	0,4631959	499,61566	8,8487278	459
455,98813	0,0026027	502,05182	10,099083	456
440,98037	0,6804503	503,11637	14,866751	438
424,36732	0,0866312	504,63576	19,017869	424
488,49406	0,3073347	506,38097	3,3430556	490
443,22927	0,0517539	509,71304	15,059378	443
437,51693	0,5643342	509,10788	15,706337	440
425,7767	0,1827521	512,73413	20,643326	425
404,66129	0,0836311	511,52666	26,30288	405
PROMEDIO	**0,35488**		**12,835**	

4.13.2.1 Análisis esfuerzo cortante Acero SAE 4130

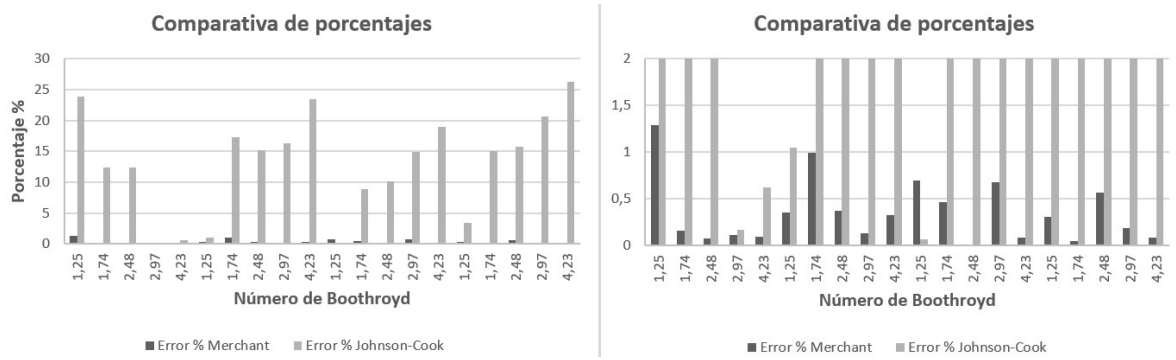


Fig. 4.52. Error porcentual de los modelos predictivos en la estimación del esfuerzo cortante para el acero SAE 4130, permitiendo comparar los valores alcanzados por cada modelo respecto a los datos experimentales- Esfuerzo cortante

La (Figura 4.52) detalla el porcentaje de error predictivo para el esfuerzo cortante τ_s del acero SAE 4130 con los modelos de Merchant y Johnson-Cook. El modelo de Merchant indicó un error promedio de apenas 0.35488 %. Por su parte, la formulación constitutiva de Johnson-Cook arrojó un desempeño inferior al promediar una desviación del 12.835 %, reflejando una menor capacidad de adaptación.

4.13.3 Porcentaje de error AISI 1045

Para la (Tabla 4.45) pertenece al documento A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining material AISI 1045, de la (Figura 4.45).

Tabla 4.45. Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Merchant τ_s (MPa)	**Error τ_s (%)**	**Johnson Cook τ_s (MPa)**	**Error τ_s (%)**	**Esfuerzo cortante τ_s Experimental (MPa)**
559,0936718	0,106297539	553,7236864	0,855203861	558,5
648,2600822	0,052407932	518,5413826	20,05220743	648,6
579,2981278	0,034835586	531,7959333	8,231935577	579,5
578,7865224	0,088637597	528,3462591	8,795743287	579,3
675,6908971	0,060509234	505,3504923	25,25506696	676,1
613,9188118	0,013222836	523,9616923	14,6642195	614
624,0218894	0,060555836	522,9650878	16,24518133	624,4
648,8526749	0,022700323	518,7163113	20,07452831	649
PROMEDIO	**0,05426**		**14,275**	

4.13.3.1 Análisis esfuerzo cortante AISI 1045

Los Errores para este material tienen un error menor al 1 %, además su promedio abarca un 0,054, lo que hace innecria su comparación con el modelo comparado

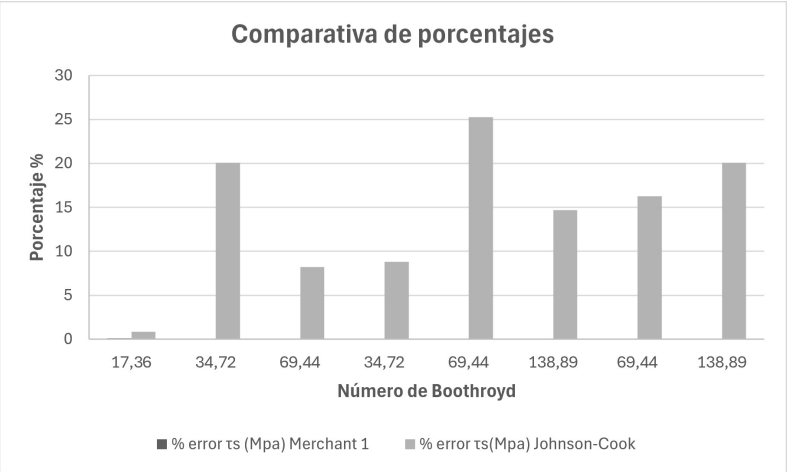


Fig. 4.53. Comparación del error porcentual asociado a las predicciones del esfuerzo cortante realizadas por los diferentes modelos matemáticos para el acero AISI 1045- Esfuerzo cortante

La (Figura 4.53) presenta el análisis comparativo del porcentaje de error predictivo para el esfuerzo cortante τ_s del acero AISI 1045 de Merchant y Johnson-Cook. El modelo de Merchant logró un error promedio de apenas 0.05426 %. Por el contrario, la ecuación de Johnson-Cook indicó un rendimiento inferior al promediar una desviación del 14.275 %, lo que evidencia sus limitaciones predictivas para modelar con precisión el comportamiento de este material.

4.13.4 Porcentaje de error Al 6082-T6

Para la (Tabla 4.46) pertenece al mismo documento material Al 6082-T6, de la (Figura 4.46).

Tabla 4.46. Comparativa del esfuerzo cortante τ_s (MPa) junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental

Merchant τ_s (MPa)	**Error τ_s (%)**	**Johnson Cook τ_s (MPa)**	**Error τ_s (%)**	**Esfuerzo cortante τ_s Experimental (MPa)**
221,1060747	0,047997584	313,5251179	41,86656919	221
226,0717478	0,031746815	288,5738321	27,68753631	226
235,147124	0,062605965	273,7839698	16,50381695	235
227,6159218	0,271331196	275,1814235	21,22529669	227
219,9995457	0,000206501	291,143973	32,33816957	220
229,8104711	0,353917518	274,8065412	20,00285643	229
221,1917429	0,086761507	276,4900701	25,10862899	221
222,0943795	0,042513278	274,267192	23,5437802	222
PROMEDIO	**0,112**		**26,03**	

4.13.4.1 Análisis esfuerzo cortante Al 6082-T6

Para mayor apreciación se realizó 2 Figuras con distinta escala, como se puede ver a continuación.

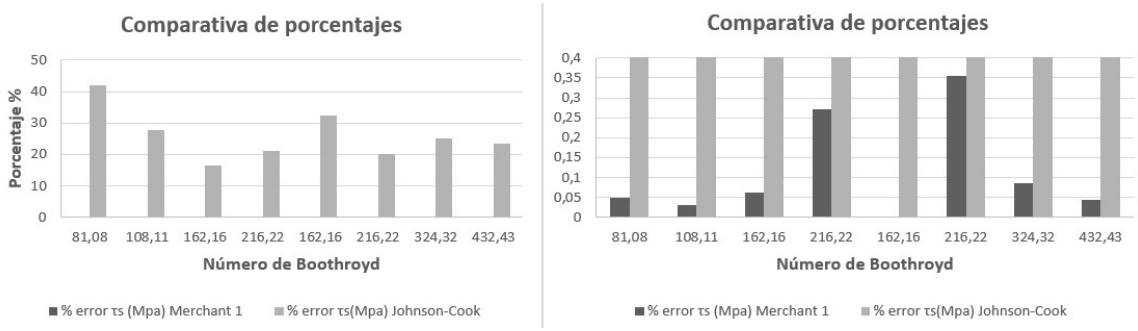


Fig. 4.54. Error porcentual de los modelos matemáticos empleados para estimar el esfuerzo cortante del aluminio 6082-T6, mostrando la diferencia entre los valores calculados- Esfuerzo cortante

La (Figura 4.54) presenta el análisis comparativo del porcentaje de error predictivo para el esfuerzo cortante τ_s (MPa) de la aleación de aluminio AL 6082-T6. Los resultados demostraron la precisión del modelo analítico de Merchant, el cual alcanza un error promedio de apenas 0.112 % . Por el contrario, la ecuación constitutiva de Johnson-Cook exhibe un desempeño menor en este escenario, registrando una desviación promedio del 26.03 %.

4.14 Cálculo de desgaste

Efecto que se define como la extracción de material de una superficie por el contacto e interacción con otra, el desgaste en flanco que actúa en la superficie de la herramienta y de cráter, esta se produce en la superficie de desprendimiento, ver (Figura 4.55) [57].

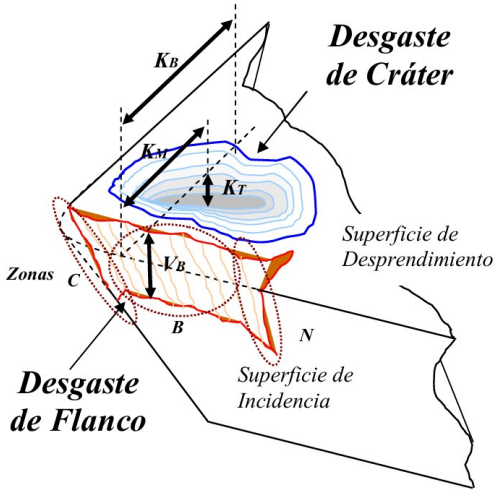


Fig. 4.55. Desgaste en Flanco V_B y Cráter K_T, extraído [16]

4.14.1 Taylor (Vida Útil)

Es la ecuación empírica más utilizada para relacionar la velocidad de corte con el tiempo de vida de la herramienta antes de que el desgaste de flanco alcance un límite crítico, ver (Ecuación 4.22) [12].

$$V \cdot T^n = C \tag{4.22}$$

Donde:

V = Velocidad de corte (m/min).

T= Vida útil de la herramienta (min), medida hasta alcanzar un criterio de desgaste límite.

n= Coeficiente empírico adimensional que depende del material de la herramienta de corte.

C= Constante de Taylor, un parámetro empírico que representa la velocidad de corte teórica necesaria para que la herramienta dure exactamente un minuto (m/min).

4.14.2 Modelo empírico de desgaste

Este modelo es una evolución directa de investigaciones de fricción y desgaste abrasivo/adhesivo macroscópico, como se observa en su forma base (Ecuación 4.23) [45] y [58]

$$\ln(VB) = \beta_0 + \beta_1 \ln(V) + \beta_2 \ln(t) \tag{4.23}$$

Donde β_0 es el logaritmo de tu constante k, y β_1, β_2 son exponentes m y q. Para este estudio se usó su forma de potencias, ver (Ecuación 4.24) y (Ecuación 4.25), ambas cumplen con la misma función de medir el desgaste pero se diferencia en que la velocidad de corte mide la velocidad lineal a la que el material pasa rozando el filo del inserto, es decir controla el calor [59] y [60]. En cambio las RPM miden cuántas vueltas da la pieza por minuto, es decir más realista en la

industria.

$$VB = k \cdot V^m \cdot t^q \tag{4.24}$$

$$VB = k \cdot V^m \cdot \text{RPM}^p \cdot t^q \tag{4.25}$$

Donde:

V= Velocidad de corte (m/min).

V_B= Desgaste de flanco (mm).

RPM= Velocidad de rotación del husillo.

t= Tiempo acumulado de corte.

k, m= Es un coeficiente empírico, indica el grado de sensibilidad del desgaste frente a los cambios de V.

p, q= Expresa la influencia de la velocidad de giro, define la cinética de crecimiento del desgaste.

Cabe mencionar que para poder usar estas ecuaciones Modelo A (Ecuación 4.24) y Modelo B (Ecuación 4.25) es necesario calibrar los coeficientes realizando una regresión lineal,porque este método permite predecir con precisión el desgaste de flanco (V_B) sin necesidad de medir la temperatura de interfase [45].

4.14.3 Desgaste por P. Mathew

La tasa temporal de desgaste en la herramienta de corte se puede modelar mediante una dependencia térmica de tipo Arrhenius, expresada formalmente en la (Ecuación 4.26):

$$\frac{dW}{dt} = A \exp\left(-\frac{B}{T_{int}}\right) \tag{4.26}$$

Donde $\frac{dW}{dt}$ representa la velocidad o tasa de desgaste respecto al tiempo, mientras que A y B corresponden a parámetros empíricos constantes [61]. El término T_{int} define la temperatura absoluta desarrollada en la interfase de contacto entre la herramienta y el material.

4.15 Cálculo de desgaste por método empírico

Para calcular por este método se realizo la debida calibración y así obtener una mayor exactitud de lo modelos A y B a la hora de comparar sus resultados con los presentados en el artículo: Utilización del Criterio de desgaste de Flanco y la Ecuación de Taylor para simular el tiempo de vida de una herramienta de corte mediante el proceso de torneado en CNC para un material AISI 1018 [45], donde su calibración se lo hizo mediante matlab y como resultado se obtuvo la (Tabla 4.47). Para su calibración fue a través de un archivo base en Matlab [62]

Tabla 4.47. Calibración de las constantes

Constantes	**Modelo A**	**Modelo B**
Constante k	0,001447	0,001865
Exponente m (V)	0,6861	0,688
Exponente p (RPM)	—	-0,0432
Exponente q (t)	-0,1768	-0,2241

La (Tabla 4.48) muestra los resultados obtenidos de la (Tabla 4.5) del artículo previamente mencionado.

Tabla 4.48. Comparativa del desgaste V_B mediante modelos predictivos (Modelo A y B)

Número de Boothroyd	Modelo A (mm)	Modelo B (mm)
27,582837	0,086875	0,086533
35,043074	0,101546	0,101451
37,236829	0,112344	0,113076
41,374255	0,123054	0,122786
52,407389	0,154418	0,154349

Para apreciar de mejor manera su variación respecto al valor experimental, ver (Figura 4.56)

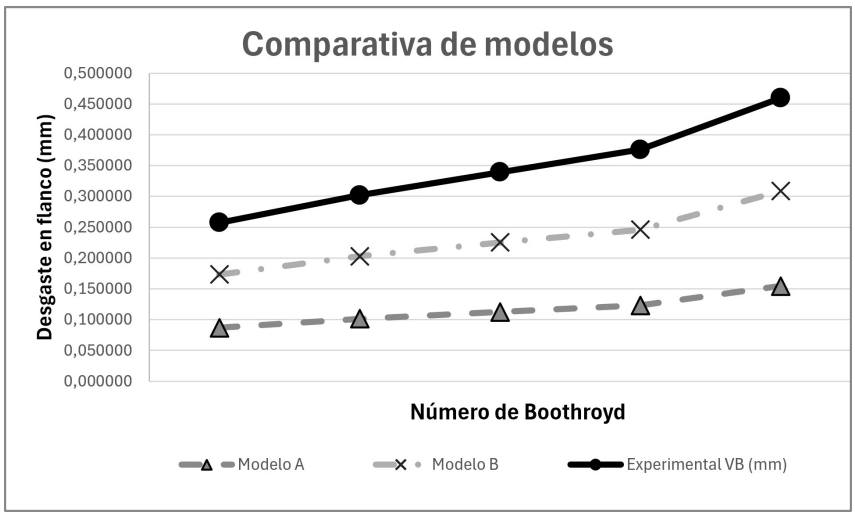


Fig. 4.56. Desgaste en Flanco V_B de Modelo A y Modelo B vs Experimental

4.15.1 Análisis comparativa de pendientes (desgaste)

A continuación se muestra los valores obtenidos mediante pendientes donde se obtuvieron los siguientes valores, ver (Tabla 4.49)

Tabla 4.49. Comparativa del desgaste V_B frente al valor experimental

Derivada Experimental	Derivada Modelo A	Derivada Modelo B
0,00201066	0,00196653	0,00199997
0,00683759	0,00492217	0,00529918
0,00386714	0,0025887	0,00234667
0,00190336	0,00284268	0,00286074

Para apreciar de mejor manera la variación de sus pendientes, respecto una de la otra, ver (Figura 4.57) donde se encuentran los 2 modelos comparándolas de manera directa con el valor experimental.

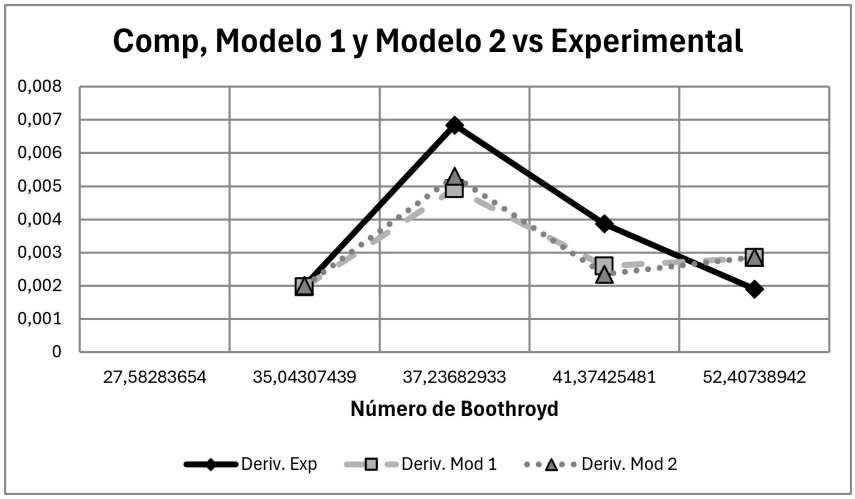


Fig. 4.57. Desgaste en Flanco V_B de Modelo A y Modelo B vs Experimental

4.15.2 Cálculo del error

Para determinar el modelo que tiene una mayor eficiencia respecto al valor del desgaste experimental se calculó lo siguiente, ver (Tabla 4.50)

Tabla 4.50. Comparativa del desgaste V_B junto con sus respectivos porcentajes de error frente al valor experimental.

Modelo A	Error (%)	Modelo B	Error (%)	Desgaste Experimental
0,08687502	3,42263983	0,08653307	3,01555923	0,084
0,10154578	2,57149941	0,10145130	2,47606259	0,099
0,11234382	1,45278858	0,11307640	0,81017224	0,114
0,12305437	5,34279615	0,12278572	5,54944639	0,130
0,15441803	2,26359365	0,15434867	2,21766332	0,151
PROMEDIO	**3,01066**		**2,81378**	

4.15.2.1 Análisis AISI 1018, filo Nro 1 inserto 4215

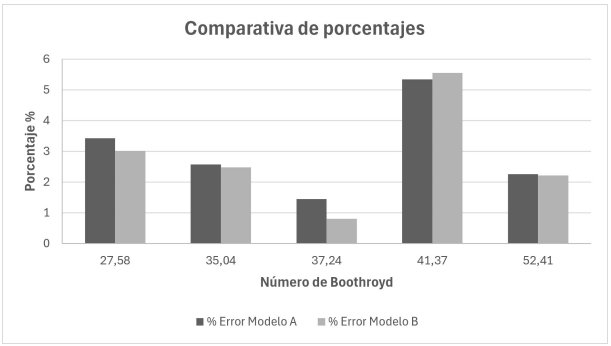


Fig. 4.58. Error porcentual obtenido por los modelos predictivos, mostrando diferencia entre los valores calculados y los resultados experimentales- Desgaste en flanco V_B

La (Figura 4.58) detalla el porcentaje de error para el desgaste de flanco V_B del acero AISI 1018 evaluado bajo dos modelos matemáticos distintos. Los resultados reflejaron un nivel de exactitud, donde el Modelo B consolida el mejor desempeño con un error promedio de apenas 2.81378 %. Por otro lado el Modelo A demostraron también una aproximación respecto al comportamiento real observado en los ensayos experimentales al registrar una desviación promedio de 3.01066 %.

4.16 Selección de modelos óptimos

Después de evaluar los diferentes modelos matemáticos mediante error porcentual, se observó que ninguno de ellos presenta el mejor comportamiento, debido a que se llegó a notar que un modelo alcanzaba un porcentaje mayor al 100. Por esta razón, en lugar de utilizar un único modelo durante todo el proceso de mecanizado, se propuso una metodología que combina los modelos con mejor estimación.

Tabla 4.51. Comparativa de modelos en función del cálculo del error obtenido por cada variable evaluada

Variable	Modelo Seleccionado	Criterio	Tipo de validación
Ángulo de cizalladura	Merchant usando r_c	Menor error	Comparación literatura
Fuerza de corte	Modelo 1	Menor error	Comparación literatura
Fuerza de empuje	Modelo 1	Menor error	Comparación literatura
Esfuerzo cortante	Johnson Cook	Comportamiento del material	Comparación literatura
Número de Boothroyd	Boothroyd	Indicador térmico	Cálculo térmico
Desgaste	Desgaste por Modelo B	Menor error	Experimental (microscopio)

Cabe mencionar que la validación del modelo combinado se realizó mediante dos enfoques. Para el ángulo de cizalladura, se empleó el modelo Merchant (Ecuación 4.2) seleccionado a partir de la comparación con resultados experimentales reportados en la literatura, porque presentó el menor error porcentual entre los modelos evaluados. Por otra parte, el desgaste de flanco fue validado experimentalmente utilizando los datos obtenidos durante los ensayos de mecanizado y las mediciones realizadas mediante el microscopio.

Las variables restantes fueron evaluadas mediante la comparación de los errores porcentuales obtenidos con respecto a los resultados experimentales reportados en la literatura. Para las fuerzas de corte F_c y F_t el modelo de cizallamiento desigual (unequal division shear-zone model) de Li, Wang, Hu y Li [53], que hace referencia a Merchant, además presenta menor error respecto a los modelos con el que se comparó.

Para la variable de Esfuerzo cortante τ_s el modelo de Johnson Cook por su capacidad de

estimar el comportamiento del material en situaciones reales (Ecuación 2.12). Y finalmente el número de Boothroyd al ser adimensional se lo usó como variable independiente (x) para comparar. El desgaste V_B evidencia el Modelo B sobre el Modelo A (Empírico) (Ecuación 4.24) porque sus resultados reportados en la literatura tuvieron menor error respecto a los otros modelos de desgaste.

4.16.1 Propuesta del modelo combinado

La propuesta del modelo combinado integra el modelo Merchant (Ecuación 4.2) para la estimación del ángulo de cizalladura y el Modelo A (Ecuación 4.24), que fue previamente validado con la literatura y para la estimación del desgaste de flanco, a pesar que durante la evaluación bibliográfica el Modelo B presentó el menor error porcentual promedio, la recalibración de las constantes con los datos experimentales obtenidos evidenció que el Modelo A alcanzó una mayor precisión para estimar el desgaste de flanco. Por ello, el Modelo A fue seleccionado para integrar la propuesta del modelo combinado.

A continuación se presenta la secuencia de cálculo propuesta, donde se ingresan las condiciones de mecanizado y las propiedades del material. Posteriormente se determina el comportamiento térmico mediante el número de Boothroyd y se aplican los modelos matemáticos seleccionados para estimar el ángulo de cizalladura y el desgaste de flanco. A continuación, se detalla la secuencia de parámetros e hitos metodológicos aplicados en el modelo predictivo:

1. Parámetros de corte (Entrada):

- Material de la pieza.
- Velocidad de corte, V (m/min).
- Avance, f o t_1 (mm/rev).
- Profundidad de corte, a_p o w (mm).
- Ángulo de ataque de la herramienta, α (°).

- Geometría de la herramienta.

2. **Modelo para el desgaste de flanco:**

   - Selección del modelo empírico de desgaste basado en literatura.
   - Ajuste de parámetros según las condiciones operativas.

3. **Resultados del modelo combinado:**

   - Estimación del desgaste de flanco (V_B).
   - Validación experimental contra datos de ensayos.
   - Determinación del error porcentual.

4.16.1.1 Parámetros de usados para el mecanizado

Los parámetros de mecanizado para el material AISI 1018 fueron sacados de la literatura especializada. Además se uso el inserto GTN3 para este experimento y calibrado mediante Matlab [62].

Tabla 4.52. Calibración de las constantes

Constantes	Modelo A
Constante k	0,005331
Exponente m (V)	0,7750
Exponente q (t)	0,0532

Tabla 4.53. Parámetros de entrada para el mecanizado en Acero AISI 1018, inserto GTN3

Ensayo	**V (m/min)**	t_1 **(mm/rev)**	**RPM (máximo)**	T **(min)**	V_B **experimental (**μ**m)**
1	120	0,10	1415	0,1212	156
2	120	0,14	1415	0,0866	231
3	120	0,15	1415	0,0808	172
4	160	0,10	1886	0,0909	256
5	160	0,14	1886	0,0649	262
6	160	0,15	1886	0,0606	256
7	186	0,10	2193	0,0782	278
8	186	0,14	2193	0,0558	226
9	186	0,15	2193	0,0521	172

Los resultados del desgaste de flanco experimental (V_B) recopilados en la (Tabla 4.53) fueron recopilados mediante inspección microscópica. Como muestra representativa del procedimiento, en la (Figura 4.59) se observan las micrografías de los insertos correspondientes a los ensayos 1 y 8, donde se aprecia la zona de desgaste para el análisis.

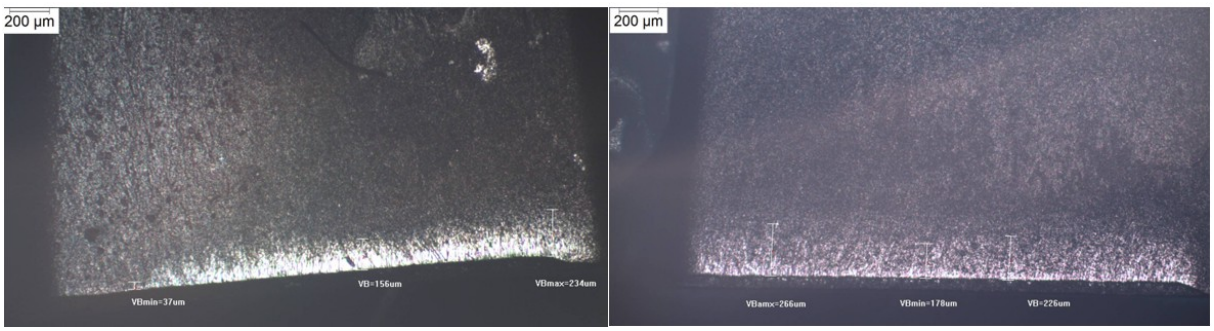


Fig. 4.59. Desgaste en flanco V_B, Ensayos 1 y 8 [Fuente: propia]

4.16.1.2 Validación de modelo combinado

Tabla 4.54. Resultados obtenidos

Número de Boothroyd	Experimental (μm)	Modelo A (μm)	Error (%)
7,3554	156	194,7227	24,8222
10,2976	231	191,2714	17,1985
11,0331	172	190,5673	10,7950
9,8072	256	239,6609	6,3824
13,7301	262	235,4036	10,1513
14,7108	256	234,5466	8,3802
11,4009	278	267,1775	3,8930
15,9613	226	262,4232	16,1164
17,1014	447	261,4671	52,0153

A continuación se presenta la (Figura 4.60) para poder observar de mejor manera la comparativa del gráfico que se obtuvo.

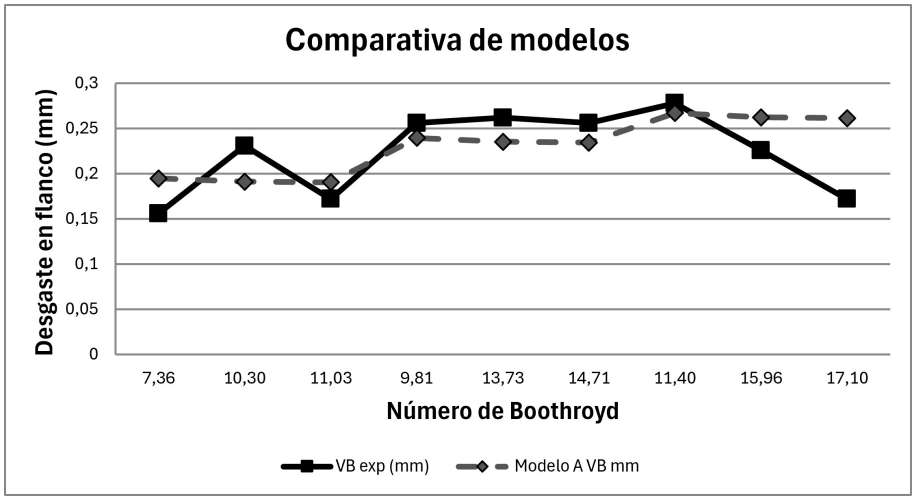


Fig. 4.60. Comparativa de Desgaste en flanco V_B Modelo A vs Experimental

4.16.1.3 Análisis de pendiente

Para determinar la tendencia de la gráfica se tiene la (Tabla 4.55) que muestra el siguiente comportamiento.

Tabla 4.55. Resultados obtenidos de pendientes

Derivada Experimental	Derivada Modelo A
0,0255	-0,0012
-0,0802	-0,0010
-0,0685	-0,0400
0,0015	-0,0011
-0,0061	-0,0009
-0,0066	-0,0099
-0,0114	-0,0010
-0,04736	-0,0008

La (Figura 4.61) presenta la tendencia al cual sigue los resultados del Modelo A.

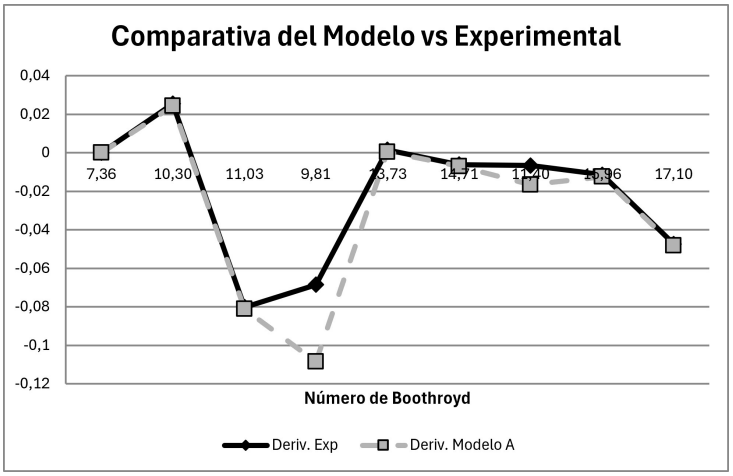


Fig. 4.61. Comparativa de Desgaste en flanco V_B Modelo A vs Experimental

4.16.1.4 Análisis Modelo 2 (Empírico) desgaste en flanco

La (Figura 4.62) detalla el porcentaje de error para AISI 1018, cabe mencionar que el error pormedio es de (15.47 %)

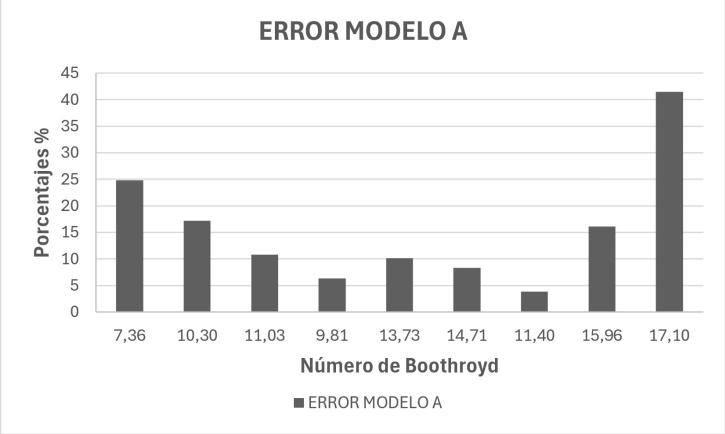


Fig. 4.62. Comparación del error porcentual en predicciones del modelo combinado, en cada una de las condiciones de corte analizadas. Desgaste en flanco V_B Modelo A

En los primeros ensayos, donde las velocidades de corte son menores y el desgaste experimental varía entre 156 y 231 µm, el modelo mantiene una desviación reducida. De igual forma, para velocidades de 160 y 186 m/min se aprecia una dispersión en aquellos casos donde el desgaste cae, como ocurre en el ensayo 9 con un valor experimental de 172 µm.

Los resultados muestran un error mínimo de 3,89 % en el ensayo 7 y un error máximo de 41,51 % en el ensayo 9. De los nueve ensayos realizados, cinco presentaron errores inferiores al 10 %, mientras que ocho ensayos registraron errores inferiores al 25 %. El modelo combinado tiene una buena capacidad predictiva para condiciones normales de mecanizado; sin embargo, cuando el desgaste aumenta considerablemente, esto se debe a que posiblemente intervienen fenómenos adicionales asociados al deterioro y el modelo disminuye su precisión como en el ensayo 9.

4.16.1.5 Validación del modelo mediante las constantes originales reportadas en la literatura

A continuación se valida con las constantes originales de la (Ecuación 4.27) propuesta por Choudhury y El-Baradie, del acero EN24 perteneciente a: Tool life prediction model by design of experiments for turning high strength steel [59], con el fin de comparar los valores estimados de desgaste de flanco con los resultados experimentales del acero AISI 1018.

$$VB = 0{,}00595 \cdot V^{1{,}38} \cdot t^{0{,}62} \tag{4.27}$$

La (Tabla 4.56) muestra los resultados de la operación que se llevó a cabo notando un alto porcentaje de error como se lo puede observar.

Tabla 4.56. Resultados obtenidos

Número de Boothroyd	Experimental (mm)	Modelo Autores (mm)	Error (%)
7,3554231	0,156	1,190032	662,84115
10,297592	0,231	0,966158	318,25024
11,033135	0,172	0,925512	438,08846
9,8072308	0,256	1,480854	478,45847
13,730123	0,262	1,201695	358,66221
14,710846	0,256	1,151690	349,87888
11,400906	0,278	1,660478	497,29409
15,961268	0,226	1,346970	496,00457
17,101359	0,172	1,290875	188,78637
PROMEDIO			**420,918**

Con estos datos que se nota variaciones en los datos, por ende no es necesario una imagen comparativa un de la otra, pero si es necesario la tendencia, ya que esta define como el modelo

se comporta (tendencias), donde se tiene la (Figura 4.63) que muestra ligeras variaciones una de la otra.

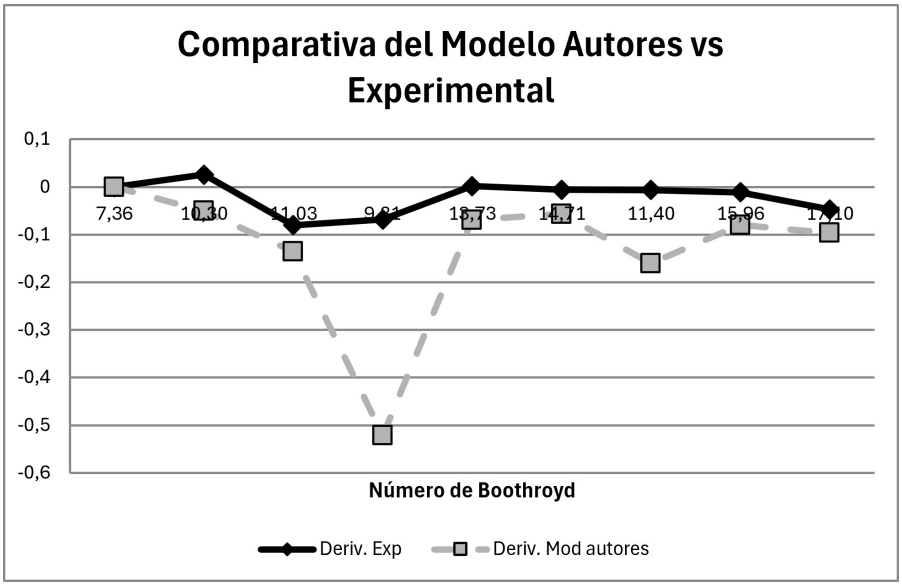


Fig. 4.63. Comparativa del comportamiento Desgaste en flanco V_B Modelo Autores

4.16.1.6 Análisis de caso (constantes propias de autores)

La (Figura 4.63) muestra el comportamiento del modelo utilizando las constantes originales propuestas por Choudhury y El-Baradie para el acero EN24. Se observa que, aunque el modelo mantiene una tendencia similar los valores estimados presentan una desviación considerable frente a los resultados experimentales obtenidos para el acero AISI 1018.

Los resultados de la (Tabla 4.56) evidencian un error promedio de 420,92 %, con valores de 188,79 % y 662,84 %, lo que demuestra una tendencia a sobrevalorar el desgaste de flanco en todos los ensayos realizados. Esta diferencia se debe a que las constantes empíricas fueron obtenidas mediante ajuste para un acero EN24.

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las principales conclusiones y aportaciones en del desarrollo de la presente investigación. Las conclusiones están de acuerdo con cada una de las variables evaluadas, con el propósito de demostrar los principales hallazgos obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones correspondientes al modelo combinado propuesto, así como las recomendaciones y posibles líneas de investigación para trabajos futuros.

4.17 Sobre las Fuerzas en el mecanizado

El análisis comparativo de las fuerzas de corte F_c y de empuje F_t, sugiere que la precisión de los modelos predictivos depende tanto del material mecanizado como de la formulación empleada.

- En los aceros NE9445 y SAE 4130, los Modelos 1 y 3 Ecuaciones (4.14 y 4.19) presentaron los menores errores porcentuales promedio, alcanzando desviaciones inferiores al 1 % para el acero SAE 4130 y mostrando una alta similitud con los valores experimentales
- Al contrario, el Modelo 2 (Ecuación 4.17) presentó mayores diferencias en la exactitud de la fuerza de empuje del acero SAE 4130, donde el error promedio alcanzó el 183 %, lo que evidencia limitaciones en su aplicación bajo esas condiciones de mecanizado.
- Para el acero AISI 1045 el Modelo 2 mostró el mejor desempeño tanto en la fuerza de corte como en la fuerza de empuje, con errores promedio de 10,73 % y 10,20 %, superando al Modelo 1, mientras que en la aleación de aluminio AL 6082-T6 el Modelo 1 proporcionó un ajuste con mayor similitud a los datos experimentales.

Los resultados permiten concluir que ningún modelo debe considerarse de manera general para la predicción de las fuerzas de mecanizado, a pesar de que el modelo 1 en esta investigación presentó un menor error, su desempeño depende de las propiedades mecánicas del material y las

condiciones específicas en el proceso de mecanizado, además del enfoque que se emplean en cada formulación.

4.18 Sobre el Esfuerzo Cortante en el mecanizado

El análisis del esfuerzo cortante τ_s demostró que el modelo analítico de Merchant (Modelo independiente Ecuación 4.21) presentó la mayor capacidad predictiva en los cuatro materiales evaluados (Acero NE9445, Acero SAE 4130, AISI 1045 y Al 6082-T6).

- Registrando errores porcentuales promedio inferiores al 0,5 % respecto a los valores experimentales reportados en la literatura, obteniendo errores porcentuales promedio de 0,488 % para el acero NE9445, 0,355 % para el acero SAE 4130, 0,054 % para el acero AISI 1045 y 0,112 % para la aleación de aluminio Al 6082-T6.
- El modelo basado en la ecuación constitutiva de Johnson-Cook presentó desviaciones mayores, con errores promedio comprendidos entre el 12,84 % y el 39,17 %, tales como 39,166 %, 12,835 %, 14,275 % y 26,030 %, lo que evidencia una menor precisión para la estimación directa del esfuerzo cortante bajo las condiciones analizadas.

Los resultados demuestran que el modelo de Merchant tiene más precisión del esfuerzo cortante en corte ortogonal para los materiales analizados, debido a que se basa en el equilibrio de fuerzas sobre el plano de cizalladura.

En contraste, el modelo de Johnson-Cook presentó una mayor variación, ya que estima el esfuerzo a partir del comportamiento constitutivo del material, la deformación plástica, la velocidad de deformación y la temperatura. Estas diferencias dan a entender que el desempeño de ambos modelos depende del enfoque al cual se someten, siendo el modelo de Merchant el que mostró la menor desviación respecto a los valores de referencia bajo las condiciones evaluadas.

4.19 Sobre el modelo combinado

Es una unión de dos caminos distintos para predecir lo que pasa cuando se corta un material.

4.19.1 Sobre el ángulo de cizalladura en el mecanizado

El análisis comparativo del ángulo de cizalladura φ también permitió comprobar que la precisión depende de la formulación empleada y de las propiedades mecánicas del material analizado.

- Los resultados obtenidos para el acero NE 9445 permitieron determinar que el modelo 2 Merchant (Ecuación 4.2) presentó la mejor capacidad predictiva al registrar el menor error porcentual promedio (17,28 %). A diferencia del modelo Oxley et al. (Ecuación 2.9) obtuvo el mayor error promedio (97,71 %), evidenciando una menor capacidad para el comportamiento del ángulo de cizalladura en este material.
- Para el acero SAE 4130, el modelo 2 Merchant (Ecuación 4.2), alcanzó un error promedio de apenas 0,24 %, mientras que el modelo Wang et al. (Ecuación 4.6) presentó la desviación con un error promedio de 60,11 %. Estos resultados demuestran que Merchant reproduce adecuadamente el comportamiento experimental para este acero.
- En el acero AISI 1045, nuevamente el modelo 2 Merchant obtuvo el mejor desempeño al registrar un promedio de 0,14 %. Por el contrario, el modelo Wang et al. (2020) presentó la menor precisión, con un error promedio de 49,55 %.
- Para el aluminio AL 6082-T6, el modelo 2 Merchant alcanzó un error promedio de únicamente 0,01 %, mientras que el modelo Oxley et al. (1961) presentó el mayor error promedio (79,89 %), reflejando una baja capacidad de estimación.

Cabe destacar que el modelo 2 Merchant (Ecuación 4.2) presentó los menores errores porcentuales debido a que emplea la razón de corte r_c, parámetro obtenido mediante la medición

experimental del espesor de la viruta, es decir refleja la deformación real del material durante el mecanizado por las condiciones de corte y las propiedades mecánicas del material.

Por lo tanto, se concluye que no se debe asumir una fórmula como general para determinar el ángulo de cizalla, ya que esta depende de otros factores que afectan al resultado de la ecuación.

4.19.2 Sobre el Desgaste en flanco en el mecanizado

A partir de los resultados obtenidos del Modelo A (Ecuación 4.24), se realizó el análisis de su capacidad predictiva considerando los errores porcentuales y la tendencia de los datos experimentales.

- Se validó el modelo combinado mediante la comparación entre los valores experimentales y los calculados durante el mecanizado del acero AISI 1018. La validación presentó un error mínimo de 3,89 % y un error máximo de 41,51 %, observándose que el 55,56 % de los ensayos registraron errores inferiores al 10 % y el 88,89 % errores inferiores al 25 %.
- La mayor discrepancia se presentó en el ensayo 9, donde el modelo subestimó el desgaste experimental; sin embargo, en términos generales, el modelo reprodujo satisfactoriamente la tendencia del desgaste de flanco, confirmando su utilidad como herramienta para estimar este parámetro bajo las condiciones de mecanizado analizadas.
- La validación del modelo utilizando las constantes originales propuestas por Choudhury y El-Baradie produjo una sobrevaloración del desgaste de flanco. Este resultado demuestra que los coeficientes empíricos de este tipo de modelos dependen del material y de las condiciones de mecanizado, por lo que su aplicación directa en materiales diferentes disminuye la precisión de la predicción.

Los resultados permiten concluir que el Modelo A (Ecuación 4.24) presenta una adecuada capacidad para estimar el desgaste de flanco durante el mecanizado del acero AISI 1018, siempre y cuando esté calibrado.

Sin embargo cuando el deterioro de la herramienta se incrementa, la precisión del modelo disminuye, debido a que intervienen fenómenos adicionales que no son asumidas por la formulación. En consecuencia, el modelo constituye una herramienta confiable para la predicción del desgaste de flanco bajo las condiciones de esta investigación.

El análisis realizado permitió establecer que la efectividad de los modelos matemáticos para la predicción de variables termomecánicas en corte ortogonal depende de la variable analizada, las propiedades del material, las condiciones de mecanizado y las hipótesis consideradas en cada formulación. Los resultados obtenidos muestran que ningún modelo individual presenta el mejor desempeño para todas las variables y materiales evaluados. Por esta razón, la selección e integración de modelos específicos, considerando su rango de aplicabilidad y contrastándolos con información experimental, constituye una estrategia más adecuada para representar el comportamiento del proceso de corte ortogonal.

RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliar la validación del modelo combinado en materiales con comportamientos termomecánicos diferentes a los analizados en este estudio, como superaleaciones, aleaciones de titanio o materiales compuestos, condiciones de mecanizado de alta velocidad, con el fin de establecer los límites de aplicación del modelo.

Se recomienda incorporar en futuras investigaciones variables adicionales como el coeficiente de fricción, el desgaste progresivo de la herramienta y las propiedades del material con la temperatura, con el fin de incrementar la capacidad predictiva del modelo combinado bajo condiciones reales de mecanizado.

Se recomienda evaluar la aplicación del modelo combinado en procesos de mecanizado diferentes al corte ortogonal, como el torneado oblicuo, fresado o taladrado, con el propósito de determinar si las relaciones establecidas conservan su capacidad predictiva bajo condiciones más complejas.

Se recomienda ampliar la validación experimental del modelo combinado mediante ensayos de mecanizado que contemplen diferentes velocidades de corte, avances y profundidades de pasada, permitiendo evaluar su comportamiento bajo un mayor rango de condiciones operativas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] B. S. Silva Albarracin e Y. A. Melo Cortés, "Evaluación de microestructura en probetas Jominy con Temple a temperaturas intercríticas más revenido para acero AISI SAE 8620," 2025.

[2] N. Marín, "Análisis termomecánico de la influencia del desgaste geométrico de las herramientas en procesos de corte ortogonal de aceros inoxidables austeníticos," 2010.

[3] J. M. García de Lomana Moralejo, "Estudio paramétrico del proceso de corte ortogonal mediante el método de los elementos finitos: Análisis de la influencia de la velocidad de corte y del coeficiente de fricción en los resultados numéricos a escala global y local," 2009.

[4] H. González Corvillo, "Estudio térmico y mecánico del corte ortogonal mediante elementos finitos con formulación de flujo," Consultado el: 25 de abril de 2025, Proyecto Fin de Grado, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2019. dirección: `https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/71955`

[5] M. Martos Nieto, "Simulación numérica del proceso de mecanizado con corte ortogonal de Inconel 718," Consultado el: 20 de abril de 2025, Trabajo de Fin de Grado, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2020. dirección: `https://e-archivo.uc3m.es/entities/publication/ab74ce60-4861-4f14-bc70-a2df381213a3`

[6] M. R. Vaziri Sereshk, P. Heydarizadeh y S. M. Mostafavi, "The Evaluation of Analytical Models for Orthogonal Cutting Process," en *International Conference of Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2015)*, Tehran, Iran: DEStech Publications, 2015, págs. 1-5.

[7] O. M. Borges, "Modelación del corte ortogonal utilizando la teoría predictiva de Oxley y el método de elementos finitos," Tesis de Maestría, Universidad de Matanzas Çamilo Cienfuegos", Matanzas, Cuba, 2013.

[8] H. D. Alvaro Simbaña y D. E. González Ulcuango, "Estudio del comportamiento de limado ortogonal del acero ASTM A-36 mediante un modelo numérico y su validación," Trabajo de Fin de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2021. dirección: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21874

[9] A. Mathivanan, M. P. Sudeshkumar, R. Ramadoss, C. Ezilarasan, G. Raju y V. Jayaseelan, "Finite Element Simulation and Regression Modeling of Machining Attributes on Turning AISI 304 Stainless Steel," inglés, *Manufacturing Review*, vol. 8, pág. 24, 2021. DOI: 10.1051/mfreview/2021022

[10] T. T. Truong et al., "Data-driven prediction of tool wear using Bayesian regularized artificial neural networks," *Measurement*, vol. 238, pág. 115 303, 2024.

[11] V. A. Erazo-Arteaga, C. D. Mejía-Echeverría y A. C. U. Criollo, "Metodologías para la predicción de la vida útil en herramientas de corte por arranque de viruta. Una revisión bibliográfica," *Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica*, vol. 4, n.º 3, págs. 1972-1989, 2024.

[12] F. W. Taylor, "On the art of cutting metals," *Transactions of the ASME*, vol. 28, págs. 31-248, 1906.

[13] P. G. Serrón Silveira, "Predicción de la capacidad última de pórticos de acero mediante la combinación de un análisis global plástico y de inestabilidad," 2025.

[14] E. H. Lee y B. F. Shaffer, "The theory of plasticity applied to a problem of machining," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 18, n.º 4, págs. 405-413, 1951. DOI: 10.1115/1.4010357

[15] Y. Karpat y T. Özel, "Multi-objective optimization for turning processes using neural network modeling and dynamic-neighborhood particle swarm optimization," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 35, n.º 3-4, págs. 234-247, 2007. DOI: 10.1007/s00170-006-0719-8

[16] F. R. Ramírez Paredes, "Modelización de la evolución del desgaste en herramientas de corte," Disponible en e-Archivo, Tesis doct., Universidad Carlos III de Madrid, oct. de 2015. dirección: https://hdl.handle.net/10016/22408

[17] A. Molinari y A. Moufki, “The Merchant’s model of orthogonal cutting revisited: A new insight into the modeling of chip formation,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 50, n.º 1, págs. 124-131, feb. de 2008. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2007.07.015

[18] A. Moufki, A. Molinari y D. Dudzinski, “Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 46, n.º 10, págs. 2103-2138, 1998. DOI: 10.1016/S0022-5096(98)00032-5

[19] C. Ni, J. Yang y H. Ding, “Mechanism and data hybrid-driven cutting forces prediction model for end milling,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 37, n.º 1, págs. 481-503, 2026.

[20] *Procesos de mecanizado convencionales: Teoría y práctica*. Ibarra, Ecuador: Editorial Académica, 2021, Guía de fundamentos y aplicaciones en el taller de mecánica industrial.

[21] S. I. Solís-Santamaría, T. M. Solís-Santamaría, H. G. Lasluisa-Naranjo y E. D. Albán-Andrade, “Evolución y utilidad del mecanizado CNC en el diseño industrial,” *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, vol. 6, n.º 11, págs. 42-55, oct. de 2023, ISSN: 2737-6249.

[22] D. M. Krahmer, *Procesos de arranque de viruta y no convencionales que se aplican en la industria metalmecánica*, Cuaderno Tecnológico Nro. 2, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Mecánica, Argentina, 2008.

[23] G. P. Mondragón, “Análisis de un proceso de corte ortogonal mediante el enfoque CEL con distintos radios de filo y ángulos de ataque de la herramienta,” Director de Tesis: Dr. Edgar Isaac Ramírez Díaz, Tesis de Grado, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México, México, 2025.

[24] J. V. Agüera, “Aplicación de redes neuronales artificiales en la obtención de modelos predictivos de la morfología de la viruta en el mecanizado en seco de aleaciones ligeras de uso aeronáutico,” Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz, Cádiz, España, 2024. dirección: https://rodin.uca.es/

[25] F. D. C. de Metales, *Teoría del Corte de Metales*, Documento Técnico / Manual de Referencia, Fundamentos de los procesos de arranque de viruta y mecánica del corte, 2024.

[26] M. V. Peña Meza, "Optimización de parámetros de mecanizado para mejorar la eficiencia energética en operaciones en tornos-IESTP región Junín," Tesis de Grado, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2023. dirección: https://repositorio.uncp.edu.pe/items/1b84089a-1a07-4ea5-8570-b835ac08a8e6

[27] J. R. Aguilera Nieves, J. R. Alas Hernández, R. V. Gutierrez, M. Rivas Santana y R. Quiza Sardiñas, "Modelado de un proceso de corte ortogonal a través del método de elementos finitos," en *CD de Monografías 2014*, Matanzas, Cuba: Universidad de Matanzas, 2014, ISBN: 978-959-16-2334-8.

[28] B. Li y R. Zhang, "Analytical prediction of cutting forces in cylindrical turning of 304 stainless steel using unequal division shear zone theory," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 124, págs. 3201-3215, 2023. DOI: 10.1007/s00170-022-10513-8

[29] S. Wang, T. Zhang, W. Deng, Z. Sun y S. To, "Analytical modeling and prediction of cutting forces in orthogonal turning: a review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, págs. 1407-1434, 2022. DOI: 10.1007/s00170-021-08114-y

[30] M. A. Prieto Juárez, E. Aguilera Gómez, H. Plascencia Mora, E. Ledesma Orozco, J. F. Reveles Arredondo y M. L. Campos Silva, "Finite Element Simulation and Experimental Analysis of Cutting Forces in Orthogonal Turning in AISI-1045 Steel," *Research in Computing Science*, 2024, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, ISSN: 1870-4069.

[31] S. Berezvai, T. G. Molnar, D. Bachrathy y G. Stepan, "Experimental investigation of the shear angle variation during orthogonal cutting," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, n.º 13, Part 2, págs. 26 495-26 500, 2018, 34th Danubia Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, 19 - 22 September 2017, Trieste, Italy, ISSN: 2214-7853. DOI:

https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.105 dirección: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785318320765

[32] H. Yanda, J. A. Ghani y C. H. Che Haron, "Effect of rake angle on stress, strain and temperature on the edge of carbide cutting tool in orthogonal cutting using FEM simulation," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 42, n.º 2, págs. 179-194, 2010.

[33] Y. Chen, H. Li y J. Wang, "Further Development of Oxley's Predictive Force Model for Orthogonal Cutting," *Machining Science and Technology*, vol. 19, n.º 1, págs. 86-111, 2015. DOI: 10.1080/10910344.2014.991026

[34] M. E. Merchant, "Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip," *Journal of Applied Physics*, vol. 16, n.º 5, págs. 267-275, 1945. DOI: 10.1063/1.1707586

[35] E. H. Lee y B. W. Shaffer, "The theory of plasticity applied to a problem of machining," Division of Applied Mathematics, Brown University, Providence, RI, USA, inf. téc., 1949.

[36] P. L. B. Oxley, "A strain-hardening solution for the "shear angleïn orthogonal metal cutting," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 3, n.º 1-2, págs. 68-79, 1961. DOI: 10.1016/0020-7403(61)90039-X

[37] J. Zouhar y M. Piska, "Modelling the orthogonal machining process using cutting tools with different geometry," *Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering*, 2008, Simulación basada en formulación Lagrangiana y modelo de material Johnson-Cook en LS-DYNA.

[38] L. R. Miller, "A Thermal-Mechanical Finite Element Analysis of Orthogonal Cutting for Normalized Steels," Master's Thesis, University of Connecticut, Storrs, CT, USA, 2020. dirección: https://digitalcommons.lib.uconn.edu/gs_theses/1485

[39] F. J. Zerilli y R. W. Armstrong, "Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations," *Journal of Applied Physics*, vol. 61, n.º 5, págs. 1816-1825, 1987. DOI: 10.1063/1.338024

[40] A. Pérez, “Investigación aplicada: base teórica y práctica,” *Revista Académica*, vol. 10, n.º 2, págs. 15-23, 2020.

[41] J. García, “Métodos documentales en investigación cualitativa,” *Anales Universitarios*, vol. 5, n.º 3, págs. 100-110, 2018.

[42] L. Rodríguez, “Diseños cuantitativos y análisis estadístico,” *Revista de Estadística*, vol. 12, n.º 4, págs. 78-86, 2021.

[43] S. Fernández, “Investigación analítica: teoría y práctica,” *Ciencia y Tecnología*, vol. 7, n.º 1, págs. 30-38, 2020.

[44] T. Özel y E. Zeren, “A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining,” en *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2004)*, vol. 47113, Anaheim, California, USA, 2004, págs. 573-581. DOI: 10.1115/IMECE2004-59176

[45] J. L. V. Robles y W. X. O. Garcés, “Utilización del Criterio de desgaste de Flanco y la Ecuación de Taylor para simular el tiempo de vida de una herramienta de corte mediante el proceso de torneado en CNC para un material AISI 1018,” 2011. dirección: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:170761721

[46] M. C. Shaw y J. O. Cookson, *Metal Cutting Principles*, 2nd. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2005.

[47] Z. Wang, J. Zhang, Z. Xu, J. Zhang, G. Li, H. Zhang et al., “Crystal anisotropy-dependent shear angle variation in orthogonal cutting of single crystalline copper,” *Precision Engineering*, vol. 63, págs. 41-48, 2020. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.01.006

[48] Steel Grades, *SAE 4130 Steel Properties*, Accedido el: 7 de mayo de 2026, 2025. dirección: https://www.steel-grades.com

[49] Xometry Resources, *AISI 1045 Carbon Steel*, Accedido el: 7 de mayo de 2026, 2025. dirección: https://www.xometry.com

[50] G. E. Totten, *Steel Heat Treatment Handbook*, 2nd. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.

[51] MakeItFrom, *Aluminium Alloy 6082-T6 Properties*, En línea. Accedido el: 7 de mayo de 2026, 2025. dirección: https://www.makeitfrom.com

[52] MW Components, *Carbon Steel Grade 1018 Data Sheet (AISI 1018 Steel, cold drawn)*, Elgin Division, Ficha técnica de material. Accedido el: 6 de julio de 2026, n.d.

[53] B. Li, X. Wang, Y. Hu y C. Li, "Analytical prediction of cutting forces in orthogonal cutting using unequal division shear-zone model," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 54, n.º 5-8, págs. 431-443, 2011. DOI: 10.1007/s00170-010-2940-8 dirección: https://doi.org/10.1007/s00170-010-2940-8

[54] W. Zhang, J. Liu, L. Yang, X. Zhang, H. Zhang y F. Gong, "Identification of the Constitutive Parameters of Viscosity and the Prediction of the Cutting Force of S32760 Duplex Stainless Steel under a High Strain Rate," *Applied Sciences*, vol. 13, n.º 11, 2023, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app13116823 dirección: https://www.mdpi.com/2076-3417/13/11/6823

[55] G. U. Pelayo y D. O. Trejo, *Procesos de mecanizado convencional*. España: Aula Magna Proyecto Clave McGraw-Hill, 2023, ISBN: 978-84-1914-436-2.

[56] L. Wuertemberger y A. N. Palazotto, "Evaluation of flow and failure properties of treated 4130 steel," *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, vol. 2, n.º 2, págs. 207-222, 2016.

[57] S. Jahamir, "On the wear mechanisms and the wear equations," en *Fundamentals of Tribology*, Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1978, págs. 455-467.

[58] S. Chinchanikar y S. K. Choudhury, "Predictive modeling for flank wear progression of coated carbide tool in turning hardened steel under practical machining conditions," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, n.º 5-8, págs. 1185-1201, 2015. DOI: 10.1007/s00170-014-6285-6

[59] I. Choudhury y M. El-Baradie, "Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (EN24)," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 77, n.º 1-3, págs. 319-326, 1998.

[60] F. Onoroh, M. Ogbonnaya y C. Echeta, “Experimental investigation of cutting parameters on a turning tool flank wear (Industrial and production engineering),” *Covenant Journal of Engineering Technology (Special Edition)*, 2018.

[61] P. Mathew, “Use of predicted cutting temperatures in determining tool performance,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 29, págs. 481-497, 1989.

[62] M. Cotacachi. “Script de Simulación en MATLAB.” Disponible en OneDrive de la Universidad Técnica del Norte, visitado 21 de jul. de 2026. dirección: https://utneduec-my.sharepoint.com/:u:/g/personal/mfcotacachis_utn_edu_ec/IQDCJYieY4hfRarr3swzhRke=4wlMp4

[63] Amardeep Steel Centre. “AISI 1018 Round Bar, Carbon Steel 1018 Rods Specification & Properties.” Accedido el 24 de julio de 2026. dirección: https://www.amardeepsteel.com/aisi-1018-round-bar.html

[64] Easson Vertex. “Insert GTN-3.” Accedido el 24 de julio de 2026. dirección: https://easson-vertex.com/product/insertgtn-3/

[65] Accusize Industrial Tools. “1.9 cm Accusize Industrial Tools Indexable Cut-off Parting Tool Set, GTN-3 Inserts (SKU: 2415-5030).” Accedido el 24 de julio de 2026. dirección: https://www.amazon.com.mx/dp/B07F8CDJQP

ANEXOS

4.20 Anexo A. Tablas completas de referencia

Teoría de corte de metales- Acero NE 9445

Tabla 4.57. Resultados experimentales de mecanizado - Acero NE 9445 (HB=187): Teoría de corte de metales [25]

t_1 (mm)	V (m/min)	α (grados)	r_c	φ (grados)	γ (deformación)	F_c (N)	F_t (N)	μ	τ_s (MPa)	σ (MPa)	W_t (Nm/m^3)	W_n (Nm/m^3)	W_n/W_t
0,094	60	10	0,29	17	3,4	1646	1214	586	793	1,05	2758	2013	0,73
0,094	122	10	0,33	19	3,1	1601	1259	607	945	1,11	2689	1834	0,68
0,094	196	10	0,37	21,5	2,7	1463	965	621	889	0,95	2455	1717	0,7
0,094	362	10	0,44	25	2,4	1348	747	641	896	0,81	2262	1551	0,69
0,094	122	-10	0,32	16,5	3,9	1850	1712	614	1055	0,64	3103	2358	0,76
0,094	194	-10	0,37	19	3,5	1708	1450	621	1048	0,58	2861	2151	0,75
0,094	354	-10	0,44	22	3,1	1583	1170	648	1062	0,51	2655	1993	0,75
0,001	165	10	0,33	19	3,1	565	449	710	1131	1,12	3206	2124	0,66
0,059	165	10	0,32	18,5	3,1	1076	827	638	965	1,08	2855	1979	0,69
0,094	165	10	0,37	21,5	2,7	1495	1005	627	903	0,96	2503	1717	0,69
0,2	165	10	0,44	25	2,4	2691	1401	614	800	0,76	2117	1476	0,70
0,001	165	10	0,73	12,5	5	805	881	710	1234	0,78	4578	3606	0,79
0,059	165	10	0,3	16	4	1312	1294	662	1186	0,7	3482	2655	0,76
0,094	165	10	0,37	19	3,5	1784	1557	648	1131	0,6	2992	2110	0,71
0,2	165	10	0,46	22,5	3,1	3105	2099	621	952	0,46	2441	1862	0,76

Teoría de corte de metales- Acero SAE 4130

Tabla 4.58. Datos experimentales- Acero SAE 4130: Teoría de corte de metales [25]

t_1 (mm)	V (m/min)	α (grados)	r_c	φ (grados)	γ (deformación)	F_c (N)	F_t (N)	μ	τ_s (MPa)	σ (MPa)	W_t (Nm/m^3)	W_n (Nm/m^3)	W_n/W_t
0,064	27	25	0,358	20,9	2,55	1690	996	1,46	571	717	2206	1441	0,65
0,089	27	25	0,366	21,5	2,48	2113	1250	1,46	514	662	1972	1241	0,63
0,127	27	25	0,407	24	2,23	2860	1588	1.38	521	690	1862	1165	0,63
0,152	27	25	0,345	20,1	2,65	3238	1770	1,36	454	596	1758	1207	0,69
0,216	27	25	0,383	22,4	2,38	4412	2451	1,38	459	576	1696	1096	0,65
0,064	27	35	0,527	31,6	1,56	1130	454	1,53	492	662	1476	772	0,52
0,089	27	35	0,528	31,9	1,55	1361	543	1,52	422	579	1269	665	0,52
0,127	27	35	0,529	32	1,55	1926	738	1,48	430	572	1255	665	0,53
0,152	27	35	0,533	32,2	1,54	2255	818	1,43	426	611	1227	658	0,54
0,216	27	35	0,532	32	1,55	3002	1041	1,38	403	558	1151	630	0,55
0,064	27	40	0,585	35,7	1,32	1032	316	1,54	496	652	1345	648	0,48
0,089	27	40	0,58	35,4	1,33	1317	387	1,5	459	581	1227	605	0,49
0,127	27	40	0,611	37,5	1,26	1833	498	1,44	456	600	1193	573	0,48
0,152	27	40	0,606	37,2	1,27	2113	565	1,42	438	621	1151	559	0,49
0,216	27	40	0,606	37,2	1,27	2820	681	1,35	424	573	1083	539	0,5
0,064	27	45	0,67	41,9	1,06	1032	302	1,83	490	790	1345	516	0,38
0,089	27	45	0,67	41,9	1,06	1268	343	1,74	443	681	1179	472	0,4
0,127	27	45	0,649	40,2	1,1	1717	418	1,64	440	601	1117	480	0,43
0,152	27	45	0,642	39,6	1,01	1970	454	1,6	425	557	1069	432	0,4
0,216	27	45	0,646	39,9	1,11	2584	520	1,51	405	507	993	448	0,45

A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining - AISI 1045

Tabla 4.59. Datos experimentales: A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining - AISI 1045 [44]

V (m/min)	$t1$ (mm)	t_c (mm)	ϕ (°)	F_C (N/mm)	F_T (N/mm)	$\bar{\varepsilon}_{AB}$	$\dot{\bar{\varepsilon}}_{AB}$	T_{AB}	τ_S (N/mm^2)	$\bar{\varepsilon}_{\text{int}}$	$\dot{\bar{\varepsilon}}_{\text{int}}$	T_{int}	k_{chip} (N/mm^2)	$\sigma_{N\,\text{máx}}$ (N/mm^2)	l_p (mm)	l_c (mm)	μ
100	0,125	0,4	16,9	350	325	1,07	5488	428	558,5	1,5	1,5	627	223,8	1234	0,54	2,5	0,94
200	0,125	0,3	21,8	325	225	0,87	16488	474	648,6	1,3	5,35	681	188,6	1396	0,33	2,25	0,65
400	0,125	0,3	21,8	300	225	0,87	17766	447	579,5	1,3	10,69	701	214,9	1401	0,33	1,875	0,72
100	0,25	0,7	19	625	450	0,97	5861	467	579,3	1,4	0,98	662	193,6	1024	0,86	3,75	0,71
200	0,25	0,55	23,5	625	375	0,82	10632	494	676,1	1,2	3,18	721	206,6	1386	0,58	3,05	0,57
400	0,25	0,5	25,5	550	325	0,78	12653	450	614	1,1	7,7	674	211,9	1450	0,49	2,55	0,56
100	0,5	1,1	23,5	1125	625	0,82	3399	458	624,4	1,2	0,79	649	192,9	1163	1,15	4,95	0,53
200	0,5	0,9	27,8	1050	500	0,73	4814	453	649	1,1	2,37	635	191,3	1447	0,83	4,05	0,44

A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining - Al 6082-T6

Tabla 4.60. Datos experimentales: A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining - Al 6082-T6 [44]

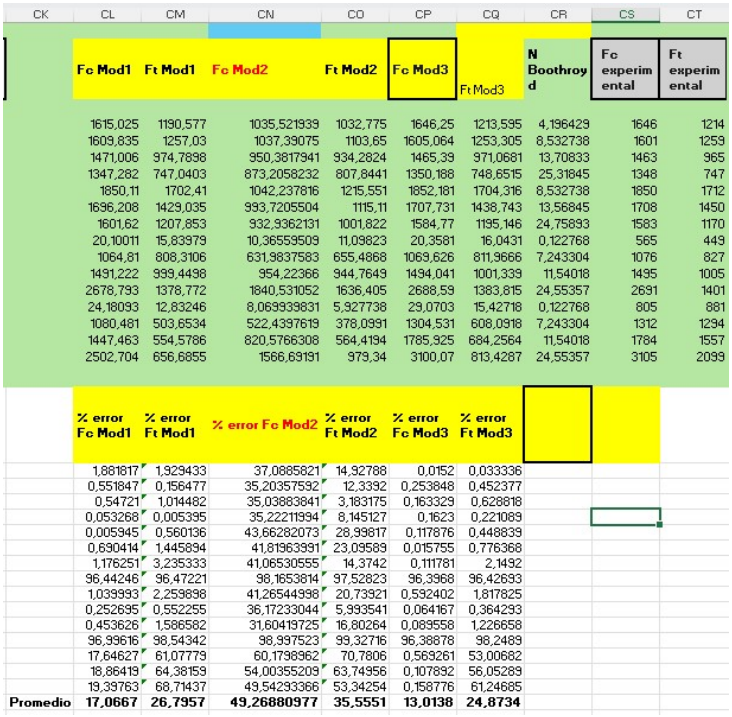
V (m/min)	$t1$ (mm)	t_c (mm)	ϕ (°)	F_C (N/mm)	F_T (N/mm)	$\bar{\varepsilon}_{AB}$	$\dot{\bar{\varepsilon}}_{AB}$	T_{AB}	τ_S (N/mm^2)	$\bar{\varepsilon}_{\text{int}}$	$\dot{\bar{\varepsilon}}_{\text{int}}$	T_{int}	k_{chip} (N/mm^2)	$\sigma_{N\,\text{máx}}$ (N/mm^2)	l_p (mm)	l_c (mm)	μ
180	0,2	0,52	21,92	180	130	0,7889	3298	175	221	2,3999	1,7081	269	88,2	409,2	1,0807	2,5817	1,4964
240	0,2	0,415	27,09	155	85	0,6642	8266	184	226	1,7651	5,3637	290	88,2	449,3	0,6344	1,9584	1,01
360	0,2	0,39	28,67	150	70	0,6368	13194	199	235	1,6354	9,1101	305	77,9	440,5	0,5524	2,011	0,8289
480	0,2	0,375	29,7	140	60	0,6209	18295	194	227	1,5612	13,1379	298	71,2	425,3	0,507	1,9686	0,7575
180	0,4	0,8	28,02	300	165	0,6476	2144	177	220	1,6864	1,4434	286	95	476,5	1,1684	3,4767	1,0262
240	0,4	0,685	32,18	270	105	0,5883	5008	188	229	1,4092	3,9374	294	79,3	481,2	0,836	3,1217	0,7046
360	0,4	0,605	35,79	255	95	0,5525	8505	178	221	1,2382	7,5713	294	76,8	429,9	0,6487	3,2556	0,6317
480	0,4	0,59	36,55	245	80	0,5465	11628	180	222	1,208	10,6149	292	74,6	458,3	0,6172	2,8489	0,5799

4.21 Anexo B. Hojas de cálculo en Microsoft Excel

En este anexo se presentan las hojas de cálculo desarrolladas en Microsoft Excel para la implementación de los modelos matemáticos, el cálculo de las variables termomecánicas, la estimación del desgaste en flanco y la determinación de los errores porcentuales empleados en la validación de los resultados.

AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX
Bootroyd	Merchant ϕ1	Merchant ϕ2	Merchant ϕ3	Modelo Lee and Shaffer 1949	Modelo Oxeley et al 1961	Modelo Lee et al 2003	Modelo Shaw and Cookson 2005	Modelo de Wang et al2020	ϕ experimental
4,196428571	26,8014095	16,7380738	8,56983983	8,60281897	33,1457596	14,0623961	22,7316725	8,84982541	17
8,532738095	26,0078589	19,0212026	9,65097362	7,01571786	30,1219765	12,7133602	22,1246022	8,58779502	19
13,70833333	28,2344004	21,275819	10,7665252	11,4688007	34,3555763	16,4984806	23,8792703	9,322999	21,5
25,31845238	30,4962637	25,1341764	12,7062646	15,9925274	38,2930033	20,3436483	25,8431838	10,0698663	25
8,532738095	23,6903785	16,6229363	8,59087872	2,38075693	26,3028368	8,77364339	8,99936622	7,82256297	16,5
13,56845238	24,9431334	18,900227	9,61854876	4,88626685	28,6060629	10,9033268	10,3818026	8,23622266	19
24,75892857	26,4892092	21,9276399	10,7940752	7,97841841	31,693751	13,5316556	12,2163668	8,74673688	22
0,122767857	25,8801499	19,0212026	9,82060825	6,7602997	29,8030911	12,4962547	22,0286747	8,54562548	19
7,243303571	26,3987009	18,4528351	9,66356022	7,79740184	31,3722696	13,3777916	22,4211946	8,71685104	18,5
11,54017857	28,0845697	21,275819	10,6974377	11,1691393	33,9683485	16,2437684	23,7560013	9,2735249	21,5
24,55357143	31,382583	25,1341764	12,6294636	17,765166	40,7168224	21,8503911	26,6703537	10,3625289	25
0,122767857	31,0228846	39,4636011	16,0655837	17,0457691	45,3219177	21,2389038	26,3304564	10,2437565	12,5
7,243303571	32,5039899	17,3111639	17,9193266	20,0079798	47,781119	23,7567828	27,7688389	10,7328175	16
11,54017857	34,5181217	21,275819	19,6129687	24,0362435	51,9072194	27,1808069	29,9027855	11,3978838	19
24,55357143	37,6487849	26,2128069	21,0903603	30,2975698	59,2877611	32,5029343	33,692972	12,4316288	22,5
				% error					
Bootroyd	Merchant ϕ1	Merchant ϕ2	Merchant ϕ3	Modelo Lee and Shaffer 1949	Modelo Oxeley et al 1961	Modelo Lee et al 2003	Modelo Shaw and Cookson	Modelo de Wang et al2020	
4,196428571	57,6553499	1,5407426	49,5891775	49,3951825	94,9750568	17,2800228	33,7157208	47,9422035	
8,532738095	36,883468	0,11159275	49,205402	63,0751692	58,5367185	33,087578	16,4452748	54,8010789	
13,70833333	31,3227924	1,04270228	49,9231385	46,6567409	59,7933784	23,2628809	11,0663735	56,637214	
25,31845238	21,9850549	0,5367057	49,1749415	36,0298902	53,1720133	18,6254067	3,37273538	59,7205349	
8,532738095	43,5780513	0,74506858	47,9340684	85,5711701	59,411132	46,8264037	45,4583865	52,5905275	
13,56845238	31,2796496	0,52512104	49,3760591	74,2828061	50,5582258	42,6140694	45,3589337	56,6514597	
24,75892857	20,4054964	0,32890975	50,936022	63,7344618	44,0625046	38,4924743	44,47106	60,2421051	
0,122767857	36,211315	0,11159275	48,3125882	64,4194752	56,8583741	34,2302382	15,9403933	55,0230238	
7,243303571	42,6956806	0,25494556	47,7645393	57,851882	69,5798356	27,6876132	21,1956462	52,8818863	
11,54017857	30,6259054	1,04270228	50,2444759	48,0505148	57,9923186	24,4475887	10,4930294	56,867326	
24,55357143	25,530332	0,5367057	49,4821454	28,9393359	62,8672896	12,5984355	6,68141469	58,5498844	
0,122767857	148,183076	215,708809	28,5246697	36,366153	262,575341	69,91123	110,643651	18,0499481	
7,243303571	103,149937	8,19477407	11,9957912	25,0498738	198,631993	48,4798927	73,5552431	32,9198908	
11,54017857	81,6743249	11,9779948	3,22615102	26,5065446	173,195891	43,0568787	57,3830818	40,0111379	
24,55357143	67,3279328	16,5013638	6,26506546	34,6558657	163,50116	44,4574858	49,7465423	44,7483166	
Promedio	**51,9005578**	**17,2773154**	**39,4636157**	**49,3723377**	**97,7140823**	**35,0038799**	**36,3684991**	**49,8424358**	

Fig. 4.64. Cálculo del ángulo de cizalla con sus porcentajes [Fuente: propia]



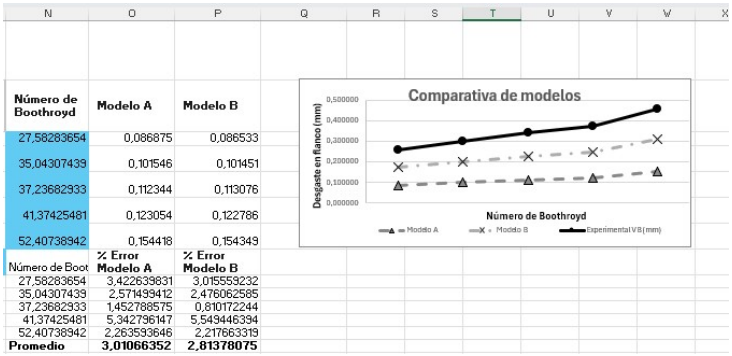
CK	CL	CM	CN	CO	CP	CQ	CR	CS	CT
	Fc Mod1	Ft Mod1	Fc Mod2	Ft Mod2	Fc Mod3	Ft Mod3	N Boothroyd	Fc experimental	Ft experimental
	1615,025	1190,577	1035,521939	1032,775	1646,25	1213,595	4,196429	1646	1214
	1609,835	1257,03	1037,39075	1103,65	1605,064	1253,305	8,532738	1601	1259
	1471,006	974,7898	950,3817941	934,2824	1465,39	971,0681	13,70833	1463	965
	1347,282	747,0403	873,2058232	807,8441	1350,188	748,6515	25,31845	1348	747
	1850,11	1702,41	1042,237816	1215,551	1852,181	1704,316	8,532738	1850	1712
	1696,208	1429,035	993,7205504	1115,11	1707,731	1438,743	13,56845	1708	1450
	1601,62	1207,853	932,9362131	1001,822	1584,77	1195,146	24,75893	1583	1170
	20,10011	15,83979	10,36559509	11,09823	20,3581	16,0431	0,122768	565	449
	1064,81	808,3106	631,9837583	655,4868	1069,626	811,9666	7,243304	1076	827
	1491,222	999,4498	954,22366	944,7649	1494,041	1001,339	11,54018	1495	1005
	2678,793	1378,772	1840,531052	1636,405	2688,59	1383,815	24,55357	2691	1401
	24,18093	12,83246	8,069339831	5,927738	29,0703	15,42718	0,122768	805	881
	1080,481	503,6534	522,4397619	378,0931	1304,531	608,0918	7,243304	1312	1294
	1447,463	554,5786	820,5766308	564,4194	1785,925	684,2564	11,54018	1784	1557
	2502,704	656,6855	1566,69191	979,34	3100,07	813,4287	24,55357	3105	2099
	% error Fc Mod1	% error Ft Mod1	% error Fc Mod2	% error Ft Mod2	% error Fc Mod3	% error Ft Mod3			
	1,881817	1,929433	37,0885821	14,92788	0,0152	0,033336			
	0,551847	0,156477	35,20357532	12,3392	0,253848	0,452377			
	0,54721	1,014482	35,03883841	3,183175	0,163329	0,628818			
	0,053268	0,005395	35,22211994	8,145127	0,1623	0,221089			
	0,005945	0,560136	43,66282073	28,99817	0,117876	0,448839			
	0,690414	1,445894	41,81963991	23,09589	0,015755	0,776368			
	1,176251	3,235333	41,06530555	14,3742	0,111781	2,1492			
	96,44246	96,47221	98,1653814	97,52823	96,3968	96,42693			
	1,039993	2,259898	41,26544998	20,73921	0,592402	1,817825			
	0,252695	0,552255	36,17233044	5,993541	0,064167	0,364293			
	0,453626	1,586582	31,60419725	16,80264	0,089558	1,226658			
	96,93616	98,54342	98,997523	99,32716	96,38878	98,2489			
	17,64627	61,07779	60,1798962	70,7806	0,569261	53,00682			
	18,86419	64,38159	54,00355209	63,74956	0,107892	56,05289			
	19,39763	68,71437	49,54293366	53,34254	0,158776	61,24685			
Promedio	17,0667	26,7957	49,26880977	35,5551	13,0138	24,8734			

Fig. 4.65. Cálculo de fuerzas con sus porcentajes [Fuente: propia]

N Boothroyd	τs (Mpa) Merchant 1	σ (Mpa) Johnson - Cook	τs(Mpa) Johnson-Cook	τs (Mpa)_real
4,196428571	597,1545755	650,78603	375,73149	586
8,532738095	602,0937852	677,50157	391,15571	607
13,70833333	618,6295216	694,92188	401,21334	621
25,31845238	641,472821	719,5762	415,44751	641
8,532738095	612,6539011	599,09857	345,88972	614
13,56845238	623,3585128	630,1406	363,81184	621
24,75892857	646,0644721	653,77466	377,45698	648
7,243303571	641,9652098	655,86618	378,66451	638
11,54017857	627,909213	694,92188	401,21334	627
24,55357143	614,5555266	730,68973	421,86391	614
7,243303571	665,4588431	554,4185	320,09367	662
11,54017857	643,5523667	636,27865	367,35565	648
24,55357143	622,3557832	673,32758	388,74586	621

N Boothroyd			% error
4,196428571	1,903511172		35,881999
8,532738095	0,808272617		35,559191
13,70833333	0,381719556		35,392378
25,31845238	0,073763033		35,187596
8,532738095	0,219234353		43,66617
13,56845238	0,379792722		41,415162
24,75892857	0,298692572		41,750466
7,243303571	0,621506242		40,648195
11,54017857	0,14501004		36,010632
24,55357143	0,090476648		31,292522
7,243303571	0,522483845		51,647482
11,54017857	0,686363166		43,309313
24,55357143	0,218322574		37,400023
Promedio	**0,48839604**		**39,1662**

Fig. 4.66. Cálculo del Esfuerzo cortante con sus porcentajes [Fuente: propia]



Número de Boothroyd	Modelo A	Modelo B
27,58283654	0,086875	0,086533
35,04307439	0,101546	0,101451
37,23682933	0,112344	0,113076
41,37425481	0,123054	0,122786
52,40738942	0,154418	0,154349

Número de Boot	% Error Modelo A	% Error Modelo B
27,58283654	3,422639831	3,015559232
35,04307439	2,571439412	2,476062585
37,23682933	1,452788575	0,810172244
41,37425481	5,342796147	5,549446394
52,40738942	2,263593646	2,217663319
Promedio	**3,01066352**	**2,81378075**

Fig. 4.67. Cálculo del Desgaste con sus porcentajes [Fuente: propia]

4.22 Anexo B. Datos experimentales del desgaste en flanco

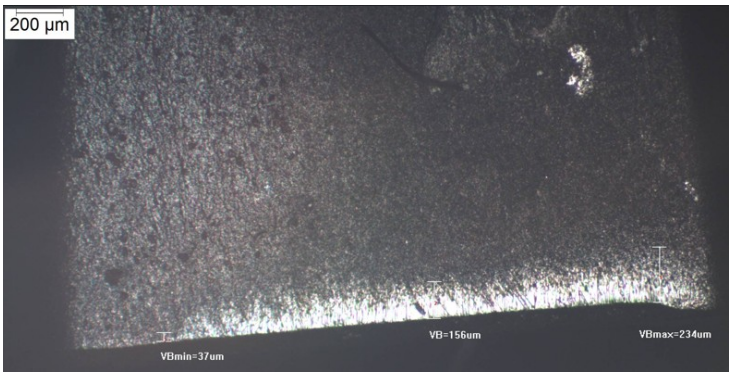


Fig. 4.68. Ensayo 1 V_B 156μm

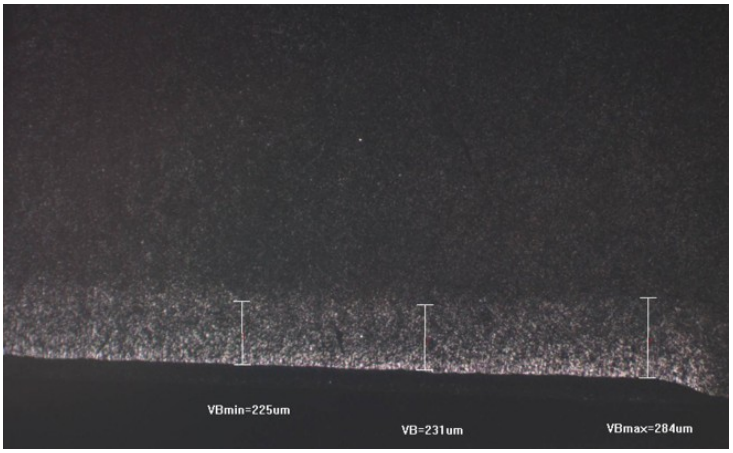


Fig. 4.69. Ensayo 2 V_B 231μm



Fig. 4.70. Ensayo 3 V_B 172μm

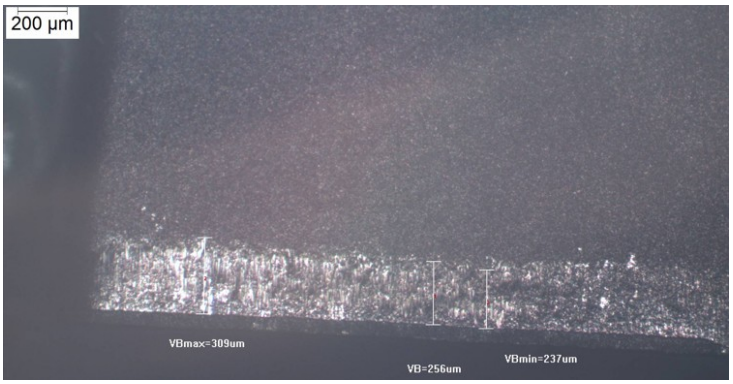


Fig. 4.71. Ensayo 4 V_B 256μm

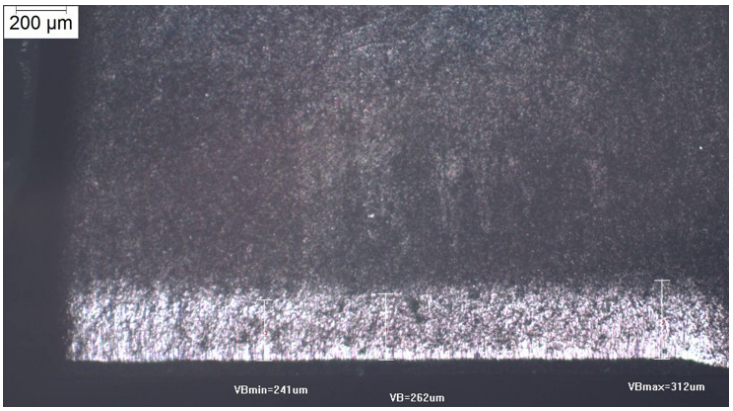


Fig. 4.72. Ensayo 5 V_B 262μm

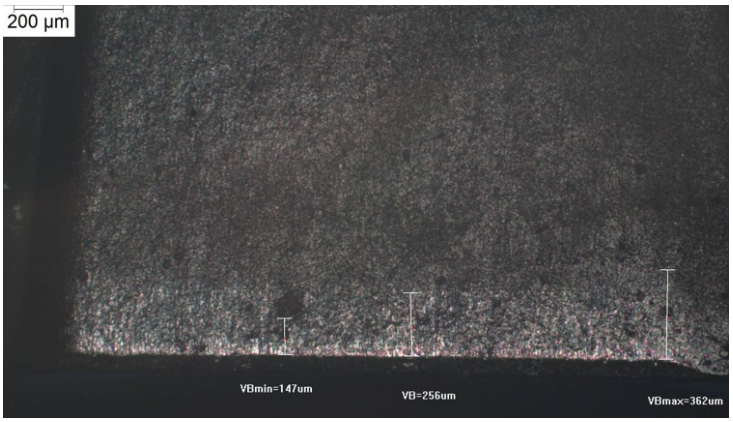


Fig. 4.73. Ensayo 6 V_B 256μm

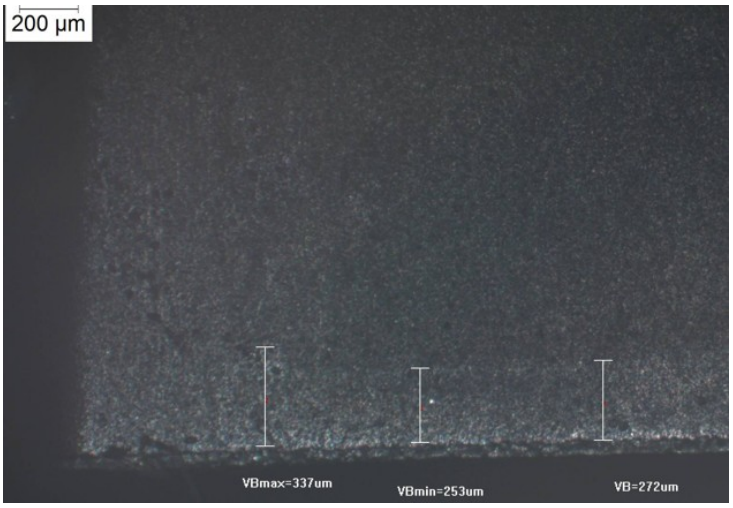


Fig. 4.74. Ensayo 7 V_B 272μm

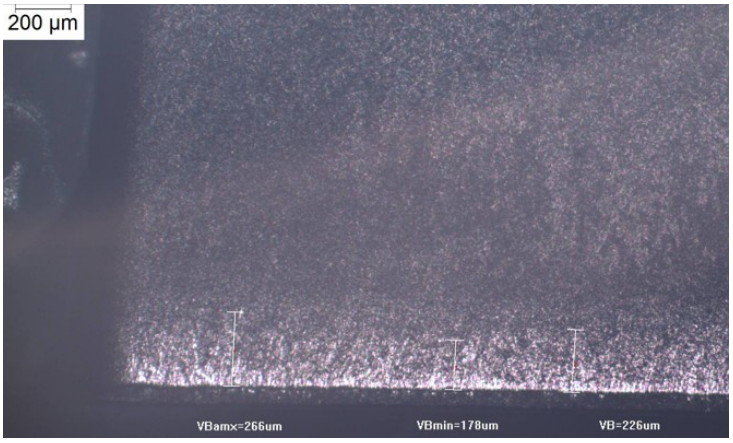


Fig. 4.75. Ensayo 8 V_B 226μm

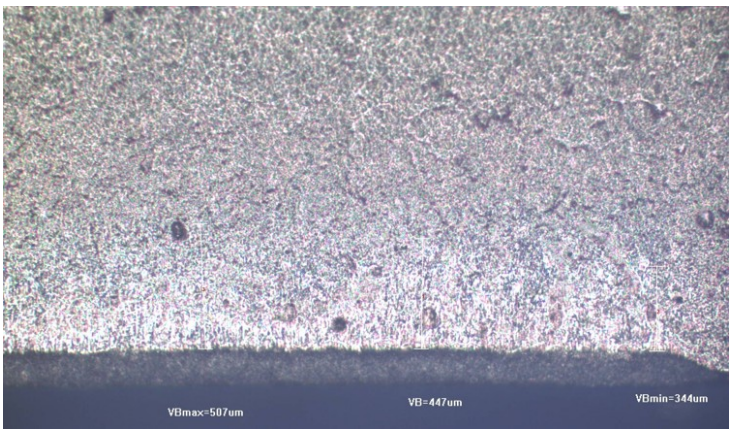


Fig. 4.76. Ensayo 9 V_B 447μm

4.23 Anexo C . Cálculos realizados (calibración) en MATLAB

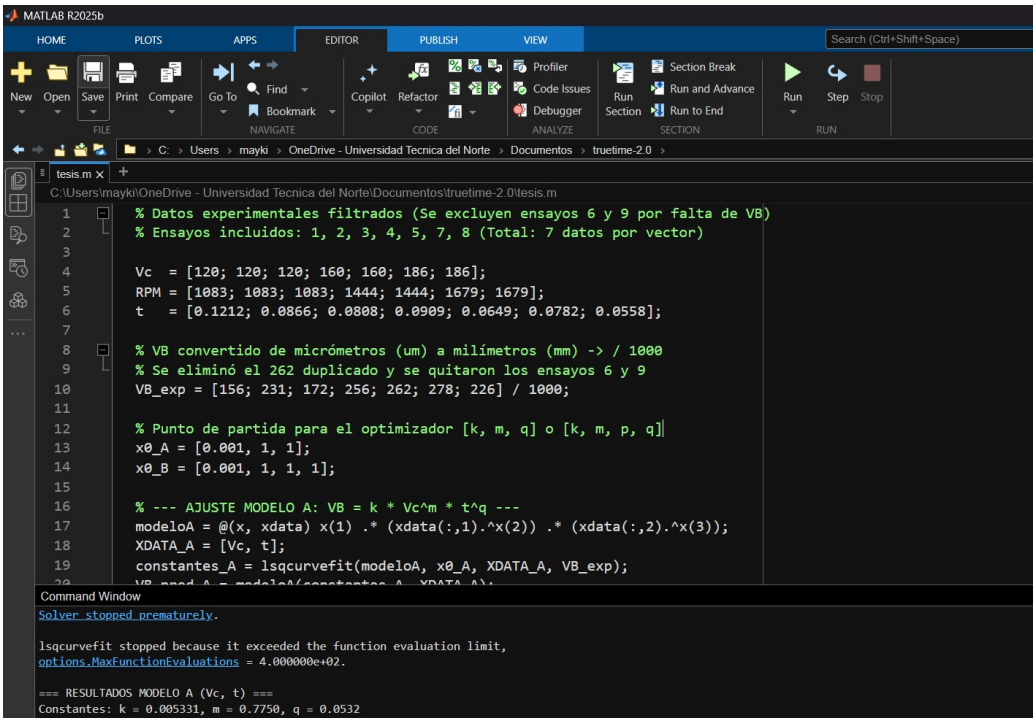


Fig. 4.77. Cálculos realizados en MATLAB R2025b [Fuente: propia]

4.24 Anexo D. Especificaciones técnicas

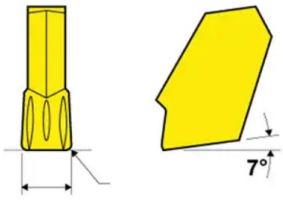
AISI 1018 Round Bar Chemical Composition

Grade	Mn	S	C	P	Si	Cr	Mo
AISI 4130	0.4-0.8	0.04	0.28-0.33	0.035	0.15-0.35	0.8-1.1	0.15-0.25

AISI 1018 Round Bar Mechanical Properties

>Grade	>Delivery State	>A,% Min	>T.S. N/mm2 Min	>Y.S. N/mm2 Min	>Z,% Min	>Hardness, (annealing or tempering) HB,max	>Forging ratio	>Grain Size (level)	>Nonmetal ratio
AISI 1018	Hot rolled, forged, or heat treatment	12	930	735	50	229	≥ 4:1	≥ 6	≤ 2.0

Fig. 4.78. Especificaciones AISI 1018 [63]



(mm)

Stock Code	W	R
GTN-3	3.1	0.2

Fig. 4.79. Especificaciones Inserto GTN-3 [64]



Fig. 4.80. Portaherramientas para ranurado [65]