

CAPÍTULO 6

Análisis de resultados

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos en el capítulo de pruebas tomando en cuenta las pruebas preliminares y el mecanizado de las probetas de tensión bajo la norma ASTM.

En primer lugar se muestran los resultados arrojados por las matrices de experimentos planteadas en el capítulo anterior por medio de un análisis estadístico. En base a estas matrices se podrán plantear las primeras conclusiones sobre el comportamiento y desempeño de los insertos de la serie 4000 de Sandvik con calidad GC 4015 en el mecanizado en seco de aceros de baja aleación.

Se desarrollarán métodos que permitan estimar la vida útil del inserto por medio de regresiones lineales en base a la información obtenida en el capítulo anterior. Se determinarán valores para las constantes C y n por medio de la ecuación de Taylor para las herramientas de calidad GC 4015 en el torneado en seco de aceros de baja aleación.

El programa de control numérico empleado para el mecanizado de las probetas tanto en seco como en húmedo no se muestra. Los parámetros de corte seleccionados en base a los resultados obtenidos en las matrices de experimentos se describen en las conclusiones.

En cuanto al maquinado de las probetas de tensión se empleará un análisis comparativo del consumo de potencia que se requiere en el mecanizado en seco contra el mecanizado en húmedo para determinar si existe un aumento en la potencia por la ausencia del refrigerante de corte.

6.1 Resultados de la matriz de experimentos

La tabla ANOVA muestra que la suma de cuadrados de los efectos principales (avance, velocidad, profundidad, tipo de mecanizado, tipo de inserto) es la mayor. Esto indica que los efectos por si solos afectan en mayor grado a la rugosidad y en segundo lugar las interacciones dobles de dichos efectos.

Tabla 6.1

Análisis de varianza de acabado superficial

ANOVA

Analysis of Variance for Rspuesta (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	5	143.614	143.614	28.7228	*	*
2-Way Interactions	10	32.802	32.802	3.2802	*	*
3-Way Interactions	10	14.898	14.898	1.4898	*	*
4-Way Interactions	5	5.530	5.530	1.1061	*	*
5-Way Interactions	1	0.336	0.336	0.3362	*	*
Residual Error	0	0.000	0.000	0.0000		
Total	31	197.181				

Fuente: Tabla del autor

Para saber que efecto en particular es más importante se analiza el diseño del experimento.

Tabla 6.2

Diseño factorial de acabado superficial

Term	Effect	Coef
Constant		3.1425
Avance	3.8625	1.9313
Velocidad	0.2250	0.1125
Profundi	-0.0250	-0.0125
T.Mecani	-0.1012	-0.0506
T.Insert	1.7238	0.8619
Avance*Velocida	0.1550	0.0775
Avance*Profundi	0.1400	0.0700
Avance*T.Mecani	-0.3088	-0.1544
Avance*T.Insert	1.6787	0.8394
Velocida*Profundi	-0.6100	-0.3050
Velocida*T.Mecani	0.6362	0.3181
Velocida*T.Insert	0.1913	0.0956
Profundi*T.Mecani	0.5588	0.2794
Profundi*T.Insert	-0.1188	-0.0594
T.Mecani*T.Insert	-0.0575	-0.0288
Avance*Velocida*Profundi	-0.6125	-0.3063
Avance*Velocida*T.Mecani	0.1662	0.0831
Avance*Velocida*T.Insert	0.0788	0.0394
Avance*Profundi*T.Mecani	0.3438	0.1719
Avance*Profundi*T.Insert	-0.0462	-0.0231
Avance*T.Mecani*T.Insert	0.4175	0.2087

Tabla 6.2. Continuación

Velocida*Profundi*T.Mecani	0.0613	0.0306
Velocida*Profundi*T.Insert	-0.6213	-0.3106
Velocida*T.Mecani*T.Insert	0.5475	0.2738
Profundi*T.Mecani*T.Insert	0.6850	0.3425
Avance*Velocida*Profundi* T.Mecani	0.0738	0.0369
Avance*Velocida*Profundi* T.Insert	-0.6063	-0.3031
Avance*Velocida*T.Mecani* T.Insert	0.3000	0.1500
Avance*Profundi*T.Mecani* T.Insert	0.4625	0.2313
Velocida*Profundi*T.Mecani *T.Insert	0.1200	0.0600
Avance*Velocida*Profundi* T.Mecani*T.Insert	-0.2050	-0.1025

Fuente: Tabla del autor

Un efecto se define como el cambio en unidades de la variable de respuesta (en este caso micras en el Ra) cuando un factor pasa de nivel bajo a nivel alto. En la tabla 6.2 se muestran los efectos de los factores principales, así como sus interacciones, de lo cual se puede determinar lo siguiente:

Avance

Con un valor de 3.8625 es el factor que tiene mayor efecto sobre la rugosidad, es decir cuando se cambia el avance de 0.1 a 0.3 mm/rev se incrementa la rugosidad en promedio 3.8625 μm . Por lo que si se busca obtener un buen acabado superficial es necesario emplear un avance de 0.1 mm/rev.

Tipo de inserto

Con un valor de 1.7238 es el segundo factor en importancia. Debido a la variación en el tipo de inserto de normal a Wiper se genera una variación en la superficie de la pieza de 1.7238 μm . Para obtener un mejor acabado se sugiere emplear un inserto de tipo normal.

La tabla 6.3 muestra los valores promedios de la variable de respuesta utilizando un factor determinado en un solo nivel. Es decir para el avance el 1.2112 se obtiene al promediar todas las respuestas que implican un avance de 0.1 mm/rev o un nivel bajo (-1).

Tabla 6.3
Interacciones en el diseño de experimento

*Tabla	Mean
Avance	
-1	1.2112
1	5.0738
Velocida	
-1	3.0300
1	3.2550
Profundi	
-1	3.1550
1	3.1300
T.Mecani	
-1	3.1931
1	3.0919
T.Insert	
-1	2.2806
1	4.0044
Avance*Velocida	
-1 -1	1.1762
1 -1	4.8838
-1 1	1.2462
1 1	5.2638
Avance*Profundi	
-1 -1	1.2937
1 -1	5.0163
-1 1	1.1288
1 1	5.1313
Avance*T.Mecani	
-1 -1	1.1075
1 -1	5.2788
-1 1	1.3150
1 1	4.8687
Avance*T.Insert	
-1 -1	1.1887
1 -1	3.3725
-1 1	1.2338
1 1	6.7750
Velocida*Profundi	
-1 -1	2.7375
1 -1	3.5725
-1 1	3.3225
1 1	2.9375
Velocida*T.Mecani	
-1 -1	3.3988
1 -1	2.9875
-1 1	2.6613
1 1	3.5225
Velocida*T.Insert	
-1 -1	2.2637
1 -1	2.2975

Tabla 6.3. Continuación

-1	1		3.7963
1	1		4.2125
Profundi*T.Mecani			
-1	-1		3.4850
1	-1		2.9012
-1	1		2.8250
1	1		3.3588
Profundi*T.Insert			
-1	-1		2.2337
1	-1		2.3275
-1	1		4.0763
1	1		3.9325
T.Mecani*T.Insert			
-1	-1		2.3025
1	-1		2.2587
-1	1		4.0838
1	1		3.9250
Avance*Velocida*Profundi			
-1	-1	-1	1.2600
1	-1	-1	4.2150
-1	1	-1	1.3275
1	1	-1	5.8175
-1	-1	1	1.0925
1	-1	1	5.5525
-1	1	1	1.1650
1	1	1	4.7100
Avance*Velocida*T.Mecani			
-1	-1	-1	1.3075
1	-1	-1	5.4900
-1	1	-1	0.9075
1	1	-1	5.0675
-1	-1	1	1.0450
1	-1	1	4.2775
-1	1	1	1.5850
1	1	1	5.4600
Avance*Velocida*T.Insert			
-1	-1	-1	1.2100
1	-1	-1	3.3175
-1	1	-1	1.1675
1	1	-1	3.4275
-1	-1	1	1.1425
1	-1	1	6.4500
-1	1	1	1.3250
1	1	1	7.1000
Avance*Profundi*T.Mecani			
-1	-1	-1	1.2975
1	-1	-1	5.6725
-1	1	-1	0.9175
1	1	-1	4.8850
-1	-1	1	1.2900
1	-1	1	4.3600
-1	1	1	1.3400
1	1	1	5.3775
Avance*Profundi*T.Insert			
-1	-1	-1	1.2350
1	-1	-1	3.2325
-1	1	-1	1.1425
1	1	-1	3.5125
-1	-1	1	1.3525
1	-1	1	6.8000
-1	1	1	1.1150

Tabla 6.3. Continuación

1	1	1		6.7500
Avance*T.Mecani*T.Insert				
-1	-1	-1		0.8475
1	-1	-1		3.7575
-1	1	-1		1.5300
1	1	-1		2.9875
-1	-1	1		1.3675
1	-1	1		6.8000
-1	1	1		1.1000
1	1	1		6.7500
Velocida*Profundi*T.Mecani				
-1	-1	-1		3.3550
1	-1	-1		3.6150
-1	1	-1		3.4425
1	1	-1		2.3600
-1	-1	1		2.1200
1	-1	1		3.5300
-1	1	1		3.2025
1	1	1		3.5150
Velocida*Profundi*T.Insert				
-1	-1	-1		2.2225
1	-1	-1		2.2450
-1	1	-1		2.3050
1	1	-1		2.3500
-1	-1	1		3.2525
1	-1	1		4.9000
-1	1	1		4.3400
1	1	1		3.5250
Velocida*T.Mecani*T.Insert				
-1	-1	-1		2.3300
1	-1	-1		2.2750
-1	1	-1		2.1975
1	1	-1		2.3200
-1	-1	1		4.4675
1	-1	1		3.7000
-1	1	1		3.1250
1	1	1		4.7250
Profundi*T.Mecani*T.Insert				
-1	-1	-1		2.1925
1	-1	-1		2.4125
-1	1	-1		2.2750
1	1	-1		2.2425
-1	-1	1		4.7775
1	-1	1		3.3900
-1	1	1		3.3750
1	1	1		4.4750
Avance*Velocida*Profundi*T.Mecani				
-1	-1	-1	-1	1.5050
1	-1	-1	-1	5.2050
-1	1	-1	-1	1.0900
1	1	-1	-1	6.1400
-1	-1	1	-1	1.1100
1	-1	1	-1	5.7750
-1	1	1	-1	0.7250
1	1	1	-1	3.9950
-1	-1	-1	1	1.0150
1	-1	-1	1	3.2250
-1	1	-1	1	1.5650
1	1	-1	1	5.4950
-1	-1	1	1	1.0750
1	-1	1	1	5.3300

Tabla 6.3. Continuación

-1	1	1	1	1.6050
1	1	1	1	5.4250
Avance*Velocida*Profundi*T.Insert				
-1	-1	-1	-1	1.2650
1	-1	-1	-1	3.1800
-1	1	-1	-1	1.2050
1	1	-1	-1	3.2850
-1	-1	1	-1	1.1550
1	-1	1	-1	3.4550
-1	1	1	-1	1.1300
1	1	1	-1	3.5700
-1	-1	-1	1	1.2550
1	-1	-1	1	5.2500
-1	1	-1	1	1.4500
1	1	-1	1	8.3500
-1	-1	1	1	1.0300
1	-1	1	1	7.6500
-1	1	1	1	1.2000
1	1	1	1	5.8500
Avance*Velocida*T.Mecani*T.Insert				
-1	-1	-1	-1	0.9800
1	-1	-1	-1	3.6800
-1	1	-1	-1	0.7150
1	1	-1	-1	3.8350
-1	-1	1	-1	1.4400
1	-1	1	-1	2.9550
-1	1	1	-1	1.6200
1	1	1	-1	3.0200
-1	-1	-1	1	1.6350
1	-1	-1	1	7.3000
-1	1	-1	1	1.1000
1	1	-1	1	6.3000
-1	-1	1	1	0.6500
1	-1	1	1	5.6000
-1	1	1	1	1.5500
1	1	1	1	7.9000
Avance*Profundi*T.Mecani*T.Insert				
-1	-1	-1	-1	0.8900
1	-1	-1	-1	3.4950
-1	1	-1	-1	0.8050
1	1	-1	-1	4.0200
-1	-1	1	-1	1.5800
1	-1	1	-1	2.9700
-1	1	1	-1	1.4800
1	1	1	-1	3.0050
-1	-1	-1	1	1.7050
1	-1	-1	1	7.8500
-1	1	-1	1	1.0300
1	1	-1	1	5.7500
-1	-1	1	1	1.0000
1	-1	1	1	5.7500
-1	1	1	1	1.2000
1	1	1	1	7.7500
Velocida*Profundi*T.Mecani*T.Insert				
-1	-1	-1	-1	2.2550
1	-1	-1	-1	2.1300
-1	1	-1	-1	2.4050
1	1	-1	-1	2.4200
-1	-1	1	-1	2.1900
1	-1	1	-1	2.3600
-1	1	1	-1	2.2050

Tabla 6.3. Continuación

1	1	1	-1		2.2800
-1	-1	-1	1		4.4550
1	-1	-1	1		5.1000
-1	1	-1	1		4.4800
1	1	-1	1		2.3000
-1	-1	1	1		2.0500
1	-1	1	1		4.7000
-1	1	1	1		4.2000
1	1	1	1		4.7500
Avance*Velocida*Profundi*T.Mecani*T.Insert					
-1	-1	-1	-1	-1	1.2000
1	-1	-1	-1	-1	3.3100
-1	1	-1	-1	-1	0.5800
1	1	-1	-1	-1	3.6800
-1	-1	1	-1	-1	0.7600
1	-1	1	-1	-1	4.0500
-1	1	1	-1	-1	0.8500
1	1	1	-1	-1	3.9900
-1	-1	-1	1	-1	1.3300
1	-1	-1	1	-1	3.0500
-1	1	-1	1	-1	1.8300
1	1	-1	1	-1	2.8900
-1	-1	1	1	-1	1.5500
1	-1	1	1	-1	2.8600
-1	1	1	1	-1	1.4100
1	1	1	1	-1	3.1500
-1	-1	-1	-1	1	1.8100
1	-1	-1	-1	1	7.1000
-1	1	-1	-1	1	1.6000
1	1	-1	-1	1	8.6000
-1	-1	1	-1	1	1.4600
1	-1	1	-1	1	7.5000
-1	1	1	-1	1	0.6000
1	1	1	-1	1	4.0000
-1	-1	-1	1	1	0.7000
1	-1	-1	1	1	3.4000
-1	1	-1	1	1	1.3000
1	1	-1	1	1	8.1000
-1	-1	1	1	1	0.6000
1	-1	1	1	1	7.8000
-1	1	1	1	1	1.8000
1	1	1	1	1	7.7000

Fuente: Tabla del autor

6.2 Vida útil del inserto

Como se mencionó en el capítulo anterior por medio de la matriz de experimentos se establecieron niveles de trabajo que fueron clasificados en alto y bajo. En base a lo anterior se evaluaron los efectos de la velocidad de corte en la vida de la herramienta. Esto se realizó empleando los valores de velocidad determinados en la matriz de experimentos. En la tabla 6.4 se muestran los parámetros de corte empleados para la realización de estas pruebas.

Tabla 6.4
Parámetros empleados

Parámetros de corte		
Velocidad en m/ min	119.3808	250.1027
Avance promedio (mm/rev)	0.1	0.3
Profundidad promedio (mm)	0.7	2

Fuente: Tabla del autor

Una vez establecidos los parámetros de corte, el Metals Handbook Vol. 16 (Machining) establece como límite de desgaste de flanco VB en una herramienta formada por carburos, un valor de 0.4 mm. Existe un rango de valores donde puede considerarse que la herramienta se encuentra en zona crítica debido al desgaste de flanco y este rango tiene los valores de 0.25-0.38 mm. para herramientas formadas por carburos. Hay que mencionar que en las pruebas elaboradas, no se alcanzó el límite señalado por el Metals Handbook, pero si se trabajo en el rango crítico de operación.

En la tabla 6.5 se muestran los datos obtenidos para un inserto normal empleando una velocidad de corte de 119.3808 m/min y de 250.1027 m/min. Posteriormente se muestra la gráfica de estos datos obtenidos experimentalmente.

Tabla 6.5

Inserto normal con velocidad de corte de 119.3808 m/min, de 250.1027 m/min y de 59.6904 m/min

Inserto normal		Desgaste de flanco (mm)	Tiempo (min)	Proporción desgaste de flanco (mm/min)
Velocidad de corte (m/min)	119.3808	0	0	
Revoluciones por minuto	2000	0.1397	1.41	0.0991
Diámetro inicial (m)	0.019	0.1464	2.82	0.0519
Correlación entre variables	0.854623552	0.1599	3.5	0.0457
Longitud de pasada (mm)	50	0.1666	4.12	0.0404
		0.1717	4.75	0.0361
		0.1784	5.37	0.0332
		0.1852	6	0.0309

Inserto normal		Desgaste de flanco (mm)	Tiempo (min)	Proporción desgaste de flanco (mm/min)
Velocidad de corte (m/min)	250.102776	0	0	
Revoluciones por minuto	4190	0.1784	1.3	0.1372
Diámetro inicial (m)	0.019	0.2155	1.75	0.1231
Correlación entre variables	0.969278993	0.2323	1.9	0.1223
Longitud de pasada (mm)	50	0.2508	2.19	0.1145
		0.271	2.49	0.1088
		0.2811	2.79	0.1008
		0.2912	3.09	0.0942

Inserto normal		Desgaste de flanco (mm)	Tiempo (min)	Proporción desgaste de flanco (mm/min)
Velocidad de corte (m/min)	59.6904	0	0	
Revoluciones por minuto	1000	0.0274	0.86	0.0319
Diámetro inicial (m)	0.019	0.0355	1.72	0.0206
Correlación entre variables	0.955349528	0.0437	2.58	0.0169
Longitud de pasada (mm)	50	0.0478	3.44	0.0139
		0.0548	4.3	0.0127
		0.063	5.16	0.0122
		0.0674	6.02	0.0112
		0.0731	6.88	0.0106
		0.0786	7.74	0.0102

Fuente: Tabla del autor

Adicional a las velocidades mencionadas se agregó una velocidad de 59.6904 m/min.

En la figura 6.2 se puede ver la gráfica de estos valores.

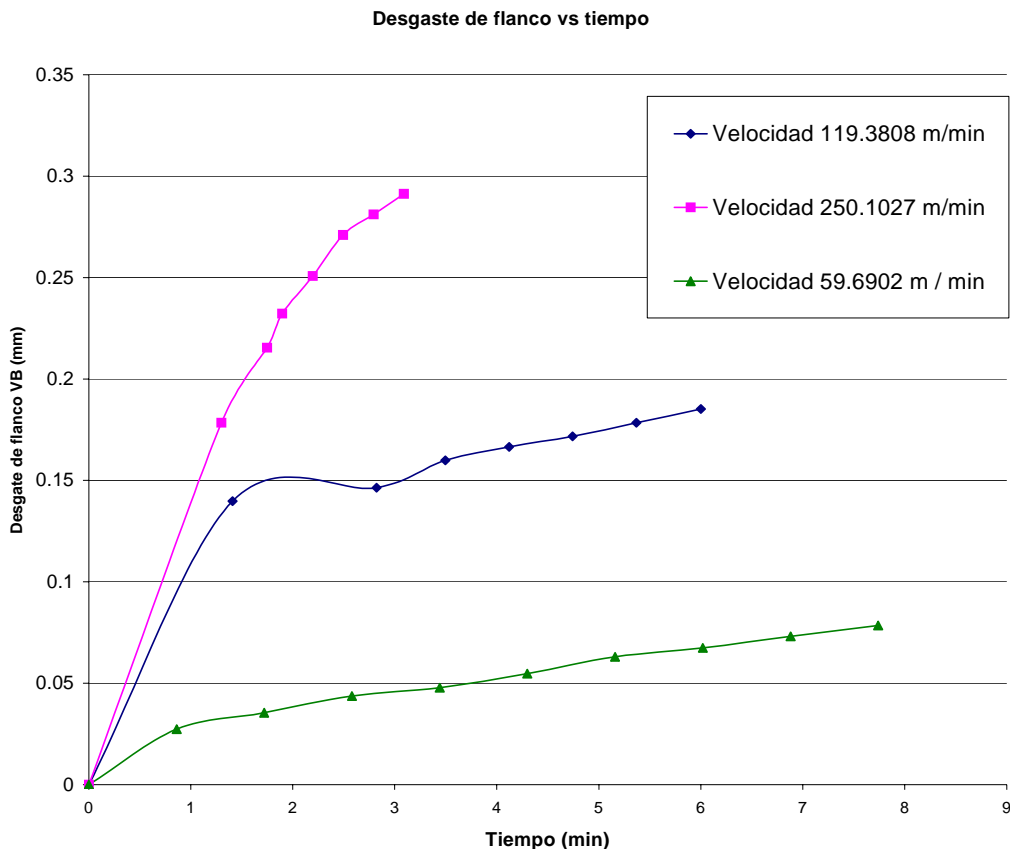


Figura 6.2 Inserto normal con distintas velocidades de corte

En la figura 6.2 se puede observar que con una velocidad grande el desgaste de flanco que se produce en el inserto de corte es mayor al que se produce con una velocidad de corte pequeña. En la tabla 6.5, se puede observar que los datos presentan una correlación en todos los casos mayor a 0.80, lo que indica que puede desarrollarse una regresión lineal para poder establecer una ecuación del comportamiento de los datos. En la proporción del desgaste de flanco puede verse que el crecimiento del desgaste de flanco mantuvo un cierto parámetro de crecimiento conforme transcurría el tiempo. El tiempo medido dependió del número de pasadas que se realizaban en la pieza que se mecanizaba.

En la tabla 6.6 se muestran los datos obtenidos para un inserto Wiper empleando una velocidad de corte de 119.3808 m/min y de 250.1027 m/min. Posteriormente se muestra la gráfica de estos datos obtenidos experimentalmente.

Tabla 6.6

Inserto wiper con velocidad de corte de 119.3808 m/min y de 250.1027 m/min

Inserto Wiper		Desgaste de flanco (mm)	Tiempo (min)	Proporción desgaste de flanco (mm/min)
Velocidad de corte (m/min)	119.3808	0	0	
Revoluciones por minuto	2000	0.1262	1.41	0.0895
Diámetro inicial (m)	0.019	0.1347	1.88	0.0716
Correlación entre variables	0.875692172	0.1431	2.82	0.0507
Longitud de pasada (mm)	50	0.15	3.13	0.0479
		0.1616	3.76	0.0430
		0.1683	4.38	0.0384
		0.1784	5	0.0357

Inserto Wiper		Desgaste de flanco (mm)	Tiempo (min)	Proporción desgaste de flanco (mm/min)
Velocidad de corte (m/min)	250.102776	0	0	
Revoluciones por minuto	4190	0.1532	0.67	0.2287
Diámetro inicial (m)	0.019	0.1885	0.9	0.2094
Correlación entre variables	0.895074332	0.2	1.35	0.1481
Longitud de pasada (mm)	50	0.2118	1.5	0.1412
		0.2222	1.79	0.1241
		0.234	2.09	0.1120
		0.245	2.39	0.1025

Fuente: Tabla del autor

En la tabla 6.6 se puede observar que entre el desgaste de flanco y el tiempo de corte existe una correlación mayor a 0.80, por lo que se puede establecer una regresión lineal de los datos para estimar valores. Se puede observar que la proporción de desgaste es grande en un principio y después disminuye, lo que indica que el inserto se desgasta más rápido cuando está nuevo. Mientras avanza el tiempo la proporción del desgaste de flanco

disminuye. Esto es importante ya que conforme transcurre el tiempo se logra que se estabilice el comportamiento del inserto.

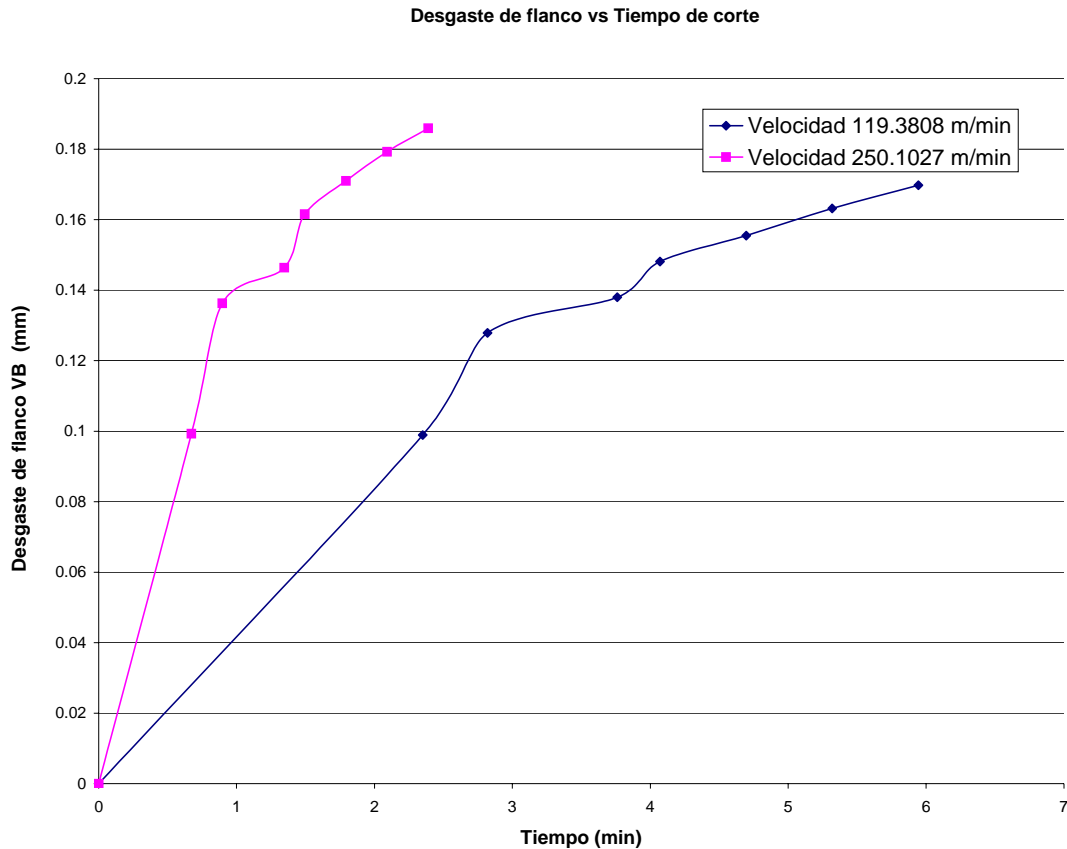


Figura 6.3 Inserto Wiper con distintas velocidades de corte

En la figura 6.3 se puede observar el mismo comportamiento que mostró el inserto normal, a una velocidad de corte mayor el desgaste de flanco que se produce es más grande que a una velocidad de corte menor.

En la tabla 6.7 se muestran los datos obtenidos para un inserto Wiper empleando un fluido de corte, las velocidades de corte son las mismas que en los dos casos anteriores. De 119.3808 m/min y de 250.1027 m/min. Posteriormente se muestra la gráfica del comportamiento que presenta este inserto empleando un fluido de corte. El fin de emplear un fluido de corte es aumentar la vida de la herramienta de corte.

Tabla 6.7

Inserto wiper con refrigerante con velocidad de corte de 119.38 m/min y de 250.1027 m/min

Inserto Wiper con refrigerante		Desgaste de flanco (mm)	Tiempo (min)	Proporción desgaste de flanco (mm/min)
Velocidad de corte (m/min)	119.3808	0	0	
Revoluciones por minuto	2000	0.0989	2.35	0.0421
Diámetro inicial (m)	0.019	0.1279	2.82	0.0454
Correlación entre variables	0.952485739	0.138	3.76	0.0367
		0.1481	4.07	0.0364
		0.1555	4.7	0.0331
		0.1632	5.32	0.0307
		0.1698	5.95	0.0285

Inserto Wiper con refrigerante		Desgaste de flanco (mm)	Tiempo (min)	Proporción desgaste de flanco (mm/min)
Velocidad de corte (m/min)	250.102776	0	0	
Revoluciones por minuto	4190	0.0993	0.67	0.1482
Diámetro inicial (m)	0.019	0.1363	0.9	0.1514
Correlación entre variables	0.924477039	0.1464	1.35	0.1084
		0.1616	1.5	0.1077
		0.171	1.79	0.0955
		0.1793	2.09	0.0858
		0.1856	2.39	0.0777

Fuente: Tabla del autor

En la tabla 6.7 se muestra que la correlación que existe entre el desgaste de flanco y el tiempo de corte es mayor a 0.8, por lo que igual que en los casos anteriores se puede establecer una regresión lineal que modele el comportamiento del inserto de corte con el uso de un fluido de corte. En la proporción de desgaste se puede apreciar que se mantiene un valor casi constante y que no presenta variaciones grandes como en el caso anterior donde se emplea el inserto Wiper pero en un mecanizado en seco.

En la figura 6.4 se muestra la relación que existe entre el tiempo de corte y el desgaste de flanco en un mecanizado húmedo.

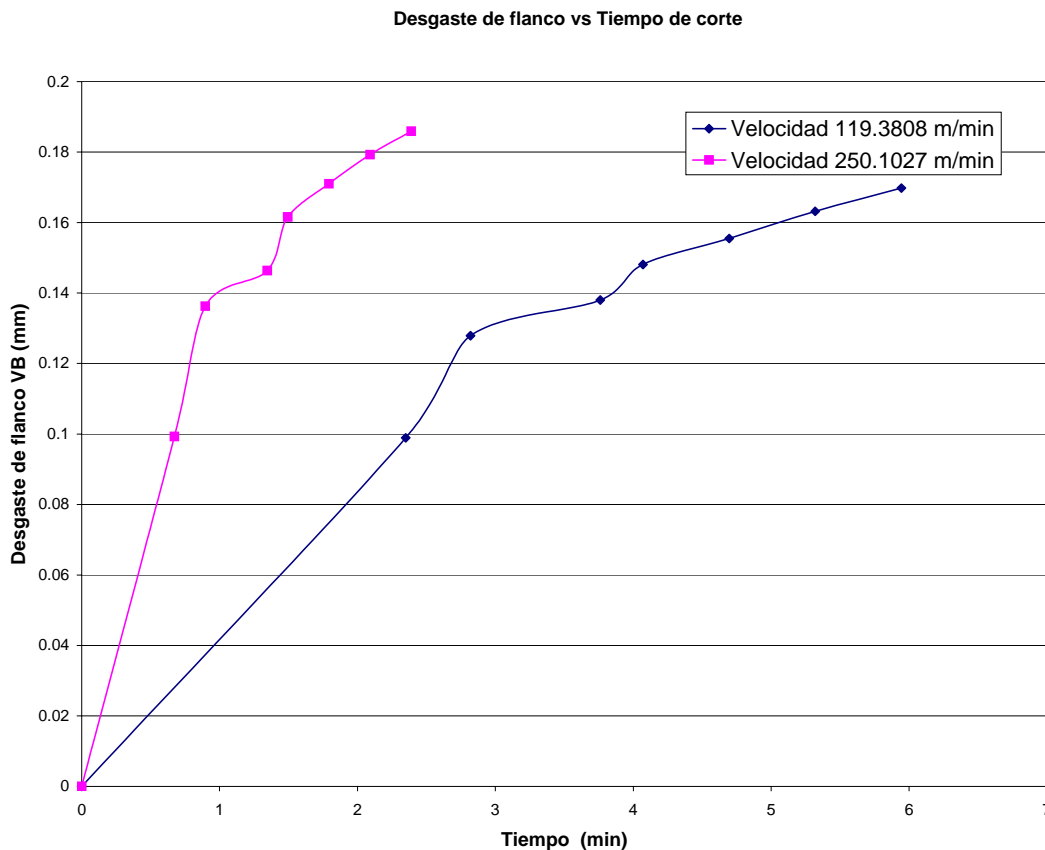


Figura 6.4 Inserto wiper con distintas velocidades de corte con fluido de corte

En la figura 6.4 se puede observar que las curvas presentan el mismo comportamiento que en los casos pasados. A una mayor velocidad de corte el desgaste de flanco que se produce en un cierto tiempo de corte es más grande que el desgaste de flanco que se produce con una velocidad de corte más pequeña.

En la figura 6.5 se presenta una serie de curvas donde se muestra una comparación entre los tipos de herramientas empleadas y el desgaste de éstas conforme transcurre el tiempo de corte. Se muestran siete curvas, tres corresponde al inserto normal, dos al inserto Wiper y dos al inserto Wiper pero empleando fluido de corte.

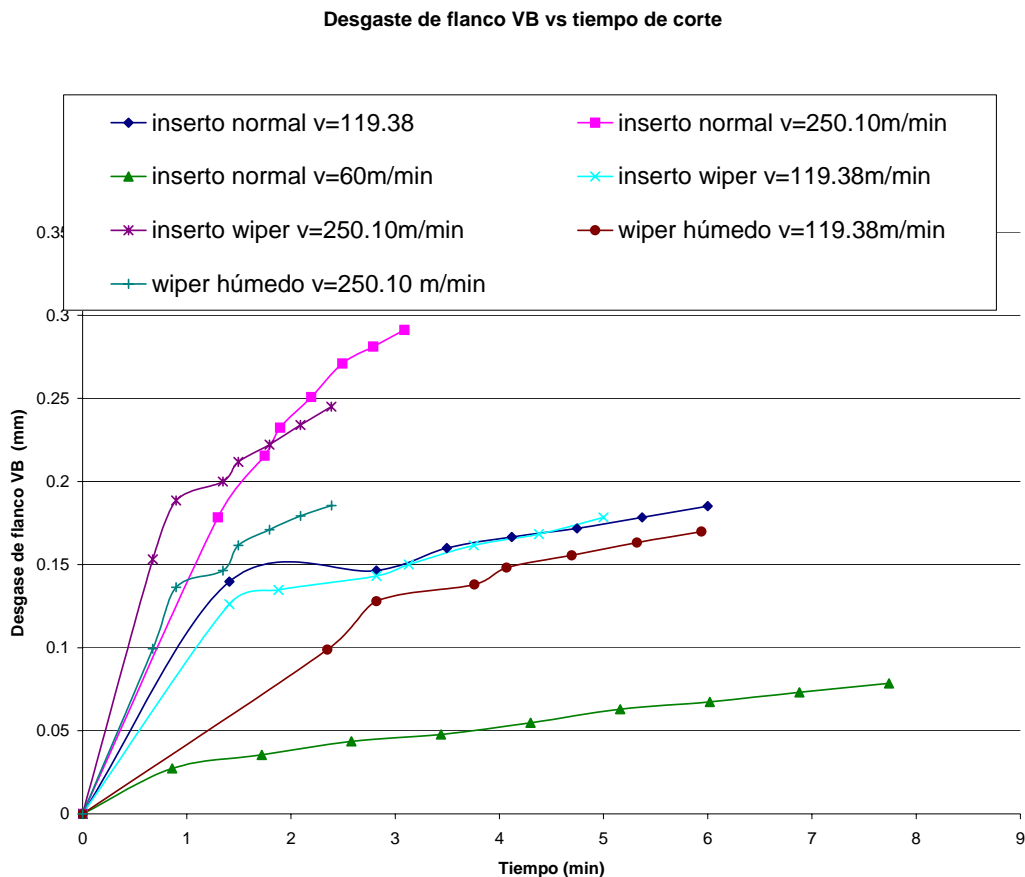


Figura 6.5 Desgaste de flanco comparando los dos tipos de inserto de corte

En la figura 6.5 se puede apreciar que el inserto que más presentó desgaste de flanco VB fue el inserto normal que estuvo sometido a una velocidad de 250.1027 m/min. Se puede apreciar que un inserto Wiper a la misma velocidad de corte aumenta el desgaste rápidamente pero después se estabiliza. Finalmente empleando refrigerante de corte la tendencia de la curva es parecerse a la de los dos casos anteriores, la curva presenta una tendencia de crecimiento rápido pero conforme transcurre el tiempo de corte esta curva empieza a tomar valores de desgaste más bajos. De la misma manera sucede a la velocidad de 119.38 m/min con el inserto normal ya que se desgasta más rápidamente que el inserto Wiper aunque llega un momento en que el comportamiento de las gráficas tiende a ser de la

misma manera. Ya que aunque el desgaste de flanco en el inserto normal aumenta más rápido en un principio llega un momento en que las curvas empiezan a crecer de manera semejante. Lo que quiere decir que a velocidades de corte bajas el comportamiento de los dos tipos de insertos de corte es muy similar en cuanto al crecimiento del desgaste de flanco. Mientras que si se compara a la misma velocidad de corte el inserto que emplea refrigerante el desgaste de flanco es mucho menor.

De lo anterior se puede concluir que a bajas velocidades de corte en un mecanizado en seco es recomendable emplear cualquiera de los dos insertos. El factor a controlar para que se evite que se enrolle la viruta en la pieza de trabajo y se reduzca el tiempo de corte o de mecanizado es el avance. Este factor también está relacionado con el acabado superficial que se quiere lograr en la pieza de trabajo.

Mientras que para velocidades de corte grandes, es recomendable emplear un inserto wiper ya que presenta menos desgaste de flanco que un inserto normal en el mismo tiempo de corte. Esto se determinará a partir de las regresiones. El empleo de refrigerante de corte a altas velocidades de corte provoca que el desgaste de flanco sea menor, ya que aunque en algún momento la curva se intersecta con la curva del inserto Wiper en seco, esta curva no crecerá tan rápidamente como en el caso donde se emplea el inserto Wiper en seco.

Por lo que es necesario evaluar las condiciones de maquinado que se requieren emplear para poder elegir un inserto de corte ya que la calidad GC 4015 cumple con las necesidades que se requieren para poder realizar un mecanizado en seco de aceros de baja aleación como es el caso del acero aleado AISI 4140.

6.3 Regresiones lineales

Como se mostró anteriormente la correlación que existe entre las variables que se están analizando (desgaste de flanco VB vs tiempo de corte) es en todos los casos superior a 0.8 por lo que se puede establecer una relación lineal entre las variables para poder estimar un comportamiento del desgaste de flanco que se produce en los insertos en un determinado tiempo de corte por medio de una ecuación lineal.

Para realizar las regresiones lineales se empleó el software de Minitab®, junto con un intervalo de confianza del 95%.

En la figura 6.6 se muestra la regresión lineal para el inserto normal a una velocidad de 119.38 m/min.

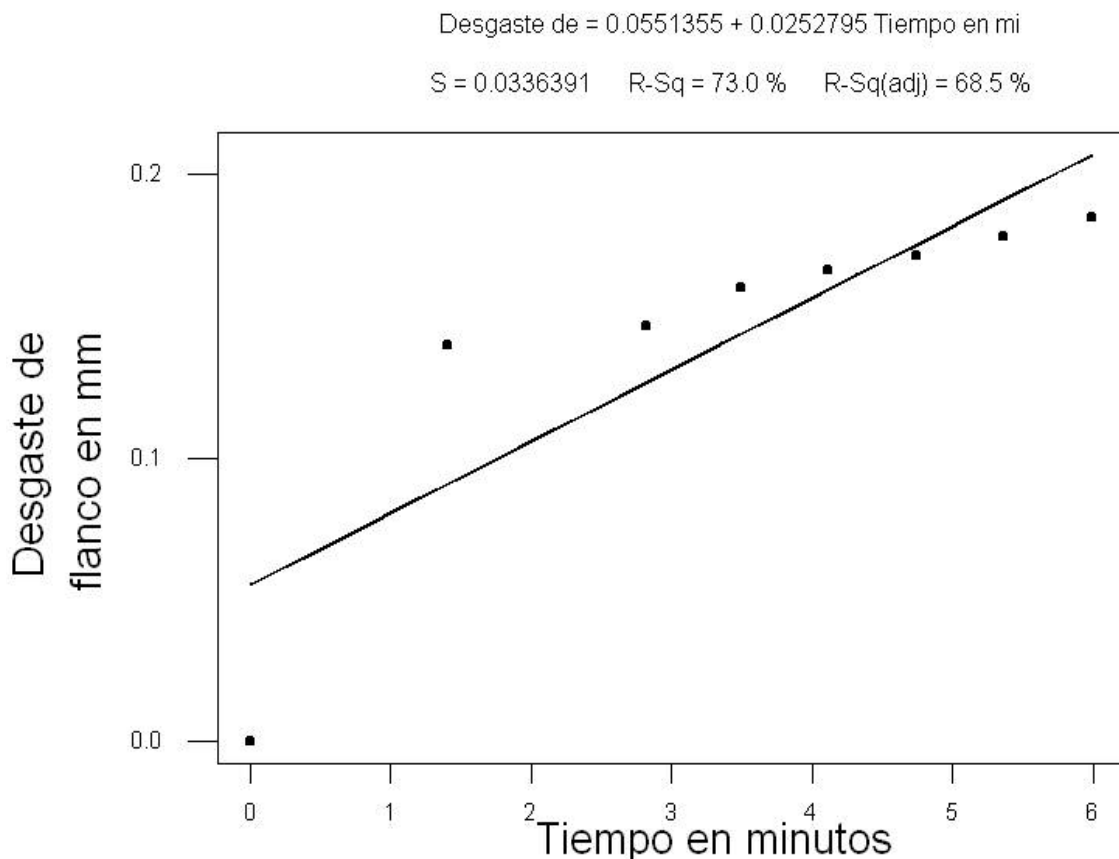


Figura 6.6 Regresión lineal para inserto normal con velocidad de 119.38 m/min

En la figura 6.7 se muestra la regresión lineal para el inserto normal con una velocidad de corte de 250.1027 m/min.

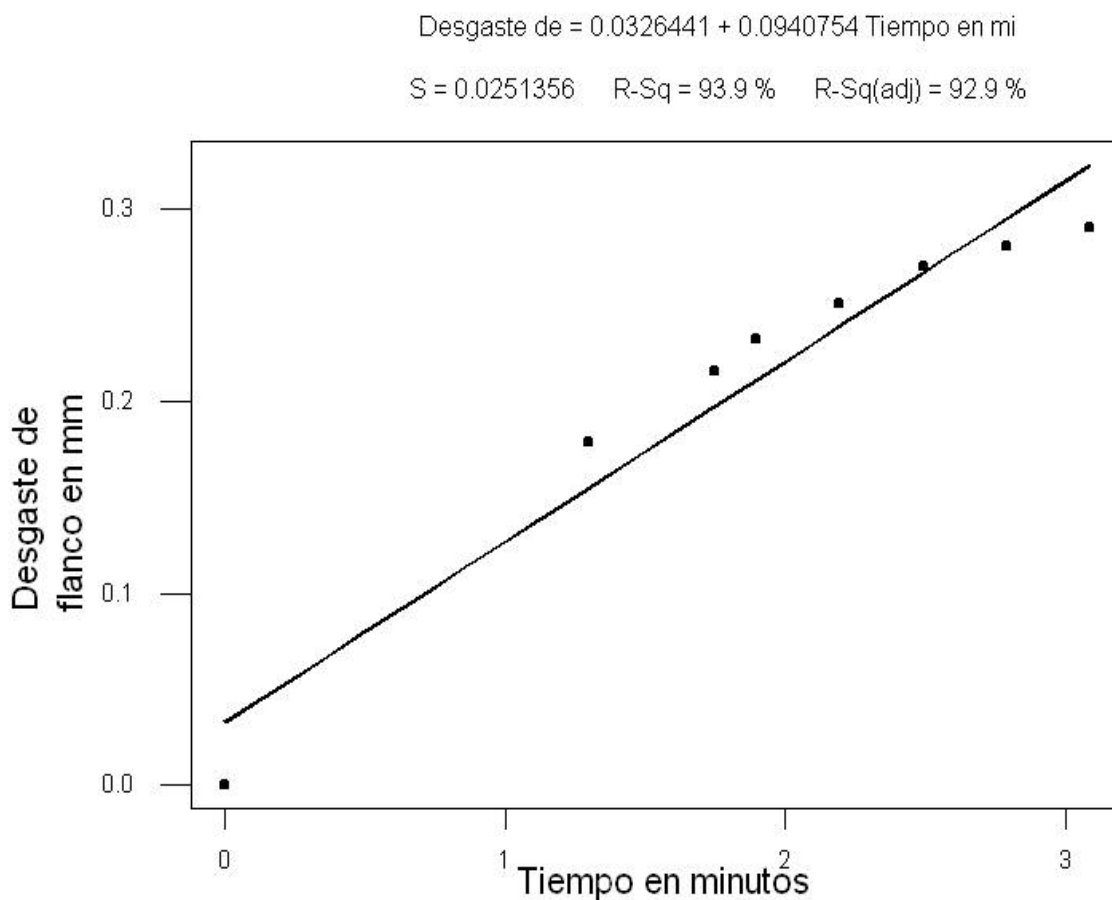


Figura 6.7 Regresión lineal para inserto normal con velocidad de 250.1027 m/min

De las gráficas mostradas en las figuras 6.6 y 6.7 y por medio del software de Minitab® pueden establecerse las ecuaciones lineales que describen el comportamiento de este inserto a estas dos velocidades de corte.

Para una velocidad de 119.38 m/min, la ecuación lineal es:

$$y = 0.0551355 + 0.0252795x \quad (6.1)$$

Para una velocidad de 250.1027 m/min la ecuación lineal es:

$$y = 0.0326441 + 0.0940754x \quad (6.2)$$

Se puede ver que en la ecuación (6.2) se tiene una mayor pendiente que en la ecuación (6.1) lo que indica que a una mayor velocidad de corte el desgaste de flanco se presenta más rápidamente que a una velocidad de corte menor.

En la figura 6.8 se presenta la regresión lineal para un inserto Wiper a una velocidad de corte de 119.38 m/min.

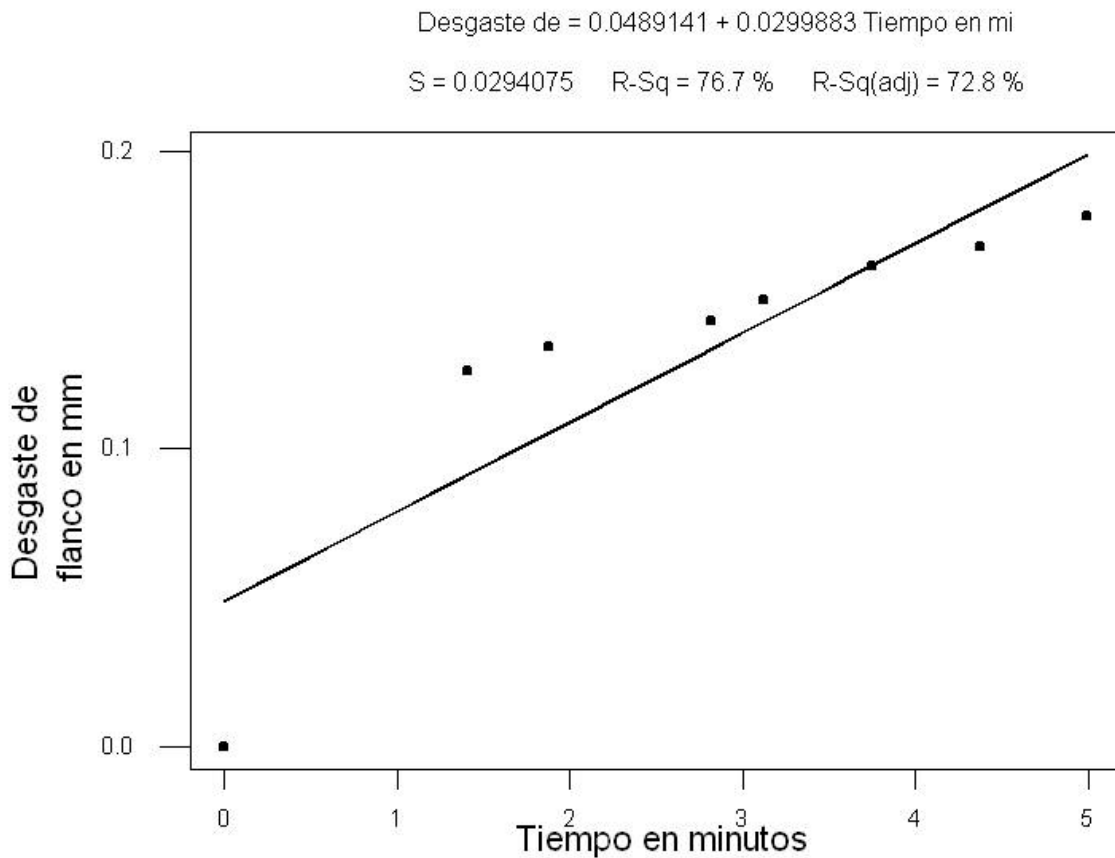


Figura 6.8 Regresión lineal para inserto Wiper con velocidad de 119.38 m/min

La ecuación lineal que describe el comportamiento del inserto Wiper a una velocidad de corte de 119.38 m/min es:

$$y = 0.0489141 + 0.0299883x \quad (6.3)$$

Comparando la ecuación 6.3 con la ecuación 6.1 se puede apreciar que para el inserto Wiper se presenta un pendiente muy similar a la que se presenta en el inserto normal . Por

lo que como se mencionó anteriormente estos dos tipos de insertos pueden emplearse a bajas velocidades de corte ya que el desgaste de flanco que presentan es muy similar.

En la figura 6.9 se presenta la regresión lineal para un inserto wiper a una velocidad de corte de corte de 250.1027 m/min.

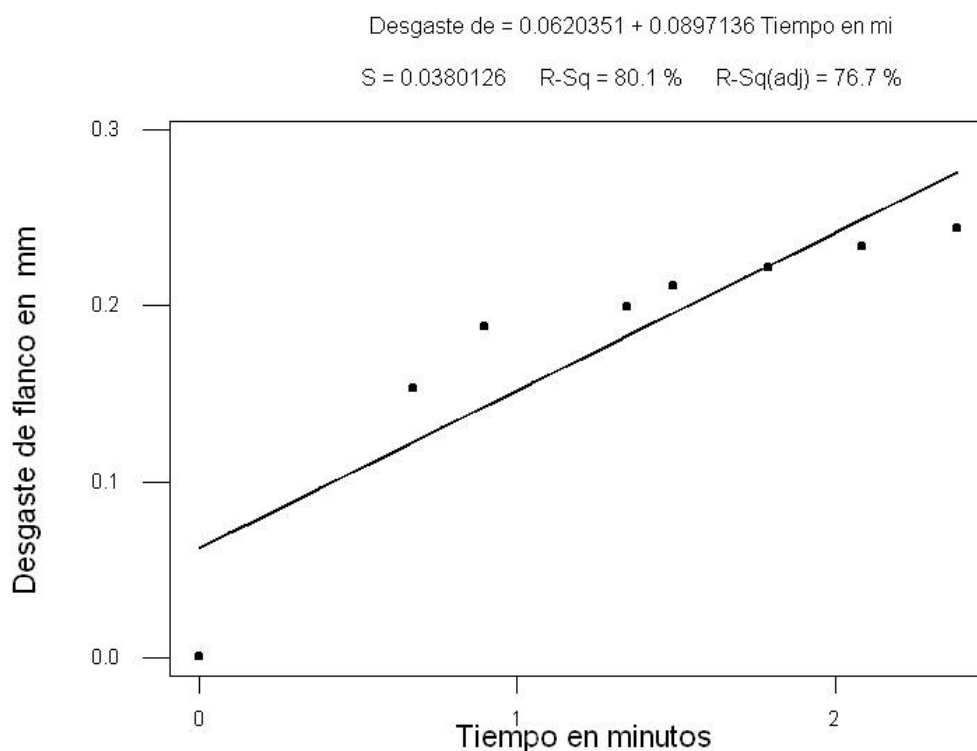


Figura 6.9 Regresión lineal para inserto Wiper con velocidad de 250.1027 m/min

La ecuación lineal que describe el comportamiento del inserto Wiper a una velocidad de corte de 250.1027 m/min es la siguiente:

$$y = 0.0620293 + 0.0897137x \quad (6.4)$$

Comparando la ecuación (6.4) con la ecuación (6.2) se puede observar que la pendiente de la curva de la gráfica del inserto Wiper es similar a la pendiente de la curva del inserto normal, por lo que a altas velocidades de corte se recomienda emplear un inserto

normal ya que el desgaste de flanco que se produce en un tiempo determinado de corte es menor del que se produce en un inserto Wiper.

En la figura 6.10 se presentan la regresión lineal para un inserto Wiper a una velocidad de corte de 119.38 m/min y de 250.1027 m/min

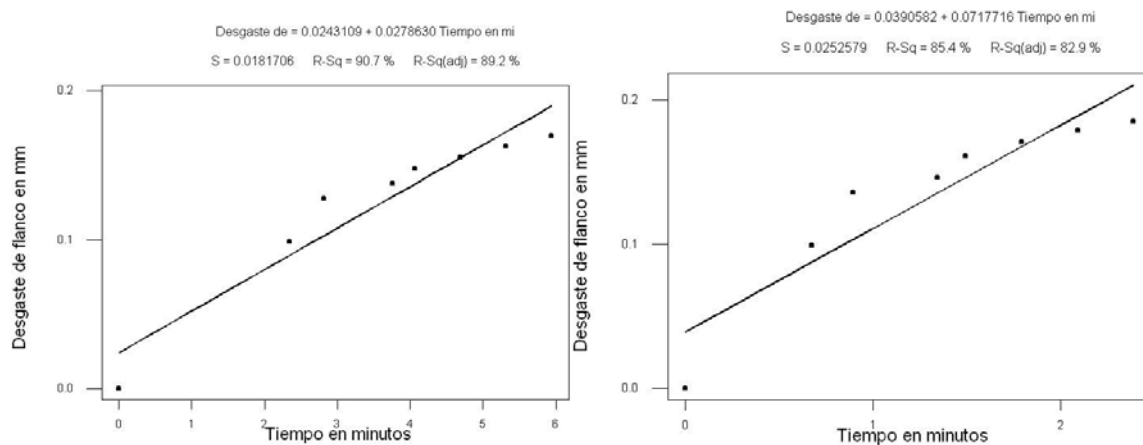


Figura 6.10 A la Izquierda regresión lineal para inserto Wiper con refrigerante a una velocidad de 119.38 m/min. A la derecha regresión lineal para inserto Wiper con refrigerante a una velocidad de 250.1027 m/min.

Las ecuaciones lineales que describen el comportamiento de este inserto a estas dos velocidades de corte.

Para una velocidad de 119.38 m/min, la ecuación lineal es:

$$y = 0.0243109 + 0.027863x \quad (6.5)$$

Para una velocidad de 250.1027 m/min la ecuación lineal es:

$$y = 0.03905882 + 0.07177156x \quad (6.6)$$

Comparando la ecuación (6.6) con las ecuaciones (6.2) y (6.4) se puede ver que la pendiente de la curva del inserto Wiper con refrigerante se encuentra en un valor intermedio entre la pendiente del curva del inserto normal en seco y de la pendiente de la curva del inserto wiper en seco. Mientras que comparando la ecuación (6.5) con las

ecuaciones (6.1) y (6.3) se puede observar que el valor de las pendientes es un valor parecido, por lo que sigue manifestándose que para velocidades de corte pequeñas el desgaste de flanco conforme transcurre el tiempo de corte es muy similar.

6.4 Aproximación de los valores de n y C según la ley de Taylor

Después de que fueron establecidas las ecuaciones que modelan el comportamiento de los insertos de corte de la serie 4000 de Sandvik calidad GC 4015 se sustituyó el valor límite de desgaste de flanco que se presenta en herramientas de carburos. Dicho valor se mencionó anteriormente en la sección 6.2 es de 0.4 mm.

Sustituyendo este valor en las ecuaciones 6.1 y 6.2 se tiene lo siguiente:

$$0.4 = 0.551355 + 0.0252795x \quad (6.7)$$

donde $x = 13.64$ minutos

$$0.4 = 0.0326441 + 0.0940754x \quad (6.8)$$

donde $x = 3.905$ minutos

Por tanto para el inserto normal a una velocidad de corte de 119.38 m/min se tiene una vida útil de 13.64 minutos y para una velocidad de 250.1027 m/min se tiene una vida útil de 3.905 minutos. Realizando el mismo procedimiento y sustituyendo el valor de 0.4 mm en las ecuaciones (6.3), (6.4), (6.5) y (6.6) se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la tabla 6.8

Es importante mencionar que el desgaste de flanco fue medido en un metaloscopio Nikon EpipHot 200 con un aumento de 100X. Este procedimiento de desgaste de flanco se ilustra en el capítulo cinco. La metodología empleada fue cilindrar una barra de 19.0 mm. de diámetro en una longitud de 50.0 mm. El tiempo para medir dependió del número de pasadas que se realizaban a la barra.

Tabla 6.8
Vida útil

	Velocidad (m/min)	Tiempo de vida (min)
Inserto normal	119.38	13.64
	250	3.91
Inserto Wiper	119.38	11.7
	250	3.76
Inserto Wiper con refrigerante	119.38	13.48
	250	5.03

Fuente: Tabla del autor

Partiendo de la ecuación (2.35) de Taylor para el inserto normal se tiene los siguiente:

$$250 \cdot 1027 * (3.905)^n = 119.38 * (13.64)^n = C$$

$$\frac{250}{119.38} = \left(\frac{13.64}{3.905}\right)^n$$

$$\log 2.09415 = n \log 3.49296$$

$$0.321 = n(0.543)$$

$$n = 0.591$$

$$C = 559.23$$

Partiendo de la ecuación (2.35) de Taylor para el inserto Wiper se tiene lo siguiente:

$$250 * (3.76)^n = 119.38 * (11.7)^n = C$$

$$\frac{250}{119.38} = \left(\frac{11.7}{3.76}\right)^n$$

$$\log 2.09415 = n \log 3.1117$$

$$0.321 = n(0.04929)$$

$$n = 0.6511$$

$$C = 592.17$$

Partiendo de la ecuación (2.35) de Taylor para el inserto Wiper con refrigerante se tiene lo siguiente:

$$250 * (5.029)^n = 119.38 * (13.48)^n = C$$

$$\frac{250}{119.38} = \left(\frac{13.48}{5.029}\right)^n$$

$$\log 2.09415 = n \log 2.68$$

$$0.321 = n(0.4282)$$

$$n = 0.749$$

$$C = 838$$

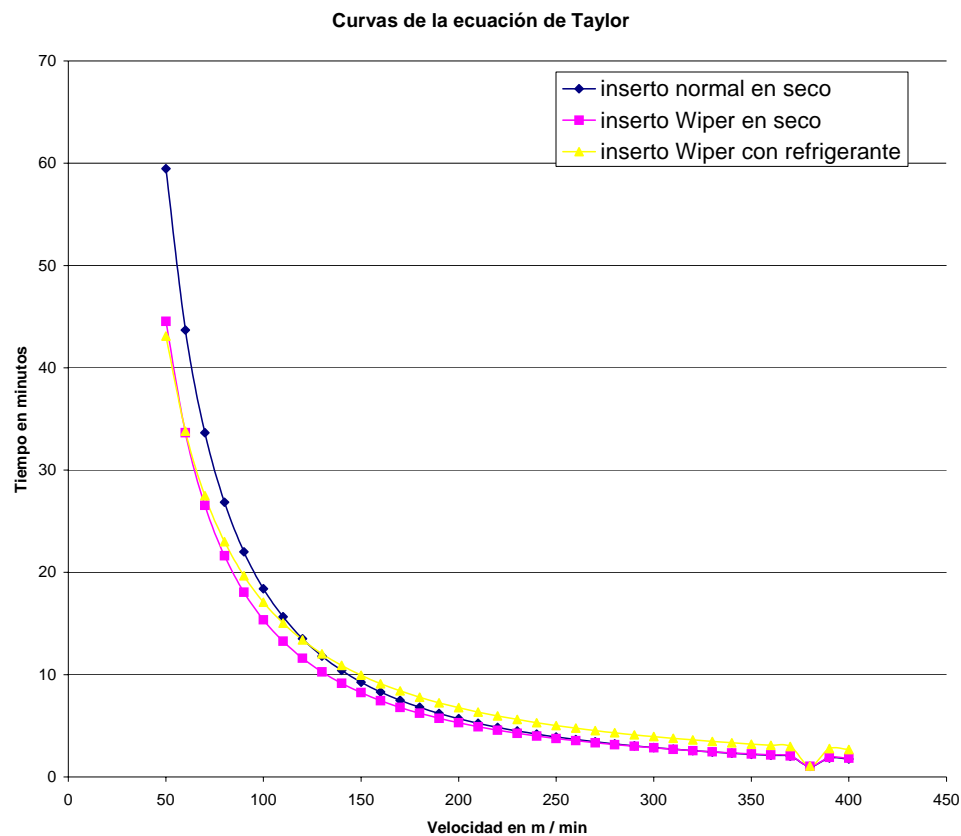


Figura 6.11 Curvas de vida de la herramienta según la ecuación de Taylor

Después de determinar la vida de los insertos de corte en base a la ecuación de Taylor,

se puede ver en la figura 6.11 que para distintos valores de corte el tiempo en que duran los insertos es muy similar, ya sea si se emplea un inserto Wiper, un inserto normal o un inserto Wiper con refrigerante.

En base a que no existe un cambio significativo en la vida del inserto se optó por seleccionar el inserto normal para el mecanizado de las probetas de tensión bajo la norma ASTM E8 - 01

En la figura 6.12 se muestran imágenes del desgaste máximo de flanco producido en los insertos con los que se estuvo trabajando.

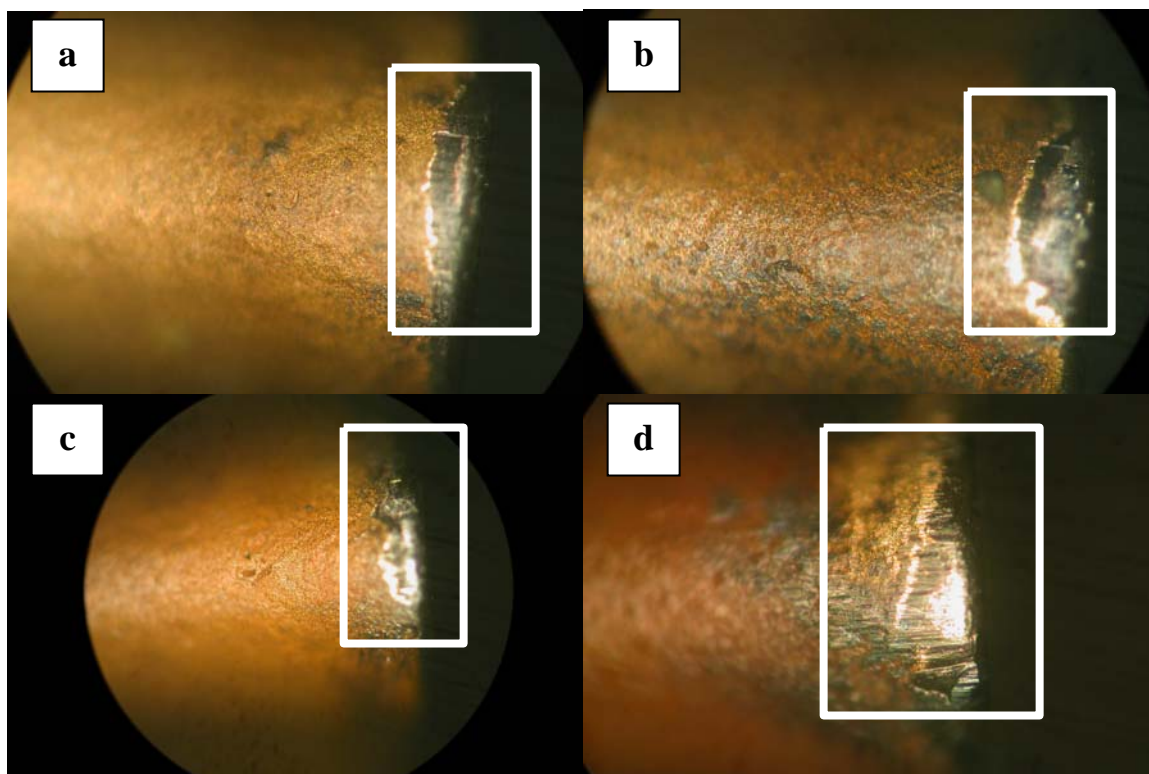


Figura 6.12 a) Arriba a la izquierda inserto normal con velocidad de 119.38 m/min. b) Arriba a la derecha inserto normal con velocidad de 250.1027 m/min. c) Abajo a la izquierda inserto Wiper con velocidad de 119.38 m/min. d) Abajo a la derecha inserto Wiper con velocidad de 250.1027 m/min. Se presenta el desgaste de flanco máximo en cada uno de los insertos empleados.

6.5 Temperaturas de corte

Como se mencionó anteriormente para determinar la temperatura en la zona de corte de manera práctica se empleó el termómetro infrarojo Raytek descrito en el capítulo cuatro. Para determinar la temperatura en la zona de corte de manera teórica se empleó la relación de Cook descrita en el capítulo dos sección 2.11.1. La temperatura ambiente se asumió de 20 °C en todos los casos.

En la tabla 6.9 se muestran los resultados obtenidos en las mediciones de temperaturas. En este caso la profundidad de corte fue de 0.7 mm, el avance de 0.1 mm/rev y la velocidad de corte se fue variando en un rango de 1.98960 y 4.1 m/s.

Tabla 6.9
Temperaturas de corte

Velocidad de corte(m/s)	Avance (mm/rev)	Incremento de Temperatura2(°C)	Temperatura teórica2 (°C)	Incremento de Temperatura1(°C)	Temperatura teórica1 (°C)	Temperatura práctica	% error 2	% error 1
1.98968	0.1	499.53	519.53	762.00	782.00	587	11.49	24.94
2	0.1	500.40	520.40	763.32	783.32	588	11.50	24.93
2.1	0.1	508.60	528.60	775.83	795.83	597	11.46	24.98
2.2	0.1	516.55	536.55	787.96	807.96	606	11.46	25.00
2.3	0.1	524.26	544.26	799.72	819.72	615	11.50	24.97
2.4	0.1	531.75	551.75	811.15	831.15	623	11.44	25.04
2.5	0.1	539.04	559.04	822.26	842.26	631	11.40	25.08
2.6	0.1	546.13	566.13	833.08	853.08	639	11.40	25.09
2.7	0.1	553.04	573.04	843.63	863.63	647	11.43	25.08
2.8	0.1	559.79	579.79	853.91	873.91	655	11.48	25.05
2.9	0.1	566.37	586.37	863.96	883.96	662	11.42	25.11
3	0.1	572.81	592.81	873.78	893.78	670	11.52	25.04
3.1	0.1	579.11	599.11	883.38	903.38	677	11.51	25.06
3.2	0.1	585.27	605.27	892.78	912.78	684	11.51	25.06
3.3	0.1	591.30	611.30	901.99	921.99	691	11.53	25.05
3.4	0.1	597.22	617.22	911.01	931.01	697	11.45	25.13
3.5	0.1	603.01	623.01	919.85	939.85	704	11.50	25.09
3.6	0.1	608.70	628.70	928.53	948.53	710	11.45	25.15
3.7	0.1	614.29	634.29	937.05	957.05	717	11.54	25.08
3.8	0.1	619.77	639.77	945.42	965.42	722	11.39	25.21
3.9	0.1	625.16	645.16	953.64	973.64	729	11.50	25.13
4	0.1	630.46	650.46	961.72	981.72	735	11.50	25.13
4.1	0.1	635.67	655.67	969.67	989.67	740	11.40	25.23

Fuente: Tabla del autor

En la tabla 6.9, se puede observar que el porcentaje de error entre la temperatura práctica y la temperatura teórica₂ es del 11.5%. Mientras que la diferencia de temperatura práctica y la temperatura teórica₁ es del 25%. Lo anterior indica que la energía específica de corte del material es más cercana al valor de $1.77 \text{ J} / \text{mm}^3$ que al valor de $2.7 \text{ J} / \text{mm}^3$. Estos valores se especificaron de tablas mostradas en el capítulo 2 y apéndice C. En la figura 6.13 se observan las curvas de los datos mostrados en la tabla 6.9

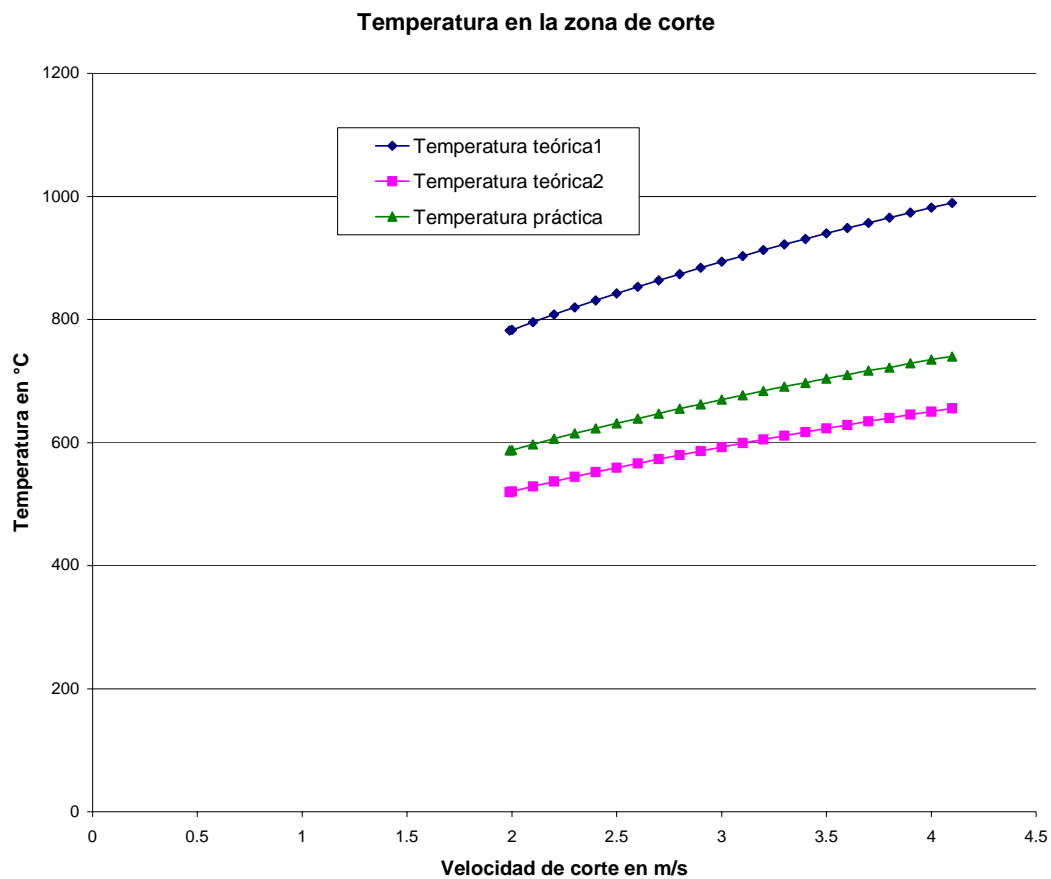


Figura 6.13 Comparación de temperaturas de corte con avance de 0.1 mm/rev y profundidad de 0.7 mm.

Como se puede observar en la figura 6.13, manteniendo el avance y la profundidad de corte constantes, la temperatura en todos los casos aumenta conforme se incrementa la velocidad de corte. La temperatura de corte teórica se calculó empleando dos valores de

energía específica de corte, para la temperatura de corte teórica 1 se empleó el valor de 2.7 J/mm³ y para la temperatura de corte teórica 2 se empleó el valor de 1.77 J/mm³. Como puede apreciarse la temperatura de corte práctica se encuentra en medio de los valores teóricos por lo que resulta razonable el valor determinado. Los valores de energía de corte se especifican en el capítulo dos y en el capítulo tres. Debido al rango de temperaturas del termómetro no fue posible determinar las temperaturas de manera práctica para un avance de 0.3. Pero es importante mencionar que el otro parámetro de corte que produce un aumento en la temperatura de corte es el avance. En la tabla 6.10 y 6.11 se puede observar el incremento de la temperatura al incrementarse el avance. La profundidad de corte fue de 0.7 mm y las velocidades de corte se fueron variando en un rango de 1.98968 a 4.1 m/s.

Tabla 6.10

Incremento de temperatura con avance de 0.2 mm/rev

Velocidad de corte(m/s)	Avance (mm/rev)	Incremento de Temperatura (°C)	Temperatura teórica2 (°C)	Temperatura práctica	% error
1.98968	0.2	629.37	649.37	695	9.44
2	0.2	630.46	650.46	696	9.42
2.1	0.2	640.80	660.80	707	9.36
2.2	0.2	650.81	670.81	718	9.36
2.3	0.2	660.53	680.53	728	9.27
2.4	0.2	669.96	689.96	738	9.22
2.5	0.2	679.14	699.14	748	9.21
2.6	0.2	688.08	708.08	758	9.22
2.7	0.2	696.79	716.79		
2.8	0.2	705.29	725.29		
2.9	0.2	713.59	733.59		
3	0.2	721.70	741.70		
3.1	0.2	729.63	749.63		
3.2	0.2	737.39	757.39		
3.3	0.2	744.99	764.99		
3.4	0.2	752.44	772.44		
3.5	0.2	759.75	779.75		
3.6	0.2	766.92	786.92		
3.7	0.2	773.95	793.95		
3.8	0.2	780.86	800.86		
3.9	0.2	787.65	807.65		
4	0.2	794.33	814.33		
4.1	0.2	800.90	820.90		

Fuente: Tabla del autor

Tabla 6.11
Incremento de temperatura con avance de 0.3 mm/rev

Velocidad de corte(m/s)	Avance (mm/rev)	Incremento de Temperatura (°C)	Temperatura final2 (°C)	Temperatura práctica	% Error
1.98968	0.3	720.45	740.45	695	6.14
2	0.3	721.70	741.70	696	6.16
2.1	0.3	733.53	753.53	707	6.17
2.2	0.3	744.99	764.99	718	6.14
2.3	0.3	756.11	776.11	728	6.20
2.4	0.3	766.92	786.92	738	6.22
2.5	0.3	777.42	797.42	748	6.20
2.6	0.3	787.65	807.65	758	6.15
2.7	0.3	797.63	817.63		
2.8	0.3	807.35	827.35		
2.9	0.3	816.85	836.85		
3	0.3	826.14	846.14		
3.1	0.3	835.22	855.22		
3.2	0.3	844.10	864.10		
3.3	0.3	852.80	872.80		
3.4	0.3	861.33	881.33		
3.5	0.3	869.70	889.70		
3.6	0.3	877.90	897.90		
3.7	0.3	885.96	905.96		
3.8	0.3	893.87	913.87		
3.9	0.3	901.64	921.64		
4	0.3	909.28	929.28		
4.1	0.3	916.80	936.80		

Fuente: Tabla del autor

En las tablas 6.10 y 6.11 se muestra que el porcentaje de error es del 9% en el caso de un avance de 0.2 mm/rev y que para un avance de 0.3 mm/rev el error es del 6%. Lo que indica que el valor encontrado de manera práctica por medio del termómetro infrarojo es un valor razonable si se compara con el valor que fue calculado de manera teórica. Como se mencionó anteriormente, debido al rango de temperaturas del termómetro infrarojo no fue posible realizar mediciones de temperatura mayores a 760 °C.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el diseño de experimentos. Se realizó un diseño de experimentos factorial como se explicó anteriormente. La variable de respuesta en este caso consistió en la temperatura medida con el termómetro Raytek.

En la tabla 6.12 se muestra la tabla ANOVA que arroja los efectos que son significativos o aportan información en la variable de respuesta en este caso la temperatura en el proceso de torneado. La mayor suma de cuadrados es la de los efectos principales por lo que son los factores que más afectan a la temperatura, es decir la velocidad y profundidad de corte, el avance, el tipo de inserto y el tipo de mecanizado. En segundo lugar están las interacciones dobles. Las interacciones triples, cuádruples y quíntuples afectan realmente poco a la variable de respuesta.

Tabla 6.12
Análisis de varianza de temperatura

ANOVA

Analysis of Variance for Y (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	5	2579028	2579028	515806	*	*
2-Way Interactions	10	73899	73899	7390	*	*
3-Way Interactions	10	27568	27568	2757	*	*
4-Way Interactions	5	12929	12929	2586	*	*
5-Way Interactions	1	282	282	282	*	*
Residual Error	0	0	0	0		
Total	31	2693707				

Fuente: Tabla del autor

A continuación en la tabla 6.13 se presenta el efecto de los 5 factores que más afectan a la temperatura. El efecto que afecta principalmente a la temperatura es el tipo de mecanizado con el que se realiza el proceso de torneado: en húmedo o en seco. Posteriormente el segundo factor que afecta es el avance. Finalmente la velocidad y la profundidad de corte tienen todavía un efecto considerable sobre la variable de respuesta, en este caso la temperatura en el proceso de torneado. El tipo de inserto es el factor de menor importancia sobre la variable de respuesta. La interacción doble como avance y tipo de mecanizado, y la interacción triple como avance, velocidad y profundidad de corte generan un efecto considerable en la variable de respuesta.

Tabla 6.13

Diseño factorial de temperatura

Estimated Effects and Coefficients for Y (coded units)

Term	Effect	Coef
Constant		398.7
Avance	70.2	35.1
Velocidad	11.6	5.8
Profundidad	-29.7	-14.8
Mecanizado	-562.4	-281.2
Inserto	-10.1	-5.0
Avance*Velocida	0.2	0.1
Avance*Profundi	29.7	14.8
Avance*Mecaniza	-73.3	-36.7
Avance*Inserto	18.1	9.0
Velocida*Profundi	-30.9	-15.5
Velocida*Mecaniza	-11.4	-5.7
Velocida*Inserto	-7.3	-3.7
Profundi*Mecaniza	33.1	16.5
Profundi*Inserto	-14.6	-7.3
Mecaniza*Inserto	14.4	7.2
Avance*Velocida*Profundi	34.2	17.1
Avance*Velocida*Mecaniza	6.4	3.2
Avance*Velocida*Inserto	13.6	6.8
Avance*Profundi*Mecaniza	-24.8	-12.4
Avance*Profundi*Inserto	16.1	8.0
Avance*Mecaniza*Inserto	-4.7	-2.3
Velocida*Profundi*Mecaniza	28.6	14.3
Velocida*Profundi*Inserto	-12.3	-6.2
Velocida*Mecaniza*Inserto	10.4	5.2
Profundi*Mecaniza*Inserto	8.9	4.5
Avance*Velocida*Profundi* Mecaniza	-33.6	-16.8
Avance*Velocida*Profundi* Inserto	11.1	5.5
Avance*Velocida*Mecaniza* Inserto	-5.9	-3.0
Avance*Profundi*Mecaniza* Inserto	-14.2	-7.1
Velocida*Profundi*Mecaniza *Inserto	11.4	5.7
Avance*Velocida*Profundi* Mecaniza*Inserto	-5.9	-3.0

Fuente: Tabla del autor

Tipo de mecanizado

El valor del efecto de -562.4 indica que es el principal factor que afecta sobre la temperatura y que ésta decrece cuando este factor pasa de un nivel bajo a un nivel alto, es decir, la temperatura disminuye considerablemente en un mecanizado en húmedo. Por tanto el choque térmico que se presenta es mayor.

Avance

El valor del efecto de 70.2 indica que la temperatura en el mecanizado aumenta cuando se pasa de un avance de 0.1 mm/rev a un avance de 0.3 mm/rev. Por lo que a avances bajos la temperatura en la zona de corte es menor.

Velocidad

El valor de efecto de 11.6 indica que la temperatura en el mecanizado aumenta cuando se pasa de un nivel bajo a un nivel alto, es decir cuando se aumenta la velocidad de corte de 119.3808 m/min (2000 rpm) a 250.1027 m/min (4190 rpm).

Profundidad

El valor de efecto de -29.7 indica que la temperatura en el mecanizado se reduce cuando se pasa de un nivel bajo a un nivel alto, es decir, de una profundidad de 0.7 mm. a una profundidad de 2 mm.

Tipo de inserto

El valor de efecto de -10.1 es el valor que menor efecto tiene sobre la variable de respuesta. Existe una ligera disminución de temperatura cuando se trabaja con un inserto normal que cuando se emplea un inserto wiper.

*Avance * Mecanizado*

Esta interacción doble tiene un valor de efecto de -73.3 y es la que más influye sobre la variable de respuesta. Esto quiere decir que pasando de un avance alto y un mecanizado en seco a un avance bajo y un mecanizado en húmedo se reduce considerablemente la temperatura. La figura 6.14 muestra el diagrama de Pareto para el diseño factorial de la temperatura en la zona de corte. Donde se observan mejor los principales factores que afectan a la variable de respuesta como se mencionó anteriormente. Con un nivel de confianza del 95%.

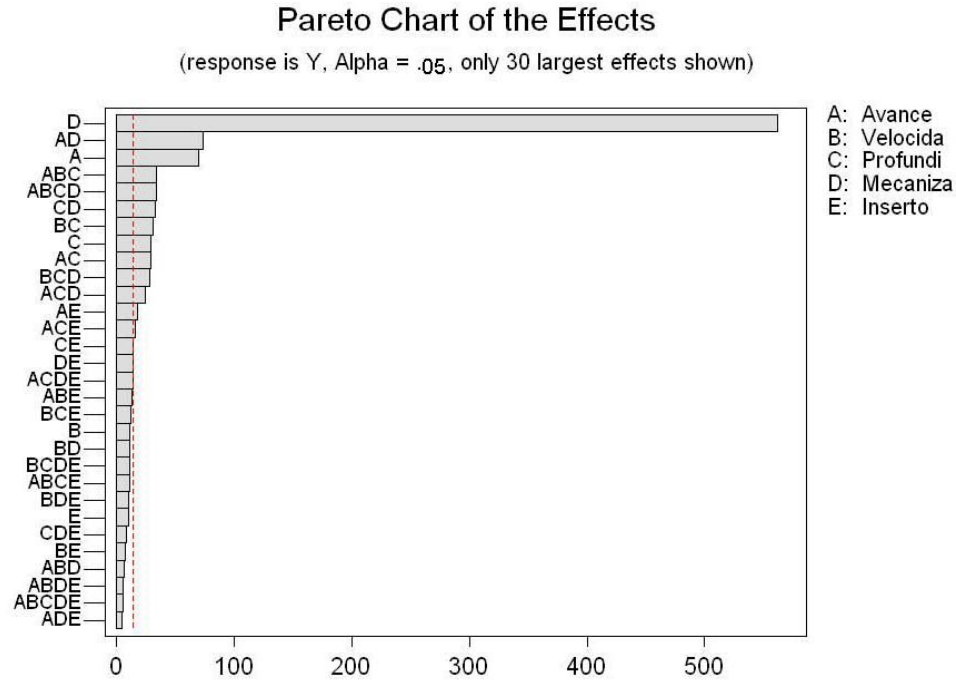


Figura 6.14 Diagrama de Pareto de temperaturas

En la figura 6.15 se muestra que los dos factores que influyen para reducir la temperatura son el tipo de mecanizado y el avance. Aunque la disminución de la temperatura se logra empleando: tipo de mecanizado húmedo y avance bajo principalmente. Velocidad de corte baja, profundidad de corte alta y tipo de inserto Wiper como segundos factores.

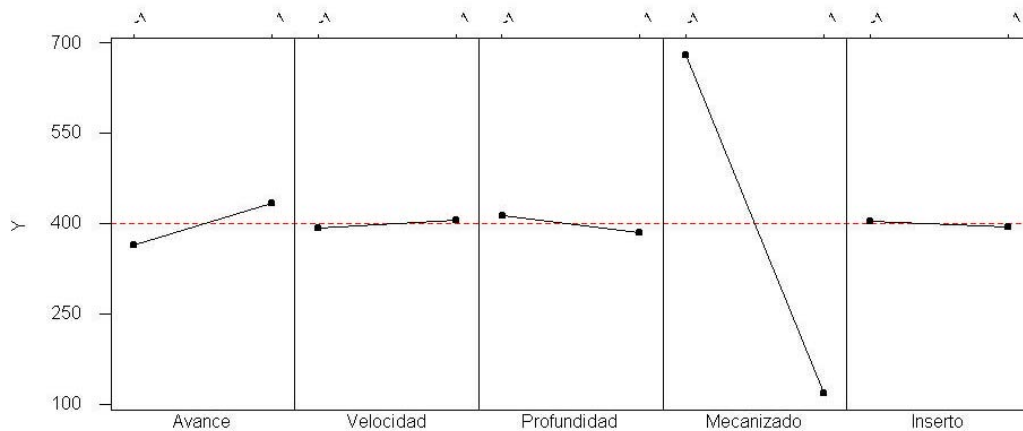


Figura 6.15 Efectos principales en la temperatura de corte

6.6 Fuerzas de corte

En base al diseño de experimentos realizado para obtener los valores que más afectan sobre las variables de respuesta: acabado superficial y temperatura en el mecanizado. Se determinaron las fuerzas de corte de manera práctica y teórica como se explicó en el capítulo 4 y capítulo 5. Midiendo la potencia en el GPD 506 que se generaba en cada operación según la matriz de experimentos.

Hay que mencionar que para el valor de la fuerza de corte teórica 1 se empleó un valor de energía específica de corte de $2.7 \text{ J} / \text{mm}^3$ y para el valor de la fuerza de corte teórica 2 un valor de $1.77 \text{ J} / \text{mm}^3$. Estos resultados se pueden apreciar en la base de datos que se presenta en el apéndice D. En base a los resultados se puede establecer los siguiente:

- Los factores que más influyen para un incremento en la fuerza de corte son el avance y la profundidad de corte. Es decir a profundidades de corte y avances grandes se incrementa la fuerza de corte, mientras que a profundidades de corte y avances bajos se reduce la fuerza de corte. También juega un papel importante la interacción avance y profundidad de corte.
- La velocidad de corte no es un parámetro que tenga gran influencia sobre la fuerza de corte.
- El tipo de inserto que se emplea no es un parámetro que tenga gran influencia sobre la fuerza de corte.
- El tipo de mecanizado es un parámetro que tiene una influencia muy pequeña sobre la fuerza de corte. Esto se debe a la ligera variación en el consumo de potencia que existe entre un proceso de mecanizado en seco y uno en húmedo.
- Los valores que se registran son valores promedios después de realizar tres pruebas.

En la tabla 6.14 se muestra la relación que existe entre la fuerza de corte calculada de manera teórica, práctica y por medio del método de k_{s0} . Estos valores son para un inserto normal mecanizando en seco. Puede observarse como los valores para la fuerza de corte teórica no se afectan cuando se varía la velocidad de corte. Y para los valores de fuerza de corte práctica existe una ligera variación cuando se varía la velocidad de corte.

Tabla 6.14

Fuerza de corte para un inserto normal en seco

Profundidad 0.7 mm Velocidad de corte 120 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza k_{s0} en (N)
0.1	189	123.9	425.92	295
0.2	378	247.8	480	513.69
0.3	567	371.1	511.11	710.5
Profundidad 2.0 mm Velocidad de corte 120 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza k_{s0} en (N)
0.1	540	354	618.73	842.98
0.2	1080	708	813.87	1436.49
0.3	1620	1062	1009	2030
Profundidad 0.7 mm Velocidad de corte 250 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza k_{s0} en (N)
0.1	189	123.9	325.29	295
0.2	378	247.8	400	502.75
0.3	567	371.7	460.82	710.5
Profundidad 2.0 mm Velocidad de corte 250 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza k_{s0} en (N)
0.1	540	354	544.05	842.98
0.2	1080	708	780	1436.525
0.3	1620	1062	963.74	2030.07

Fuente: Tabla del autor

En la tabla 6.14 puede observarse que entre las fuerzas de corte teórica existe una diferencia entre ellas. Esto se debe al valor de la energía de corte que se empleó para el cálculo de la fuerza de corte de manera teórica. Dichos valores fueron mencionados anteriormente y son de 2.7 J / mm^3 para la fuerza de corte teórica 1 y de 1.77 J / mm^3 para la fuerza de corte teórica 2. Una vez que se estableció por medio de la temperatura en la zona de corte que el valor de la energía de corte corresponde a un valor de 1.77 J / mm^3 para un acero aleado AISI 4140 se observa que la diferencia de los valores de las fuerza de corte práctica y la fuerza de corte teórica 1 es en ocasiones superior al 230%. Estas diferencias en los valores dependen del avance y de la profundidad de corte con que se esta trabajando.

El método de ks_0 también presenta variaciones con respecto a la fuerza de corte práctica. La diferencia más crítica entre un método y otro es del 50%

Estas variaciones tan grandes que se presentan en los métodos para determinar las fuerzas de corte se deben principalmente a que no se cuenta con un dinamómetro para poder determinar la fuerza de corte de manera práctica. El método empleado para determinar la fuerza de corte práctica fue tratado en el capítulo cuatro. Este método depende del diámetro de la pieza que se esta mecanizando y de la razón de material removido (MRR), es por esta razón principalmente que el método empleado para el cálculo de la fuerza de corte práctica depende en gran parte del diámetro de la pieza a mecanizar mientras que para el cálculo de la fuerza de corte teórica se depende del diámetro de la pieza y de la razón de material removido. Lo que provoca que exista una gran variación entre los métodos empleados para determinar las fuerzas de corte de manera teórica y práctica. Pero el comportamiento de la fuerza de corte en todos los casos es el mismo como se mencionó anteriormente y se observa en las figuras siguientes.

En la figura 6.16 se muestra el comportamiento de la fuerza de corte práctica dependiendo de los parámetros empleados.

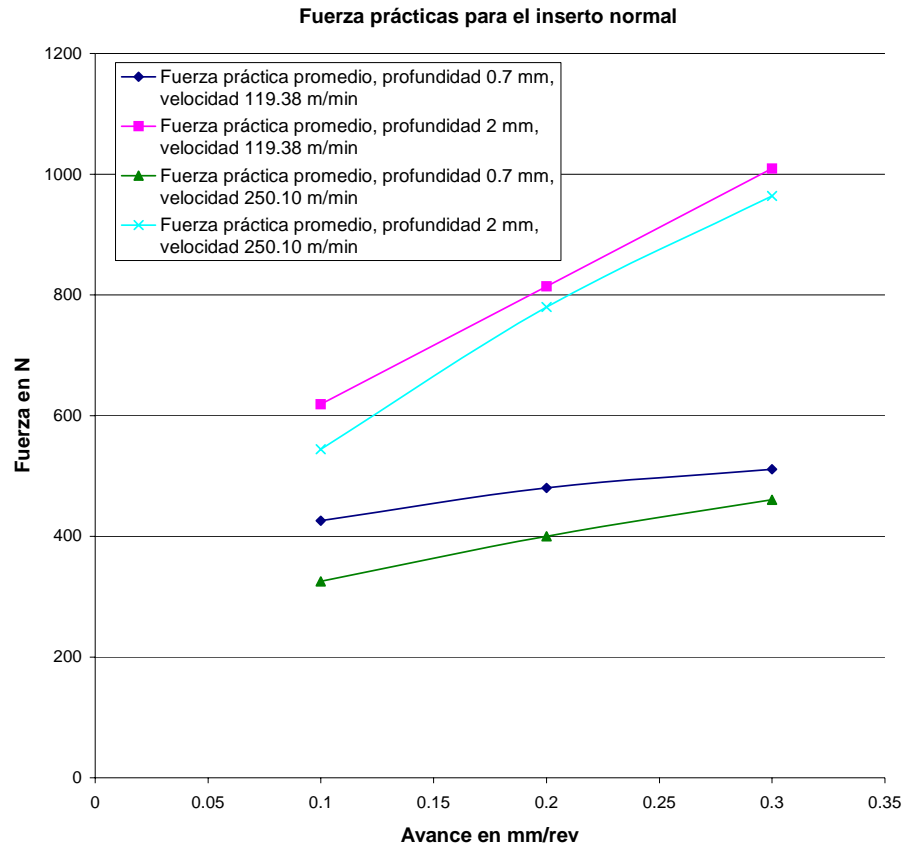


Figura 6.16 Fuerza de corte práctica promedio para un inserto normal en seco

En la figura 6.16 se aprecia como un incremento en el avance y en la profundidad de corte causan un aumento en la fuerza de corte. Se puede apreciar que el factor profundidad de corte es el que más afecta a la fuerza de corte. En la figura 6.17 se muestra el comportamiento de la fuerza de corte de manera teórica, práctica y por el método de k_{s0} . En esta gráfica puede observarse que existe variación entre los métodos empleados para el cálculo de la fuerza de corte. Esto se debe a la forma en que emplea cada método para determinar la fuerza de corte.

Los parámetros de corte que se mantuvieron constantes fueron la velocidad de corte: 119.38 m/min y la profundidad de corte: 0.7 mm.

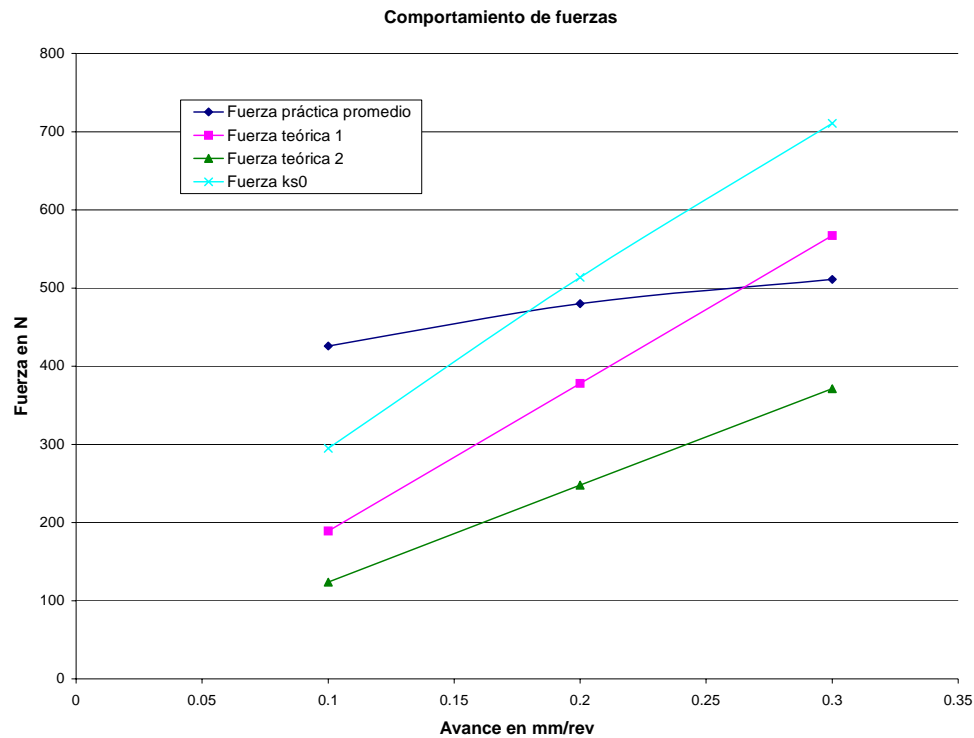


Figura 6.17 Comportamiento de la fuerza de corte en un inserto normal en seco

En la figura 6.17 se aprecia como el comportamiento de la fuerza de corte es igual empleando cualquier método. Esto es que cuando se incrementa el avance la fuerza de corte se incrementa.

En la tabla 6.15 se muestran los valores para la fuerza de corte de manera teórica, práctica y empleando el método de k_{s0} en un proceso de mecanizado empleando fluido de corte. Comparando los valores con los que se muestran en la tabla 6.14 se puede apreciar que solo existe una variación entre el 5 y 24% en los valores de la fuerza de corte de manera práctica. Esto se debe a la variación que existe en el consumo de potencia entre un método y otro. Pero puede verse que el tipo de mecanizado no influye sobre la fuerza de corte.

Tabla 6.15

Fuerza de corte para un inserto normal en húmedo

Profundidad 0.7 mm Velocidad de 119.38 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza ks_0 en (N)
0.1	189	123.9	369.13	295
0.2	378	247.8	460	513.69
0.3	567	371.1	539.5	710.5
Profundidad 2.0 mm Velocidad de 119.38 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza ks_0 en (N)
0.1	540	354	618.73	842.98
0.2	1080	708	780	1436.49
0.3	1620	1062	911.82	2030
Profundidad 0.7 mm Velocidad de 250.10 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza ks_0 en (N)
0.1	189	123.9	352.39	295
0.2	378	247.8	475	502.75
0.3	567	371.7	569.25	710.5
Profundidad 2.0 mm Velocidad de 250.10 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza ks_0 en (N)
0.1	540	354	606.22	842.98
0.2	1080	708	810	1436.525
0.3	1620	1062	994.83	2030.07

Fuente: Tabla del autor

Al igual que en el mecanizado en seco la fuerza de corte se incrementa si se aumenta el avance y la profundidad de corte. Mientras que variando la velocidad de corte no existe un efecto considerable sobre la fuerza de corte. Por último en la tabla 6.16 se muestran los

valores de fuerza de corte de manera teórica, práctica y empleando el método de ks_0 para un inserto Wiper en seco.

Tabla 6.16

Fuerza de corte para un inserto wiper en seco

Profundidad 0.7 mm Velocidad de corte 119.38 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza ks_0 en (N)
0.1	189	123.9	397.53	295
0.2	378	247.8	460	513.69
0.3	567	371.1	567.9	710.5
Profundidad 2.0 mm Velocidad de corte 119.38 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza ks_0 en (N)
0.1	540	354	618.73	842.98
0.2	1080	708	780	1436.49
0.3	1620	1062	1074.65	2030
Profundidad 0.7 mm Velocidad de corte 250.10 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza ks_0 en (N)
0.1	189	123.9	298.18	295
0.2	378	247.8	475	502.75
0.3	567	371.7	460.82	710.5
Profundidad 2.0 mm Velocidad de corte 250.10 m / min				
Avance (mm / rev)	Fuerza teórica (1) en (N)	Fuerza teórica (2) en (N)	Fuerza práctica promedio en (N)	Fuerza ks_0 en (N)
0.1	540	354	497.41	842.98
0.2	1080	708	810	1436.525
0.3	1620	1062	839.39	2030.07

Fuente: Tabla del autor

Comparando los datos de la tabla 6.16 con los datos de la tabla 6.14 puede apreciarse que existe una variación entre el 5 y 20% en cuanto a la fuerza de corte práctica.

Pero se puede decir que el tipo de inserto que se emplee no es un factor que afecta a la fuerza de corte.

Finalmente en la figura 6.18 puede apreciarse que los factores que más afectan sobre la fuerza de corte son el avance y la profundidad de corte. Y no influyen tanto el tipo de inserto ni el tipo de mecanizado. La velocidad de corte empleada en esta gráfica fue de 119.38 m/min. Esto es citado por Carl Leshock y Yung C. Shin en su artículo llamado “Investigation on Tool Rake Face Temperature in Turning by a Tool-Work Thermocouple Technique” publicado en Manufacturing Science and Engineering (1995) ASME.

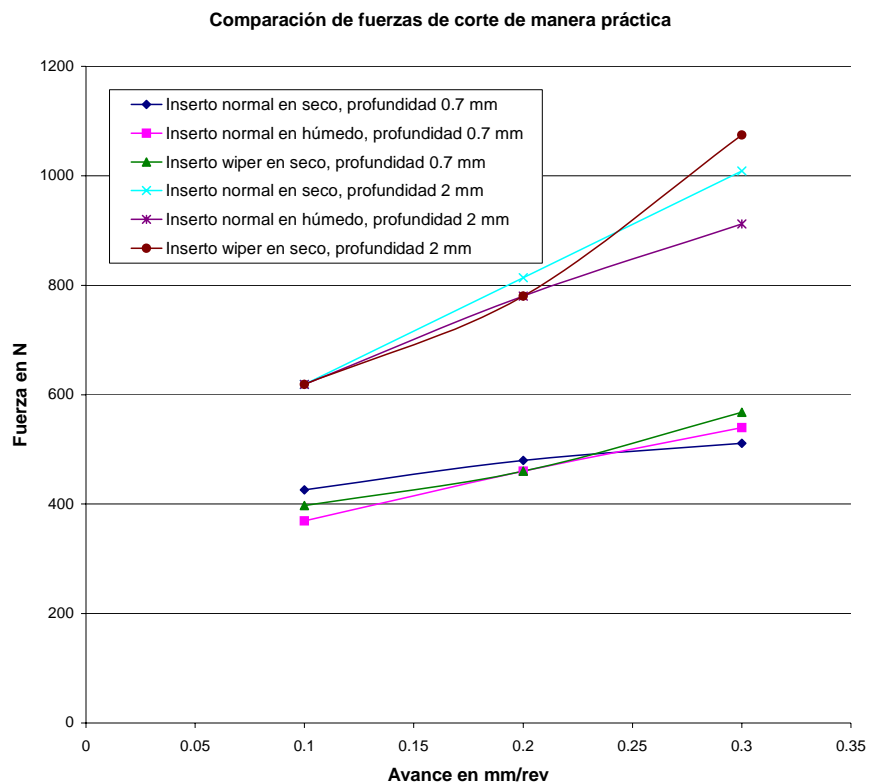


Figura 6.18 Comparación de fuerzas de manera práctica

En la figura 6.18 puede apreciarse una ligera variación en el comportamiento de la fuerza de corte de manera práctica dependiendo del tipo de mecanizado y del tipo de inserto. Pero esta variación no es considerable ya que puede observarse que las curvas se

enciman entre si. Lo que indica que no existe una variación amplia debido al tipo de mecanizado e inserto que se emplee.

6.7 Mecanizado de probetas

El desarrollo del mecanizado de las probetas fue descrito anteriormente junto con el programa de control numérico empleado. En esta parte se analiza el consumo de potencia que se generó por mecanizar probetas en seco y por maquinar probetas con refrigerante de corte. En la tabla 6.17 se muestra el consumo por pasada que se lleva a cabo en un proceso de torneado en seco.

Tabla 6.17
Potencia consumida en un proceso en seco

	Consumo de potencia (kW)	Consumo de potencia (kW)	Consumo de potencia (kW)	Consumo promedio por pasada
1. Desbaste	0.7	0.7	0.7	0.7
2. Primer ciclo de geometría	2.1	2.2	2.1	2.13
2.1. Tres pasadas de desbaste	1.25	1.2	1.6	1.35
2.2. Acabado	0.75	0.7	0.7	0.72
3. Ranurado	1.1	1.1	1.3	1.17
4.1 Segundo ciclo de geometría	2.1	2.2	3.1	2.47
4.1.1. Tres pasadas de desbaste	1.15	1.15	1.2	1.17
4.1.2. Acabado	0.75	0.7	0.7	0.72
5. Acabado de perfil de geometría	0.5	0.6	0.55	0.55
6. Roscado derecho	0.65	0.65	0.65	0.65
7. Roscado izquierdo	0.5	0.55	0.5	0.52
8. Tronzado	1.3	1.3	1.3	1.30
9. Barreno de centros	0.65	0.7	0.7	0.68
			Total	14.12

Fuente: Tabla del autor

Para registrar la potencia promedio por pasada que se realiza para el proceso de mecanizado de las probetas en seco, se registraron tres valores para después obtener un valor promedio de este consumo de potencia por pasada. En la tabla 6.18 se muestra el consumo promedio que se produce por el mecanizado de probetas de tensión con la aplicación de un fluido de corte durante el mecanizado de éstas.

Tabla 6.18
Potencia consumida en un proceso con refrigerante

	Consumo de potencia (kW)	Consumo de potencia (kW)	Consumo de potencia (kW)	Consumo promedio por pasada
1. Desbaste	0.6	0.65	0.6	0.62
2. Primer ciclo de geometría	2.1	2.2	2	2.10
2.1. Tres pasadas de desbaste	1.2	1.25	1.2	1.22
2.2. Acabado	0.65	0.65	0.65	0.65
3. Ranurado	0.9	1.3	0.9	1.03
4.1 Segundo ciclo de geometría	2.1	2	2	2.03
4.1. Tres pasadas de desbaste	1.3	1.15	1.15	1.20
4.2. Acabado	0.7	0.75	0.85	0.77
5. Acabado de perfil de geometría	0.5	0.55	0.55	0.53
6. Roscado derecho	0.6	0.55	0.55	0.57
7. Roscado izquierdo	0.5	0.45	0.45	0.47
8. Tronzado	1.2	1.3	1.3	1.25
9. Barreno de centros	0.65	0.65	0.7	0.67
			Total	13.10

Fuente: Tabla del autor

Se puede observar en las tablas anteriores que el consumo de potencia por pasada en un proceso de mecanizado en seco es muy similar a la potencia consumida en un proceso con la aplicación de refrigerante. Existe un menor consumo de potencia cuando se aplica refrigerante pero esta variación es del 8%. Por tanto el consumo de potencia no se ve

afectado por la eliminación del refrigerante de corte ya que se podría esperar que el consumo de potencia en el mecanizado en seco fuera el doble del consumo en un proceso de mecanizado con refrigerante.