

Estimación cuantitativa del efecto de los parámetros de proceso y sus interacciones con respecto a la rugosidad de superficie y la relación de remoción de material en un proceso de lijado mecánico'

Andrés L. Carrano²

James B. TaylorPh.D³.

RESUMEN

El maquinado con abrasivos revestidos es uno de los procesos secundarios más comunes utilizados en la industria de productos de madera. Especialmente en la fabricación de mobiliario con contornos pronunciados, se ha constituido en una de las operaciones que requiere más tiempo y que están basadas tanto en la experiencia como en la habilidad del operario. Esto trae como consecuencia que el proceso de lijado se haya convertido en una de las operaciones más costosas en este tipo de industria. En este contexto, la automatización de este proceso se ha visto limitada por la falta de conocimiento acerca del impacto de los parámetros claves y sus interacciones en esta operación. El objetivo de este estudio es proveer la información necesaria para entender las relaciones entre los parámetros claves con respecto a dos de las respuestas características más importantes: la relación de remoción de material y la rugosidad de la superficie resultante. En este experimento, un diseño factorial completamente aleatorizado fue implementado para evaluar el impacto de diferentes combinaciones de especies de madera, minerales abrasivos, presiones de contacto, y orientaciones relativas del maquinado con respecto a la orientación del grano de la madera. Todas las combinaciones de factores y niveles fueron replicadas a través de una secuencia de tres tamaños de granos abrasivo. Los resultados muestran que el efecto principal de la presión de contacto es estadísticamente significativo para cualquier tamaño de grano abrasivo. El mineral abrasivo silicon carbide demostró rendir una mejor superficie que el óxido de aluminio en todas las especies de madera consideradas y en el nivel más áspero de tamaño de grano abrasivo. También se obtuvo que ninguna de las interacciones de dos y tres factores fueron significativas para las dos respuestas consideradas, entre otros resultados más específicos.

INTRODUCCIÓN

La manufactura de muebles y otros productos basados en madera se compone de varias etapas antes de que el producto final sea obtenido. Tradicionalmente, estos procesos son la recolección de árboles y su posterior procesamiento en aserraderos, el desecamiento de la madera en hornos, los procesos de maquinado de partes, ensamblaje, acabado del producto, y finalmente empaque. En esta cadena de manufactura, los procesos de maquinado son aquellos que ocasionan la mayor transformación en la materia prima. En consecuencia, son considerados las operaciones de valor agregado más importantes de la cadena.

En este tipo de industrias, los procesos de maquinado abrasivo son aquellos utilizados para atenuar las marcas dejadas en la superficie de la madera como consecuencia de procesos anteriores. También es uno de los procesos que determina las dimensiones finales de la pieza. En este contexto, el lijado es uno de los procesos más comunes utilizados para la preparación de superficies de madera. Su implementación en la cadena de manufactura es previa a la fase de acabado y comúnmente sigue una secuencia de lijados con tamaño de grano descendente. El cambio gradual en el tamaño de grano del abrasivo tiene el efecto de reducir las marcas y rasgaduras en la superficie a niveles casi imperceptibles a la vista, obteniéndose de este modo una superficie lisa y uniforme que es ideal para una efectiva aplicación de barnices, pinturas y recubrimientos en general. Es por ello que el lijado es considerado un proceso que determina, en gran manera, la calidad del acabado y en consecuencia la percepción de la calidad final del producto. Actualmente el proceso de lijado es ejecutado manualmente o en una máquina guiada por un operador, dependiendo del contorno de la pieza.

En el entorno actual de manufactura moderna, la implementación extensiva de computadoras, control numérico, PLCs, robots, celdas flexibles, etc. ha permitido la automatización de la mayor parte de la cadena de manufactura. Sin embargo, el proceso de lijado abrasivo ha permanecido como una isla dentro de este entorno completamente automatizado, asemejando un proceso artesanal que inevitablemente se ha convertido en un proceso crítico en dicha secuencia.

En este estudio preliminar, se intenta sentar las bases para el desarrollo de un modelo que caracterice el proceso con respecto a los parámetros más importantes y sus interrelaciones. Las respuestas observadas son la relación de remoción de material como medida de la eficiencia del proceso y la rugosidad de la superficie resultante como indicador de la calidad final. Posteriormente, este modelo servirá de base para el desarrollo del sistema de control así como de las relaciones de transformación en un proceso de lijado automatizado.

MATERIALES Y METODOS

Los factores experimentales utilizados en este estudio fueron identificados como siguen: variedad o especie de madera, presión de contacto, mineral abrasivo, tamaño de grano abrasivo, y orientación relativa de lijado con respecto a la orientación de grano en la madera. Los niveles de dichos factores fueron seleccionados en base a los valores utilizados en la industria de manufactura de muebles', así como en investigaciones previas realizadas en el área de maquinado abrasivo (1, 2, 7 y 8). Siguiendo este criterio, los niveles fueron establecidos como se especifica en la siguiente tabla.

Tabla 1: Niveles de los factores experimentales

Variedades	Orientación	Abrasivo	Presión	Tamaño de Grano
Cerezo negro	Paralela al grano	Oxido de aluminio	0.50 Psi	P-100
Arce azúcar	Ortogonal al grano	Silicon Carbide	0.75 Psi.	P-150
Roble blanco				P-220
Pino blanco				

Un diseño factorial completamente aleatorizado de los factores y niveles mencionados fue utilizado para la experimentación. El efecto del factor tamaño de grano abrasivo fue estudiado bajo una secuencia de tres tamaños diferentes y descendentes, emulando así las operaciones industriales. En este procedimiento, cada una de las combinaciones de nivel entre variedades de madera, orientaciones, abrasivos y presiones ($4^1 \times 2^3 = 32$) fueron corridas secuencialmente a través de los tres tamaños de grano considerados y replicadas dos veces para un total de 192 experimentos. La relación de remoción de material y la rugosidad de superficie fueron las dos respuestas observadas en cada experimento.

Las especies de madera consideradas fueron tres angiospermas o maderas duras (cerezo, arce y roble) y una especie de gymnosperma o conífera (pino). En este experimento fueron utilizados tablones aserrados tangencialmente, con un grosor nominal de 4/4 de pulgada, y desecados al horno hasta un nivel de 8-10 por ciento de contenido de humedad. Los bordes de los tablones fueron aserrados para luego ser engomados y pegados en prensas neumáticas y así formar paneles más anchos. Posteriormente, estos paneles fueron rebajados en una cepilladora mecánica a un grosor homogéneo de 11/16 de pulgada. Especímenes experimentales de 9 pulgadas por 6.5 pulgadas fueron cortados de los paneles y acondicionados por cinco semanas en una cámara de ambiente controlado. Este período fue suficiente para que la madera alcanzara un 6 por ciento de contenido de humedad en equilibrio (EMC). La mitad de los especímenes fueron cortados tal que la orientación del grano de madera estuviese a lo largo del eje principal del espécimen

(orientación paralela), y la otra mitad tal que fuese perpendicular (orientación ortogonal).

La operación de lijado fue ejecutada en una lijadora mecánica recíprocante con un mecanismo de palanca para aplicar presión sobre la pieza. Las presiones de contacto entre los especímenes y la almohadilla de la máquina fueron alcanzadas por medio de diferentes combinaciones de contrapesos colgados de la palanca. Los

de presión fueron monitoreados usando celdas de carga con dinamómetros piezoeléctricos. Los experimentos fueron ejecutados con la almohadilla en condición estática, es decir, sin utilizar el mecanismo recíprocante (4). Las dimensiones de las correas abrasivas empleadas fueron 330 pulgadas de largo por 6 pulgadas de ancho. El revestimiento abrasivo fue de trama cerrada sobre respaldo de papel y con agente adhesivo con base de resina. Tanto el peso como la distribución de partículas abrasivas probaron ser similares en todas las correas.

Experimentos preliminares permitieron estimar el comportamiento de las correas y los especímenes bajo condiciones experimentales. Esto hizo posible la determinación de las curvas de desgaste de las correas, la zona en dichas curvas con la menor pendiente (región óptima sobre la cual ejecutar los experimentos), así como el tiempo mínimo de maquinado necesario para remover de la superficie las marcas del proceso anterior (hasta alcanzar un perfil de superficie constante).

Las revoluciones de la máquina se mantuvieron constante en 800 rpm lo cual representa una velocidad superficial de 3300 pies por minuto. El tiempo de lijado para cada experimento se estableció en 15 segundos. De igual manera, el resto de las variables controlables tales como la tensión, alineación de la correa, y la orientación de la pieza, fueron monitoreadas y mantenidas constantes a través de toda la experimentación.

Las dos respuestas experimentales fueron medidas después de cada experimento y para cada tamaño de grano. La relación de remoción de material (en pulgadas cúbicas de madera por minuto) fue determinada por la diferencia de peso en la pieza antes y después del maquinado y la respectiva conversión de densidades asociada a la especie. Por otro lado, la rugosidad de superficie fue medida con un profilómetro de contacto con pun-

ta de diamante cónica a 90° y con un radio de 200 .tpulg. Como se muestra en la Figura 1, el indicador utilizado fue la raíz media cuadrática (rms) de las desviaciones instantáneas (Z) del perfil superficial tomadas desde la línea promedio en la sección evaluada (L).

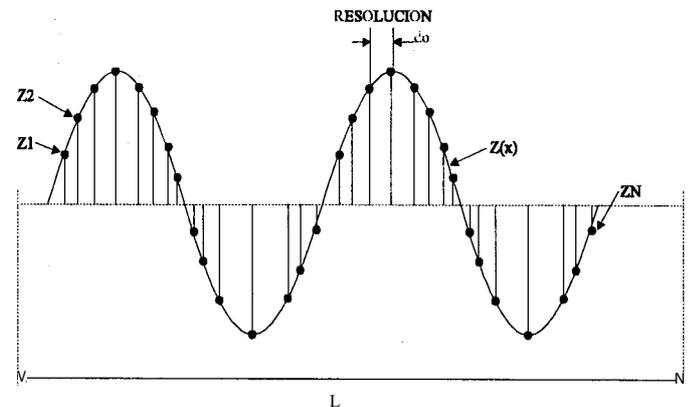


Figura 1: Cálculo de R_q

Este indicador es denotado en normas como R_q y su aproximación digital es:

$$R_q = \sqrt{(Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + \dots + Z_N^2) / N}$$

Un total de seis mediciones de R , en áreas seleccionadas aleatoriamente, fueron tomadas en cada una de las superficies lijadas y promediadas posteriormente en un solo valor característico de esa superficie. La medición de rugosidades fue ejecutada perpendicularmente a las marcas de maquinado tal como se establece en las normas ASME (9).

Un diseño factorial completamente aleatorizado fue seleccionado para evitar confusión experimental en los efectos de los factores. El análisis de las fuentes de dispersión en efectos principales e interacciones fue acometido usando análisis de varianza. En la Figura 2 se representa la matriz experimental implementada en este estudio.

ESPECIES		ORIENTACION	ABRASIVO	PRESION	GRANO	EXP #
CEREZO	PARALELA	OXIDO ALUMINIO	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	1	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	2	
		SILICON CARBIDE	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	3	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	4	
	ORTOGONAL	OXIDO ALUMINIO	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	5	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	6	
		SILICON CARBIDE	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	7	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	8	
ARCE	PARALELA	OXIDO ALUMINIO	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	9	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	10	
		SILICON CARBIDE	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	11	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	12	
	ORTOGONAL	OXIDO ALUMINIO	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	13	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	14	
		SILICON CARBIDE	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	15	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	16	
ROBLE	PARALELA	OXIDO ALUMINIO	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	17	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	18	
		SILICON CARBIDE	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	19	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	20	
	ORTOGONAL	OXIDO ALUMINIO	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	21	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	22	
		SILICON CARBIDE	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	23	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	24	
PINO	PARALELA	OXIDO ALUMINIO	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	25	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	26	
		SILICON CARBIDE	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	27	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	28	
	ORTOGONAL	OXIDO ALUMINIO	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	29	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	30	
		SILICON CARBIDE	PRESION 1	P-100 -- P-150 -- P-220	31	
			PRESION 2	P-100 -- P-150 -- P-220	32	

Figura 2: Arbol de combinaciones experimentales

Por simplicidad en el manejo de datos, los factores fueron codificados como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2: Codificación de niveles experimentales

Variedad	Código	Orientación	Código	Abrasivo	Código	Presión	Código
Cerezo negro	1	Paralela	+	Oxido de aluminio	+	0.75 Psi	
Arce azúcar	2	Ortogonal		Silicon Carbide		0.50 Psi	
Roble blanco	3						
Pino blanco	4						

También se denotaron los factores orientación, mineral abrasivo, y presión como A,B y C respectivamente para una fácil representación de las interacciones de dos factores (AB, AC y BC), y de tres factores (ABC).

RESULTADOS Y DISCUSION

Entre todas las combinaciones experimentales, el máximo promedio de remoción de material se obtuvo lijando pino, con una orientación perpendicular al grano de la madera, aplicando 0.75 psi de presión, y utilizando una correa abrasiva de óxido de aluminio P-100. El valor de este máximo fue de 28.08 pulga/min (Tabla 3). Por otra parte, el mínimo valor promedio se obtuvo lijando arce, paralelamente al grano, aplicando 0.50 psi. y con una correa abrasiva de silicon carbide P-220. El valor de este mínimo fue de 1.10 pulga/min. Las posiciones de los factores de dos niveles (orientación, abrasivo y presión) para el mínimo tomaron valores exactamente opuestos a aquellas relacionadas con el máximo.

Cierta explicación a esto es encontrada en la dureza' de las variedades utilizadas: el máximo en este caso ocurre cuando se lija el material con la menor dureza, con el mayor valor de presión y usando el tamaño de grano abrasivo más grueso (P-100); mientras que el mínimo ocurre cuando se lija el material con la mayor dureza, el menor nivel de presión y usando el tamaño de grano abrasivo mas fino (P-220). La hipótesis estableciendo

que el óxido de aluminio remueve mayor cantidad de material que el silicon carbide fue rechazada durante el tratamiento estadístico de los datos.

En cuanto a la rugosidad de superficie, observaciones similares fueron obtenidas y resumidas en la Tabla 4. El máximo R_q promedio (superficie mas rugosa o de menor calidad) fue de 313 micropulgadas y se obtuvo en los siguientes niveles: pino, orientación paralela al grano, 0.75 psi., óxido de aluminio, y tamaño de grano P-100. El mínimo valor promedio de 60 micropulgadas fue obtenido en: roble, orientación perpendicular, 0.50 psi., silicon carbide, y tamaño de grano P-220. El efecto individual de la orientación de maquinado con respecto a la rugosidad de superficie no es un problema nuevo y ha sido investigado previamente. Sin embargo, diversos estudios han proporcionado diferentes resultados: Stewart et al.(7) concluye en su estudio que, para el arce azúcar, no existe diferencia en la profundidad de las marcas de maquinado abrasivo entre las orientaciones paralela y ortogonal al grano de la madera. Por otra parte, Kato y Fukui at al (3) encontraron que el lijado ortogonal a la orientación de grano proporcionaba una mejor superficie que el lijado paralelo. En nuestro estudio, la orientación mostró ser un factor estadísticamente no significativo para el lijado con abrasivos gruesos o de baja denominación (P-100). Sin embargo, mostró ser significativo para la mayoría de las variedades cuando se usaron los tamaños de granos finos. En este último nivel (P-220), el lijado paralelo produjo una mejor superficie que el lijado ortogonal.

Tabla 3: Relación de remoción de material
 $\langle \text{Pu}1\text{g}^3 \text{ min} \rangle$

No.	Factor				Tamaño de Grano								
					P-100			P-150			P-220		
	Variedad	A	B	C	y1	y2	Ave.	y1	y2	Ave.	y1	y2	Ave.
1	1	+	+	-	3.55	3.55	3.55	3.15	3.15	3.15	1.97	2.76	2.37
2	1	+	+	+	5.52	5.52	5.52	5.12	5.12	5.12	3.94	3.94	3.94
3	1	+	-	-	2.36	1.97	2.17	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97	1.97
4	1	+	-	+	3.55	4.33	3.94	3.94	3.55	3.75	2.76	2.76	2.76
5	1	-	+	-	5.91	5.91	5.91	5.42	5.91	5.52	2.76	2.46	2.76
6	1		+	+	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67	8.67	5.91	5.52	5.72
7	1	-	-	-	3.55	4.33	3.94	3.15	3.55	3.35	2.76	2.76	2.76
8	1	-	-	+	7.09	7.49	7.29	6.31	6.70	6.51	4.33	3.55	3.94
9	2	+	+	-	1.88	2.20	2.04	1.57	1.88	1.73	1.25	1.25	1.25
10	2	+	+	+	5.33	5.65	5.49	3.76	3.14	3.45	2.20	2.20	2.20
11	2	+	-	-	1.57	1.57	1.57	1.57	1.25	1.41	0.94	1.25	1.10
12	2	+	-	+	2.82	2.51	2.67	2.20	2.51	2.36	1.57	1.88	1.73
13	2	-	+	-	2.82	2.82	2.82	2.82	2.51	2.67	2.20	1.88	2.04
14	2	-	+	+	7.22	7.53	7.38	5.02	5.33	5.18	2.82	3.14	2.98
15	2	-		-	2.20	2.20	2.20	1.88	2.20	2.04	1.25	1.25	1.25
16	2	-		+	4.71	4.39	4.55	3.45	3.14	3.30	2.82	2.82	2.82
17	3	+	+	-	2.02	2.60	2.31	2.31	2.02	2.17	1.44	1.44	1.44
18	3	+	+	+	3.47	3.18	3.33	3.18	3.18	3.18	2.31	2.31	2.31
19	3	+	-	-	1.44	1.44	1.44	1.44	1.16	1.30	1.26	1.26	1.26
20	3	+	-	+	2.89	2.89	2.89	2.31	2.31	2.31	2.60	2.02	2.31
21	3		+	-	2.60	2.60	2.60	2.31	2.89	2.66	1.44	1.73	1.59
22	3	-	+	+	4.33	5.20	4.77	4.04	4.33	4.39	2.60	2.60	2.60
23	3			-	2.31	2.31	2.31	1.44	1.73	1.59	0.73	1.44	1.59
24	3			+	4.04	4.84	4.04	3.18	3.98	3.18	2.89	2.80	2.75
25	4	+	+	-	9.01	7.42	8.22	5.30	4.77	5.04	4.24	3.71	3.98
26	4	+	+	+	13.77	13.25	13.51	8.48	7.95	8.22	6.36	6.89	6.63
27	4	+	-	-	4.24	4.24	4.24	3.18	3.71	3.45	2.65	3.18	2.92
28	4	+	-	+	7.95	7.95	7.95	6.36	6.36	6.36	4.77	5.30	5.04
29	4	-	+	-	17.48	17.48	17.48	9.01	8.48	8.75	5.30	5.30	5.30
30	4		+	+	12.59	30.20	28.08	13.25	12.2	12.99	9.01	9.01	6.90
31	4	-	-	-	10.07	10.07	10.07	7.42	6.89	7.16	4.24	4.77	4.51
32	4	-	-	+	15.89	15.89	15.89	11.13	11.66	11.40	7.95	9.01	8.48

Tabla 4: Rugosidad de superficie (R_9 en μin)

No.	Factor				Tamaño de Grano								
	Variedad	A	B	C	P-100			P-150			P-220		
					y1	y2	Ave.	y1	y2	Ave.	y1	y2	Ave.
1	1	+	+	-	253	265	259	198	188	193	154	136	145
2	1	+	+	+	292	293	293	182	170	176	146	126	136
3	1	+		-	199	202	201	156	142	149	145	131	138
4	1	+		+	201	224	213	167	163	165	137	144	141
	1	-	+	-	294	302	298	219	220:-	2:20	172	181	177
	1	-	+	+	257	252	255	204	229	217	159	206'	183
					249	208	229	1.71	160	166'	137	144	141
8	1			+	217	228	223	167	204	186	144	15T°	149
9	2	+	+	-	233	218	226	132	125	129	115	112	114
10	2	+	+	+	267	261	264	138	136	137	114	114	114
11	2	+		-	169	164	167	128	127	128	111	100	106
12	2	+		+	175	169	172	118	122	120	98	108	103
13	2	-	+		236	234	235	153	177'	165	143,	133	118
14	2				247	262	255	186	167	177	136	137	13T
15	2	-		-	187	184	180	162	185	174	129	161	145
16	2	-		+	192	201-Y	197	132	143	136	124	136	110
17	3	+	+		230	233	232	108	108	108	82	73	78
18	3	+	+	+	211	231	221	106	112	109	87	80	84
19	3	+			196	146	171	94	102	98	68	81	75
20	3	+			183	158	171	92	103	98	66	74	70
21	3	-	+	-	253	193	223	104	105'	10.5	70	76	73
22	3	-	+	+	200	228	214	101	113	107	80	80	80
23	3	-	-	-	152	145	149	110-	91	101	65	: 64	65
24		-	-	+	157	162	160	95	100	98	78	62	70
25	4				291	284	288	170	159	165	134	129	132
26	4				316	3101	313	160	158	159	133	128	131
27	4				233	233	233	148	157	153	132	125	129
28	4				222	234	228	160	163	162	122	135	129
29	4	-	+	-	272	274	273	181	188	185	167	163	165
30	4	-	+	+	277	270	274	163	182	173	1<60	166	163
31	4	-	-	-	222	221	222	186	187, -	187	171'	161	166
32		-	-	+	210	223	217	168	183	176	167	176	172

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los análisis de varianza para cada factor con respecto a la relación de remoción de material. La Tabla 6 muestra los resultados con respecto a la rugosidad de superficie. En cada caso, se empleó la hipótesis nula para verificar la igualdad de medias entre los niveles altos y bajos de los efectos principales, y la igualdad de las pendientes entre los niveles altos y bajos de las interacciones.

El nivel de significación fue inicialmente establecido como $\alpha = 0.1$ (6), y aquellos efectos principales e interacciones que fueron encontrados estadísticamente relevantes a este nivel se han representado con doble asterisco (**). Un análisis de sensibilidad realizado alrededor del valor de α completa la tabla con ciertos efectos localizados en la vecindad del valor de rechazo. Estos efectos considerados relevantes a raíz del análisis de sensibilidad han sido denotados con un solo asterisco

De las tablas mostradas previamente, se observa que las interacciones de dos y tres factores entre presión, abrasivo y orientación (sin importar el tamaño de grano o la variedad) son no significativas al nivel estudiado. Se pudo comprobar que los valores- p^9 de las interacciones no estaban remotamente cerca de los niveles seleccionados. En consecuencia, la discusión que sigue se centra alrededor de los efectos principales de los factores.

Relación de remoción de material: el efecto principal del factor presión (C) mostró ser significativo para la mayoría de las variedades de madera y en todos los tamaños de grano. Como se esperaba, la cantidad de material removida en el nivel superior de presión fue mayor que en el nivel inferior de presión. Solamente la variedad de pino lijada con tamaño P-100 no presentó una diferencia significativa entre los dos niveles de presión mencionados. En esta conífera específicamente, el efecto de la

Tabla 5: Significado estadístico de los factores con respecto a la relación de remoción de material (abase 0.1)

	P-100							P-150							P-220						
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Cerezo	**		*					**		**							**				
Arce			**							**					*		**				
Roble																					
Pinos	**	*						**		*					*		**				

Tabla 6: Significado estadístico de los factores con respecto a la rugosidad de superficie (abase= 0.1)

	P-100							P-150							P-220						
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Cerezo	**							*	**						**	*					
Arce	**							**							**						
Roble			**							**						**					
Pino			**					**						**							

presión se hizo más marcado cuando se maquinó con tamaños de grano mas finos. Con respecto a la orientación de lijado (A), su efecto principal fue significativo para las variedades de cerezo y pino (excepto cerezo a P-220). La cantidad de material removida cuando el lijado se ejecutó perpendicularmente fue mayor en todo momento que aquella obtenida cuando se lijó paralelamente al grano (47% más en P-100, 38% en P-150, y 28% más en P-220). Esto puede ser explicado a través de las propiedades físicas del cerezo y del pino, las cuales son las variedades con la menor dureza y densidad promedio consideradas en este trabajo. Esto significa que son maderas menos compactas que el roble y el arce, en consecuencia, las diferencias entre volúmenes removidos por orientación en estas especies son aún mayores que en maderas con altas densidades. El efecto principal del mineral abrasivo (B) no mostró una fuerte evidencia de relevancia o tendencia de algún tipo. Consecuentemente, no fue considerado un factor importante para la relación de remoción de material al nivel estudiado.

Rugosidad de superficie: el efecto principal del factor presión (C) demostró ser irrelevante para cualquier combinación de madera y tamaño de grano cuando la respuesta observada fue la rugosidad superficial. El efecto de la orientación de lijado (A) fue irrelevante en el tamaño de grano abrasivo grueso (P-100) y demostró cobrar importancia hacia los tamaños de grano finos. Sin em-

bargo, este fenómeno no se cumple para el roble utilizado lo cual probablemente se debe a la estructura de poros abiertos que es típica de estas especies. Esta característica tiende a presentar irregularidades en ciertas regiones de la superficie más grandes que el mismo grano abrasivo y que tienden a disipar la orientación de grano en la madera. El efecto principal del mineral abrasivo presentó un comportamiento opuesto. En el nivel P-100 fue significativo para todas las especies mientras que en tamaños de grano más finos perdió importancia. En todo momento, el abrasivo silicon carbide produjo una mejor superficie que el óxido de aluminio. Los valores de rugosidad promedio (rms) para el silicon carbide fueron 31.35% mejor en P-100, 9.83% mejor en P-150, y 6.27% mejor en P-220, comparado con el óxido de aluminio.

Otro resultado importante y de gran utilidad práctica es la caracterización del proceso con respecto a el tamaño de grano abrasivo utilizado en las correas (Tabla 7 y Tabla 8). También se presenta el porcentaje de diferencia esperado en las respuestas cuando el proceso se desplaza hacia tamaños de grano mas finos.

Como se puede observar en la Tabla 7, la cantidad de material removida en las gymnospermas (coníferas o maderas blandas) fue en todo momento mayor que la cantidad removida en las angiospermas (maderas duras). También se observa que esta diferencia se hace menor

Tabla 7: Relación de remoción de material promedio con respecto al tamaño de grano abrasivo ($\mu\text{ulg}^3/\text{min}$)

	Tamaño de grano				
	P-100	Diferencia (%)	P-150	Diferencia (%)	P-220
Angiospermas	3.89	14%	3.36	29%	2.39
Gymnospermas	13.18	40 °A)	7.92	28 %	5.73
Total	6.21	28 °A°	4.50	28 °A)	3.22

Tabla 8: Rugosidad de superficie promedio con respecto al tamaño de grano (R_q en μulg)

	Tamaño de grano				
	P-100	Diferencia (%)	P-150	Diferencia (%)	P-220
Angiospermas	217	34 %	144	19 %	116
Gymnospermas	256	34 %	170	13 %	148
Total	227	34%	151	18 %	124

cuando el proceso de lijado se desplaza hacia tamaños de grano mas finos. El cambio de P-150 a P-220 produjo aproximadamente el mismo porcentaje de cambio en ambas clasificaciones de maderas.

En la Tabla 8 se observa que las mejores superficies fueron obtenidas en el grupo de las angiospermas. El porcentaje de mejoramiento de las superficies (reducción del indicador R_q) cuando se procede de un proceso con tamaño de grano abrasivo P-100 a uno con tamaño P-150 fue exactamente el mismo para ambos grupos. Por el contrario cuando el proceso se traslada a los tamaños de grano mas finos, el porcentaje de cambio en cuanto a rugosidad en angiospermas es mayor que en gymnospermas. Este fenómeno hace que las diferencias en rugosidad superficial promedio de estos dos grupos se hagan mas notorias.

CONCLUSIONES

Los efectos de las interacciones de dos factores y tres factores entre presión de contacto, mineral abrasivo y orientación relativa del lijado fueron encontrados estadísticamente no significativos al nivel estudiado. Consecuentemente, se recomienda limitar la búsqueda de áreas de respuesta robusta a los efectos principales de los parámetros del proceso. Con respecto a la relación de remoción de material y para cualquier tamaño de grano abrasivo, la presión de contacto es el factor a controlar. Debido a que el factor mineral abrasivo mostró no ser significativo para las angiospermas (y no determinante para las gymnospermas), la selección del material abrasivo a utilizar debería basarse en otro criterio tal como la vida útil o el precio de la de la correa más que en la cantidad de material removido en el proceso. Con respecto a la rugosidad de superficie, silicon carbide produjo mejor superficie que el óxido de aluminio, especialmente en los niveles más ásperos.

Para cualquier tamaño de grano abrasivo se cumple que tanto la cantidad de material removida así como la rugosidad de superficie es mayor en las gymnospermas que en las angiospermas. La diferencia entre las cantidades de material removidas en angiospermas y gymnospermas tiende a reducir a medida que la secuencia abrasiva se traslada hacia el proceso con partículas abrasivas mas finas. Con respecto a esta respuesta, se puede concluir que a medida que se avanza hacia lijas mas finas, los proceso en ambos grupos tienden a parecerse. Por el contrario, esta brecha tiende a aumentar para los indicadores de rugosidad de superficie en ambos grupos. Se espera que, bajo condiciones similares

de maquinado, los valores de R_q en maderas pertenecientes al grupo de angiospermas sean considerablemente menores a aquellos valores de las gymnospermas.

Para fines prácticos, las representaciones de efectos principales de cada factor con respecto a cada una de las respuestas observadas pueden ser obtenidas de la data experimental. Esto puede ser de utilidad en la búsqueda de áreas robustas en el proceso o cuando se desee alcanzar algun target específico. Dos de los gráficos previamente mencionadas se presentan a continuación.

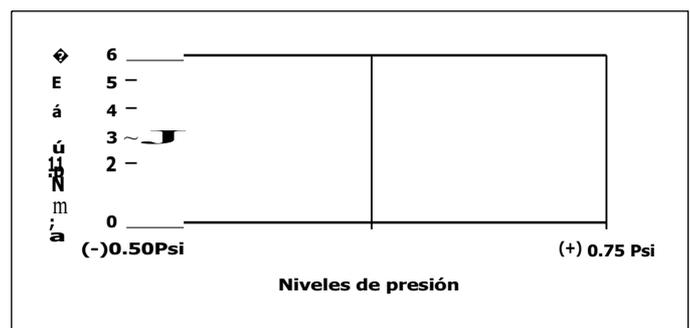


Figura 3: Efecto principal del factor presión (C) al nivel P-150 con respecto a la relación de remoción de material

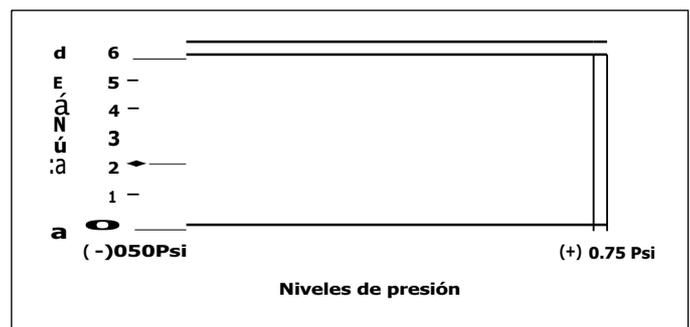


Figura 4: Efecto principal del factor presión (C) al nivel P-220 con respecto a la relación de remoción de material

INVESTIGACIONES POSTERIORES

Estudios posteriores incluirán el desarrollo de modelos matemáticos generales, tales como ecuaciones predictivas o superficies de respuesta, del proceso de lijado en maderas. También se concentrarán esfuerzos hacia la aplicación de estos resultados en aplicaciones

prácticas, tales como la búsqueda de áreas en las cuales las respuestas sean robustas y la implementación de sistemas cerrados de control en procesos de lijado con robots.

Actualmente se están desarrollando estudios enfocados a la evaluación de la superficie de madera después de un proceso de maquinado abrasivo y con diferentes tipos de instrumentos: de contacto (profilómetros) y sin contacto (rayos láser y emisiones acústicas). Esto tendrá como objetivo de desarrollar un sistema de evaluación on-line de la calidad de superficie.

NOTAS

- 1 Los autores reconocen el apoyo recibido del Furniture Manufacturing and Management Center (FMMC) y del Wood Machining and Tooling Research Program (WMTRP) en North Carolina State University.
- 2 Profesor de Ingeniería Industrial, Universidad Católica Andrés Bello
- 3 Profesor de Ingeniería Industrial, North Carolina State University, USA
- 4 Cámara de fabricantes de muebles del estado de Carolina del Norte, USA.
- 5 Específicamente black cherry (*prunus serotina* ehrh), hard maple (*sugar saccharum*), white oak (*quercus alba*), y eastern white pine (*pinus strobus*).
- 6 Sistema de clasificación de papeles abrasivos P-Europeo.
- 7 Estilógrafo de aguja.
- 8 Dureza promedio (en libras de resistencia a la indentación): cerezo 850 lb, Arce 1450 lb, roble 1360 lb, pino 380 lb.

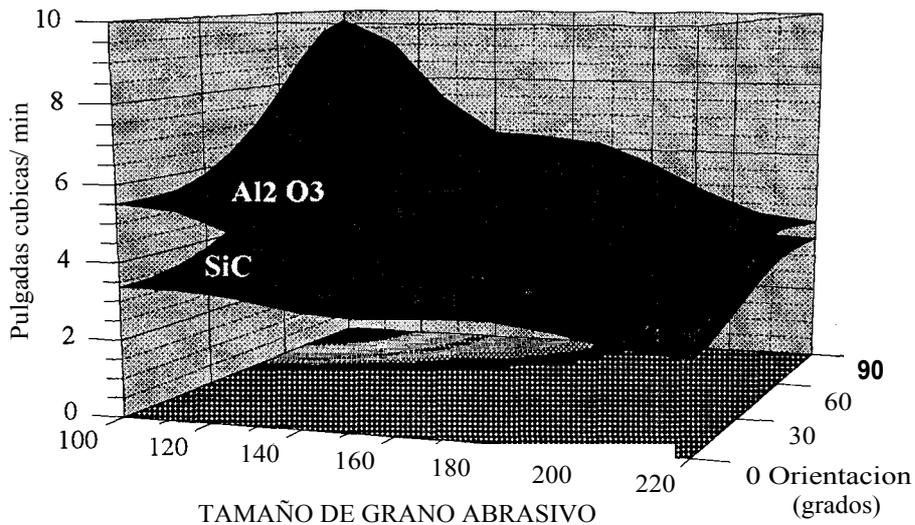
9 Nivel exacto de significación del test de hipótesis o probabilidad de cometer error del Tipo I.

REFERENCIAS

- 1 **Franz, N. C. and Patronsky, L. A.** 1954. *Machining Wood with Coated Abrasives*. University of Michigan Project Report #1, Project Number 2082. USA.
- 2 **Hinken, E. W.** 1954. *Machining Wood with Coated Abrasives*. University of Michigan Project Report#2. Project Number 2082. USA.
- 3 **Kato, C. y Fukui, H.** 1976. *The Cutting Force and the Stock Removal Rate of Coated Abrasives in sanding wood under constant sanding pressure*. Journal of Japanese Wood Resources Society. (22). Japón.
- 4 **Keuchel, K.** 1988. *Krafte and Kraftverteilung in der Kontaktzone beim Bandschleifen*. Ph.D. Dissertation. Institut fur Werkzeugemaschinen. Alemania.
- 5 **Lemaster, R. L. y Dornfeld, D. A.** 1993. *The use of acoustic emission to monitor an abrasive machining process*. 11th International Wood Machining Seminar. Noruega.
- 6 **Schmidt, S. R. y Launsby, R. G.** 1994. *Understanding Industrial Designed Experiments*. Fourth Edition. Air Academy Press. Colorado. USA
- 7 **Stewart, H. A.** 1976. *Abrasive Planing Across the Grain With Higher Grit Numbers Can Reduce Finish Sanding*. Forest Products Journal 26(4):49-51. USA
- 8 **Stewart, H. A.** 1978. *Stock Removal Rate for Aluminum Oxide and Garnet Coated Abrasive Belts*. Forest Products Journal. Vol. 28(7):29-31. USA
- 9 The Mechanical Society of Mechanical Engineers. 1995. *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)*. National Standard. ASME B46.1-1995. NewYork, NY. USA

APENDICE

EFFECTO DE LA ORIENTACIÓN DE GRANO EN LA MADERA



OXIDO DE ALUMINIO VS. SILICON CARBIDE

