

1800
058

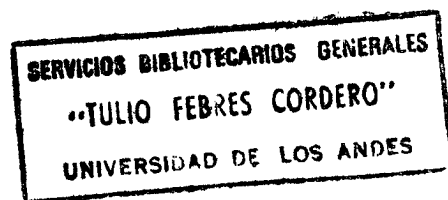
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
CENTRO DE ESTUDIOS FORESTALES DE POSTGRADO

ESTUDIO DEL EFECTO DE ALGUNAS VARIABLES SOBRE EL
COEFICIENTE DE FRICCIÓN MADERA-ACERO

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Por:

Silverio Viscarra Altamirano



Tesis presentada como requisito parcial para optar el grado de
Magister Scientiae (M.Sc.)

Mérida, Abril de 1980

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

A G R A D E C I M I E N T O

Al Centro de Desarrollo Forestal, La Paz, Bolivia; a la Fundación "Gran Mariscal de Ayacucho" (Convenio Andrés Bello), Caracas, y al Laboratorio Nacional de Productos Forestales, Mérida, Venezuela, por la oportunidad que me brindaron para profundizar mis conocimientos profesionales.

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico; al Consejo de Estudios de Postgrado de la Universidad de Los Andes, por el aporte financiero destinado a esta investigación.

Al Dr Luc Ninin, Profesor Guía del presente trabajo.

A los Profesores: Dr Noel Ogaya e Ing^ºs Julio C. Centeno, Jorge Mejía, Nicolás Bellorín, Gustavo Maldonado y Alirio Pérez, por sus aportes y sugerencias.

Al Dr Pedro Salinas por la colaboración recibida.

Al Personal del Laboratorio de Tecnología Mecánica (Escuela de Ingeniería Mecánica), especialmente a los Señores: Humberto Torres, Rafael Rojas y Rigoberto Angulo por su valiosa cooperación.

A la Señorita Doromilda Paredes y la Sra. Gladys de Rondón - por la oportuna labor de mecanografiado.

A mi esposa Aida Ruth, por su continuo estímulo y apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

		<u>Página</u>
	RESUMEN	
1.	INTRODUCCION	1
1.1	NATURALEZA DEL PROBLEMA	1
1.2	OBJETIVOS	5
2.	REVI SION BIBLI OGRAFICA	6
2.1	ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE LA FRICCI ON.	6
2.2	FRICCI ON MADERA-METAL POR DESLIZA- MIENTO Y POR RODADURA.	10
2.3	FRICCI ON EN EL CORTE DE MADERA	14
2.4	MEDICIONES PARA EVALUAR EL ACABADO SUPERFICIAL DE LOS MATERIALES.	18
2.5	ALCANCE PRACTICO DEL ESTUDIO DE LA FRICCI ON EN LA MADERA.	22
2.5.1	Coji netes de madera	22
2.5.2	Zapatas de madera en frenos de automoto- res.	23
2.5.3	Lanzaderas de madera	25
2.5.4	Comportamiento friccional de los conecto- res de madera y mejora en el sistema de sujeción de mordazas en ensayos de ten - sión de la madera.	25
2.5.5	Optimi zación del corte de la madera	26

2.6	ALCANCE DEL PRESENTE ESTUDIO	27
3.	MATERIALES Y METODOS	29
3.1	MATERIAL DE ESTUDIO	29
3.1.1	Selección de especies	29
3.1.2	Características generales y anatómicas	31
3.1.3	Propiedades Mecánicas	35
3.2	METODOLOGIA	35
3.2.1	Diseño experimental	35
3.2.2	Metodología general	43
3.2.3	Ensayos adicionales	51
3.2.3.1	- Extracción con solventes orgánicos	51
3.2.3.2	- Efecto de la dirección de las fibras de la madera.	52
3.2.3.3	- Deslizamiento perpendicular a las estrías del acero.	53
3.2.3.4	- Ensayos de fricción a elevada velocidad	53
3.3	PROCESAMIENTO DE DATOS	57
4.	RESULTADOS Y DISCUSION	60
4.1	RUGOSIDAD DEL ACERO	60
4.2	RUGOSIDAD DE LA MADERA	62
4.3	ENSAYOS PRINCIPALES	64
4.3.1	Resultados numéricos	64
4.3.2	Análisis estadístico	76
4.3.3	Interpretación de los resultados	86

4.4	ENSAYOS ADICIONALES	
4.4.1	Efecto de los extractivos de la madera	122
4.4.2	Efecto de la dirección de las fibras de la madera.	129
4.4.3	Efecto del desliz perpendicular a las estrias del acero.	131
4.4.4	Fricción a elevadas velocidades	135
4.5	IMPLICACIONES PRACTICAS DE LOS RESULTADOS.	141
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	144
5.1	CONCLUSIONES	144
5.2	RECOMENDACIONES	145
6.	BIBLIOGRAFIA	148

- ANEXO: 1. Resumen de los Programas empleados en el Procesamiento de Datos.
2. Comparación de valores de μ con los mencionados por la bibliografía.
 3. Relación μ = velocidad de deslizamiento.
 4. Valores de μ obtenidos en Aceite Cabimo.
 5. Deslizamiento paralelo y perpendicular al grano de la madera.
 6. Deslizamiento paralelo y perpendicular a las estrias del acero.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

INDICE DE TABLAS

<u>Tabla N°</u>	<u>Contenido</u>	<u>Página</u>
1	Porcentaje de extractivos de Aceite Cabi mo (<u>Copaifera pubiflora</u> Benth).	30
2	Resistencia mecánica de las especies en estudio.	35
3	Esquema de análisis de varianza para el modelo estadístico adoptado.	38
4	Resumen de los ensayos y las variables consideradas en el presente estudio.	58
5	Valores de rugosidad superficial del a- cero en estudio.	60
6	Valores de rugosidad superficial de la madera.	63
7	Valores del coeficiente de fricción de- terminados en las seis especies para 2 pe- sos y dos velocidades diferentes aplica- das en las caras radiales y tangencia- les.	
	a. Sun Sun	65
	b. Saqui-saqui	66
	c. Apamate	67
	d. Carne Asada	68
	e. Cumpán Resado	69
	f. Perhúetamo	70

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

<u>Tabla N°</u>	<u>Contenido</u>	<u>Página</u>
8	Resultados del intervalo porcentual de confianza del promedio total, $\pm P$ para los diferentes tratamientos.	75
9	Resultados del análisis de varianza para los valores de μ de las seis especies.	
	a. Sun Sun (<u>Didymopanax morototoni</u> (Aubl.) Dcne & Pl.)	79
	b. Saqui-saqui (<u>Bombacopsis quinata</u> (Jacq.) Dugand).	79
	c. Apamate (<u>Tabebuia rosea</u> (Bertol.) DC.)	80
	d. Carne Asada (<u>Hieronyma laxiflora</u> (Tul.) Muell. Arg.)	80
	e. Chupón Rosado (<u>Pouteria anibifolia</u> (A.C. Smith) Baeni.).	81
	f. Periwétamo (<u>Mouriri barinensis</u> (Morley) Morley).	81
10	Resultados de los ensayos realizados en Carne Asada empleando 1 probeta por cada tratamiento (metodología alterna).	83
11	Análisis de varianza para datos de μ correspondientes a Carne Asada (metodología alterna)	84
12	Resultados de ensayos comparativos de μ realizados en Saqui-saqui empleando dos metodologías diferentes.	85

<u>Tabla N°</u>	<u>Contenido</u>	<u>Página</u>
13	Análisis de regresión y correlación polinómica entre las variables: coeficiente de fricción (μ)-peso específico básico (Peb).	114
14	Análisis de correlación lineal simple entre las variables: coeficiente de fricción (μ)-contenido de humedad (CH).	115
15	Valores del coeficiente de fricción para muestras de Aceite Cabimo (<u>Copaifera pubiflora</u>) extraídas con solventes orgánicos.	123
16	Valores del coeficiente de fricción para muestras control (no extraídas) de Aceite Cabimo.	124
17	Análisis de varianza para datos del coeficiente de fricción correspondientes al Aceite Cabimo.	126
18	Valores del coeficiente de fricción según la dirección de deslizamiento paralela y perpendicular al grano de la madera.	130
19	Datos del coeficiente de fricción según la dirección de deslizamiento perpendicular a las estrias del acero (rugosidad 410 micropulgadas R_a)	132

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

<u>Tabla N°</u>	<u>Contenido</u>	<u>Página</u>
20	Resultados de los ensayos de fricción realizados en el torno (velocidad de deslizamiento = 4900 cm/min).	136

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

INDICE DE FIGURAS

<u>Figura N°</u>		<u>Página</u>
1	Sistemas R_a y R_{rms} para medir la rugosidad superficial de los materiales.	19
2	Relación gráfica entre la deformación causada por la mayor carga aplicada y espesor removido durante el lijado de las probetas.	42
3	Equipo de ensayo empleado para el estudio de la fricción por deslizamiento.	47
4	Rugosímetro para evaluar el acabado superficial de los materiales.	47
5	Análisis vectorial para determinación de la fuerza de fricción.	49
6	Esquema del método empleado para determinar las fuerzas: normal (F_n) y de fricción (F_f) en el torno.	55
7	Equipo empleado en el estudio de la fricción a velocidad elevada.	55
8	Valores promedio del coeficiente de fricción (μ) según las diferentes combinaciones de plano de roce, peso y velocidades ensayadas en las seis especies.	72

Figura N°

Página

9	Variación de la fuerza de fricción durante el deslizamiento.	
	a. Sun Sun	93
	b. Saqui-saqui	95
	c. Apamate	97
	d. Carne Asada	99
	e. Chupón Rosado	101
	f. Perhúetamo	103
10	Relación coeficiente de fricción (μ)-peso peso específico básico (Peb).	
	a. Caras: radial y tangencial; Velocidad: 50cm/min; peso: 500 g	110
	b. Caras: radial y tangencial; Velocidad: 50 cm/min; peso: 500 g	111
	c. Caras radial y tangencial; Velocidad: 5 cm/min; peso: 2000 g	112
	d. Caras: radial y tangencial; Velocidad: r0 cm/min; peso: 2000 g	113
11	Relación carga-deformación encontrada	
	a. En el puente de Wheatstone	137
	b. En el digital	137
12	Variación del coeficiente de fricción con la carga normal para los ensayos realizados en el torno.	

	<u>Pág.</u>
a. Saqui-saqui	139
b. Apamate	139
c. Carne Asada	140
d. Chupón Rosado	140
e. Perhuétamo	140

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



R E S U M E N

Con el propósito de estudiar el efecto de las variables: plano de roce de la madera, velocidad de deslizamiento y peso normal aplicado (2 niveles en cada variable), sobre el coeficiente de fricción dinámica (μ) madera-acero, se recurrió al empleo de madera procedente de 6 especies forestales venezolanas (rango de peso específico básico: 0,387 - 0,793).

Siguiendo el esquema de un experimento factorial, las probetas fueron deslizadas sobre una lámina de acero (410 micro pulgadas R_a) utilizando una máquina INSTRON.

Los valores promedio de μ variaron entre 0,226 y 0,134. Se obtuvo diferencias significativas de μ ocasionadas por la velocidad de deslizamiento, peso normal aplicado y peso específico básico de la madera.

Otros ensayos exploratorios detectaron diferencias debidas a los extractivos de la madera, dirección de las estrias del acero y evidencias de la acción del leño de algunas especies sobre la superficie del acero.

Los resultados están explicados en términos de adhesión, deformación y lubricación.

Résumé

Dans l'intention d'étudier les effets des variables: face du bois soumise au frottement, vitesse de glissement et force normale (à raison de deux niveaux pour chaque variable) sur le coefficient de friction dynamique (μ) bois-acier, on a employé 6 essences vénézuéliennes dont les densités basiques s'étalaient depuis 0,387 jusqu'à 0,793

Ayant établi un schéma d'expérience factorielle, on a fait glisser les éprouvettes sur une lame d'acier (410 micropouces R_a) au moyen d'une machine à essais INSTRON.

Les valeurs moyennes de μ ont varié entre 0,226 et 0,134. Des différences significatives de μ ont été produites par l'effet de la vitesse de glissement, la force normale et le poids spécifique basique du bois.

D'autres essais exploratoires ont permis de détecter des effets inhérents aux extraits du bois, à la direction des stries de l'acier, ainsi que de mettre en évidence l'action du bois de certaines essences sur les surfaces d'acier.

Les résultats de cette étude sont exposés en fonction de l'adhésion, la déformation et la lubrification.

SUMMARY

The purpose of this study was to determine the effect on the coefficient of friction of the wood-steel interface, of the following variables: wood surface, sliding speed and applied weight two different values of each variable were considered. The study was based on 6 venezuelan lumber species, with a specific gravity from 0,387 to 0,793.

Applying a factorial experimental design, the specimens were slid on a steel surface (410 microinch R_a) employing an INSTRON Universal Testing Machine.

Mean of μ values ranged from 0,226 to 0,134. Significantly different μ values were found due to sliding speed, applied weight and specific gravity of the wood.

Exploratory experiments detected differences due to wood extractives, and to the orientation of the steel grinding-marks. These studies indicated also possible effects of wood anatomy and wood deposits on the steel surface.

The results are discussed in terms of adhesion, deformation and lubrication.



1. INTRODUCCION

1.1 NATURALEZA DEL PROBLEMA

Se entiende por fricción o rozamiento, las fuerzas de resistencia que se presentan en el plano de contacto entre dos cuerpos (o sea perpendiculares a la presión de contacto), las cuales ofrecen resistencia a un posible movimiento o al ya existente en uno de los cuerpos (27). Siempre que la superficie de un cuerpo desliza sobre la de otro, cada cuerpo ejerce una fuerza de rozamiento sobre el otro cuerpo, siendo dichas fuerzas paralelas a la superficie de contacto; la fuerza de rozamiento sobre cada cuerpo está en sentido opuesto a su movimiento con relación al otro cuerpo (54).

Las fuerzas de fricción se originan a causa de que las superficies de los cuerpos no son completamente lisas, sino que presentan a nivel microscópico, elevaciones (picos) y depresiones (valles); en el contacto entre dos cuerpos se produciría un entrecruzamiento, encajando en cierto modo las irregularidades de un cuerpo con las del otro (11)(36); durante el deslizamiento relativo de uno de los cuerpos, se producen fenómenos de adhesión y corte entre otros, que son función de un elevado número de factores y de la interacción entre ellos (11).

De acuerdo con la clasificación de las propiedades fundamentales de la madera citada por Kollmann (27), el comportamiento friccional se considera como una

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

característica física de ese material; el roce involucra un fenómeno de pérdida de energía, principalmente en forma de calor desde la interfaz de contacto (11).

La importancia de las propiedades friccionales de la madera ha sido valorada en los últimos años a través de numerosos trabajos; la búsqueda de nuevas formas de uso de la madera, el deseo de ampliar los conocimientos actuales acerca del rozamiento en la madera, junto con el desarrollo de nuevas técnicas y equipos de estudio - han contribuido al impulso actual del estudio de la fricción entre la madera y otros materiales.

La razón principal para el desarrollo de investigaciones en el área de las propiedades friccionales de la madera, radica en que el roce se presenta en numerosos procesos de transformación y de uso de la madera (17) (25) (46). Entre los primeros se pueden citar el aserrado, el cepillado y el corte de chapas (26) (43) (58); en cuanto a los procesos de uso, la bibliografía menciona el empleo de zapatas de madera como frenos de automotores, el empleo de cojinetes de madera en algunos tipos de máquinas, el uso de conectores de madera en la industria de la construcción y el empleo de lanzaderas de madera en la industria textilera (13) (17) (20) (27) (46).

Posiblemente el énfasis actual que está recibiendo el estudio de la fricción madera-metal y madera-madera proporcione en un futuro cercano nuevas formas de uso de la madera y de algunos derivados de ella.

El estudio de la fricción entre la madera y el acero ha

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

sido desarrollado generalmente en especies de la zona templada utilizando para ello tres métodos de trabajo: en el corte de madera, deslizando un cuerpo metálico sobre la superficie de madera (o viceversa) y empleando una esfera para rodarla sobre la madera.

La mayoría de estos experimentos requieren de un equipo especial. Sin embargo, recientemente Lemoine, McMillin y Manwiller (31) han propuesto una forma simplificada - para el estudio de la fricción madera-acero por el método de deslizamiento. Esta forma simplificada fue considerada en el presente estudio de la fricción dinámica entre la madera y el acero, en razón de su sencillez y por la disponibilidad de los equipos necesarios para su realización.

El presente trabajo pretende contribuir al conocimiento del comportamiento friccional de especies procedentes - del bosque tropical, investigando algunas variables que podrían afectar el coeficiente de fricción dinámica madera-acero.

Se entiende por coeficiente de fricción dinámica (μ), el cociente entre la fuerza interfacial de fricción (F_f), que se opone al movimiento relativo de un cuerpo y la fuerza normal (F_n) que actúa sobre él.

El trabajo se desarrolló en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Productos Forestales (L.N.P.F.) y en el Laboratorio de Tecnología Mecánica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Los Andes, Mérida (Venezuela).

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

OBJETIVOS

- 1.1.1 Determinar el coeficiente de fricción dinámica entre la madera y el acero para seis especies venezolanas.
- 1.1.2 Estudiar el efecto de las variables: plano de roce de la madera (radial y tangencial), peso normal aplicado (500 g y 2000 g) y velocidad de deslizamiento - (5 y 50 cm/min) sobre el coeficiente de fricción dinámica.
- 1.1.3 Considerar brevemente el estudio del efecto de otras variables involucradas en el fenómeno del rozamiento como extractivos de la madera, orientación del grano de la madera, orientación de las estrias del acero y fricción a alta velocidad.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE LA FRICCION

La fricción inicialmente fue estudiada por Leonardo Da Vinci a fines del siglo XV (9) (47). Da Vinci dejó establecido los principios básicos que rigen el fenómeno y sus investigaciones fueron confirmadas y continuadas en Francia por Amontons a fines del siglo - XVII. Amontons (47) resumió sus observaciones en dos leyes básicas: a) la fuerza de fricción es proporcional a la carga y b) la fuerza de fricción es independiente del área nominal de contacto. Según este autor, la fricción metálica puede ser atribuida al entrecruzamiento mecánico de las irregularidades de las superficies en contacto, encajando en cierto modo unas irregularidades con otras; de manera que la fuerza de fricción dinámica se explicaría, según Amontons, como la fuerza requerida para vencer por levantamiento las asperezas del cuerpo de la parte superior, sobre las - del cuerpo de la parte inferior.

Posteriormente Coulomb (47) realizó una extensa serie de experimentos y fue el primero en diferenciar la fricción estática de la dinámica. Además postuló lo que se considera la tercera ley de la fricción: c) el coeficiente de fricción cinética se puede considerar independiente de la velocidad de deslizamiento.

Belidor (47) en el siglo XVIII fue uno de los primeros en manifestar que las superficies de los sólidos consisten de una multitud de picos hemisféricos y de pequeños valles. Este fue confirmado posteriormente con la ayu-

da de técnicas ópticas refinadas, concluyéndose que la superficie de interacciones entre dos materiales presionados por una fuerza normal, comprende regiones muy pequeñas en donde el contacto es a nivel de átomo-átomo. La suma de estas regiones constituye el área real de contacto (10) (36).

Rennie (47) por su parte, manifestó que una teoría general del roce debería considerar la flexión y falla (ó ruptura) de las asperezas superficiales.

Tomlinson en 1929 y Hardy en 1936 (47) atribuyeron el fenómeno de fricción a una disipación de energía cuando los átomos de un material son arrancados del campo atractivo de sus contrapartes en la zona interfacial.

De acuerdo con Moore (47), a comienzos de la década de 1960, se postuló que durante el roce entre dos superficies se produciría (en la interfaz) el agrupamiento de cargas de polaridad opuesta. Se asume que esas cargas mantendrían unidas las superficies por atracción electrostática. Este autor menciona que las teorías del entrecruzamiento mecánico y la teoría electrostática pueden ser desechadas ya que por un lado, un levantamiento de las asperezas de una superficie sobre los de la otra, como lo sugiere Amontons, no involucra un fenómeno de disipación de energía; ciertamente la fricción es un mecanismo de disipación. Del mismo modo la teoría electrostática implica una pérdida de cargas eléctricas en la interfaz, cuando el contacto entre los cuerpos es prolongado, lo cual originaría una disminución del coeficiente de fricción; en la práctica no se ha observado esa disminución.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Bowden y Tabor (8) (9) (10) (62) desarrollaron una teoría acerca de la fricción entre dos cuerpos la cual actualmente ofrece la explicación más aceptada del fenómeno del roce. Esta teoría considera que la fricción es debida a un proceso de soldadura o adherencia y cizalle entre unos pocos puntos de la interfaz nominal de contacto.

Cuando dos cuerpos (de madera o metálicos) están en contacto, el área real de contacto es sólo una fracción del área aparente o geométrica. Esto significa que la presión local en esas pequeñas zonas en contacto es bastante elevada, lo suficiente para que el material fluya plásticamente de modo que esas regiones puedan soportar el peso aplicado (8) (35).

Según Bowden y Tabor, en las zonas en contacto se produciría una apreciable adhesión físico-química resultando una soldadura fría de los dos materiales.

En el caso de la madera, Bowden (8) manifiesta que la resistencia friccional al deslizamiento de los metales sobre la madera, es una combinación simple de dos factores: deformación y adhesión. El componente de deformación está representado por el cizallamiento del material blando, en las zonas de contacto madera-acero. El término de adhesión, que según Marian y Stumbo (33) juega un rol más importante en la fricción, se produce por un lado a causa del anclaje mecánico de la madera en el acero (adhesión física) y también por puentes de hidrógeno entre los grupos oxhidrilo de la celulosa y la capa de óxido del metal (41); es posible además, la contribución de fuerzas de Van der Waals (adhesión química o específica)

De modo que el coeficiente de fricción (μ) estaría definido así:

$$\mu = \mu_{\text{deformación}} + \mu_{\text{adhesión}}$$

Bowden (8) menciona que en los polímeros o fibras poliméricas de cadena larga la fricción es afectada por la carga. Debido a que estas sustancias son viscoelásticas y su deformación depende de la geometría de las superficies, de la carga aplicada y de la duración de aplicación de la misma. Según este autor, el área real de contacto (A) estaría relacionada inversamente a la carga aplicada (P) en esos materiales, según una relación del tipo: $A \propto P^n$ donde n es menor que 1; de esta manera el coeficiente de fricción está en razón inversa a la carga. Bowden señala que este efecto puede ser muy marcado empleando pesos o cargas bajas.

La teoría de la adhesión para explicar el fenómeno del rozamiento fué enunciada independientemente por Holm en Alemania (1938), por Ernst y Merchant en los Estados Unidos (1940) y posteriormente por Bowden y Tabor en Inglaterra (1940) (47).

Bowden y Tabor (9) observaron un fenómeno de deslizamiento intermitente (en inglés: stick-slip) durante los ensayos de fricción. Ellos atribuyen al hecho a la diferencia entre la fricción estática y la dinámica, y a la elasticidad de una de las superficies de interacción.

2.2 FRICCIÓN MADERA-METAL POR DESLIZAMIENTO Y POR RODADURA

El estudio de la fricción madera-metal por deslizamiento y por rodadura ya fue tratado por Klein en 1903 (27); Kollmann (27) proporciona numerosas referencias de estudios realizados en Alemania. Sin embargo, con el trabajo de Tabor (8) y de Atack y Tabor (4) a fines de la década de 1950, el estudio del roce madera-acero recibió un gran impulso y permitió un mayor entendimiento del problema, principalmente a causa de que fueron los primeros autores que explicaron el fenómeno del roce madera-acero basándose en las modernas teorías de la fricción desarrolladas por esa época.

Atack y Tabor (4) estudiaron la fricción por deslizamiento y por rodadura en Abies balsamea a diferentes contenidos de humedad. Encontraron que el coeficiente de fricción por deslizamiento es mayor que el correspondiente por rodadura. Aparentemente esta superioridad se debería a la fuerte adhesión por puentes de hidrógeno que se registra en la fricción por deslizamiento (35) (41). Según Atack y Tabor, la estructura de la superficie de madera tiene mucha importancia en la magnitud de esa adhesión. En la fricción por rodadura el término de deformación representado por la fuerza de cizalle requerida para vencer las uniones de las zonas de contacto, es más importante que el término de adhesión que puede considerarse despreciable (4). Knudson y Schniewind (25) mencionan que el término de adhesión de la fricción es aproximadamente igual a la diferencia entre las fuerzas de fricción por deslizamiento y por rodadura.

En Australia, McKenzie y Karpovich (41) realizaron un extenso estudio de las variables más importantes - que afectan el coeficiente de fricción madera-acero, madera-madera y madera-materiales no férricos. Estos autores encontraron desviaciones de las leyes básicas de la fricción, siendo la más importante la variación del coeficiente de fricción con la velocidad de deslizamiento y también con la presión ejercida sobre la muestra de ensayo. Entre otros descubrimientos mencionan la gran interacción entre las variables velocidad, rugosidad del acero, contenido de humedad y extractivos de la madera.

La disminución del coeficiente de fricción con la presión confirma aseveraciones de Bowden (8). McKenzie y Karpovich (41) atribuyen el fenómeno tanto a una disminución de la presión media en los puntos de contacto, como a un efecto de lubricación.

Estos autores también observaron durante sus ensayos el fenómeno de "stick-slip" y aunque tomaron precauciones para eliminarlo, el fenómeno se hizo presente en las pruebas. El "stick-slip" según McKenzie y Karpovich, se puede reducir pero no eliminar; la reducción se logra lubricando la superficie, aumentando la velocidad de deslizamiento y aumentando la rigidez del sistema - de ensayo.

En cuanto a los coeficientes de fricción de la interfaz madera-madera, esos autores observaron que son similares a los de la interfaz madera-acero.

En 1970 Lemoine, McMillin y Manwiller (31) (44) (45) emplearon un método simplificado para el estudio de la fricción madera-acero. Este método consiste en deslizar una muestra de madera sobre una superficie de acero y medir la fuerza de rozamiento a través de una máquina INSTRON. El método descrito también fué empleado por Lemoine y Koch (32) para el estudio de la capacidad de sujeción de mordazas metálicas destinadas a ensayos de tensión de madera estructural.

Lemoine y colaboradores (31) emplearon madera de Pinus glabra en su estudio y detectaron un aumento del coeficiente de fricción con la remoción de los extractivos de la madera y una ligera disminución con el aumento del peso específico de la madera y con la temperatura de la superficie del metal.

Según Atack - Tabor (4) y Mckenzie - Karpovich (41) los extractivos de la madera tienen un efecto lubricante - que está asociado con la cantidad de aceites y ceras presentes en el leño; las maderas con elevado porcentaje del tipo de extractivos antes mencionados, tendrían un coeficiente de fricción menor. Posiblemente los extractivos de la madera actúen en la interfaz madera-acero como una capa que dificulta o promueve la adhesión entre los materiales, esa acción estaría determinada por la naturaleza, tipo y cantidad de los extractivos.

McMillin y colaboradores (45) consideraron el estudio del agua, etanol y ácido octanoico como lubricantes. Determinaron que la introducción de agua y etanol en la interfaz madera-acero, aumenta el coeficiente de fricción

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

μ de madera seca al horno; en tanto, se observó una disminución de ese coeficiente en las muestras saturadas. El ácido octanoico disminuyó el coeficiente de fricción de las muestras saturadas. Según Lemoine y colaboradores, influiría la polaridad de los lubricantes en el fenómeno observado.

Knudson y Schniewind (25) investigaron el efecto de algunos solventes orgánicos sobre el coeficiente de fricción por rodadura y por deslizamiento de la madera de Pseudotsuga mensiesii y Abies concolor. Utilizaron en su estudio una metodología similar a la propuesta por Lemoine y colaboradores.

Esos autores encontraron que el coeficiente de fricción por deslizamiento es más elevado que el determinado por rodadura, confirmando de esta manera los estudios de Atack y Tabor (4). Además, encontraron que ambos coeficientes disminuyen con el peso específico de la madera y que aumentan con la constante dieléctrica y con la capacidad de hinchamiento (en relación al agua) de los solventes orgánicos utilizados. La constante dieléctrica proporciona una estimación de la capacidad de los puentes de hidrógeno (25)(57); mientras que el poder de hinchamiento de los líquidos orgánicos, según investigaciones de Erickson, Rees y Kumar (6), está en relación inversa a la resistencia en compresión paralela al grano, al módulo de elasticidad y resistencia en flexión de la madera.

Finalmente, Knudson y Schniewind (25) observaron, con la ayuda del microscopio electrónico, que durante el roce madera-acero se produce una ruptura del material

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

de la pared celular. El fenómeno de "stick-slip" también se hizo presente en sus ensayos.

En el Laboratorio Nacional de Productos Forestales (64) se realizaron ensayos exploratorios de las variables que afectan el coeficiente de fricción, empleando la metodología propuesta por Lemoine y colaboradores (31). Se usó madera de Tabebuia rosea y Mouriri barinensis en los ensayos. Los resultados obtenidos mostraron una superioridad del coeficiente de fricción causada por el plano de roce (tangencial) de la madera y no se detectaron diferencias debidas a las velocidades utilizadas (5 y 50 cm/min). La orientación del grano de la madera, no afectó significativamente el valor del coeficiente de fricción.

2.3 FRICCIÓN EN EL CORTE DE MADERA

Desde hace algunas décadas, el estudio de la fricción durante el corte de la madera ha recibido especial atención, debido fundamentalmente a que el roce es una de las principales causas del desgaste y calentamiento de las herramientas de corte, llegando a influir también en la calidad de la superficie de la madera procesada (58) (59).

El coeficiente de fricción de corte puede ser determinado a partir de las fuerzas de corte por medio de la siguiente relación (26) (37) (59):

$$\mu_c = \text{Tan} \left(\text{Arctan} \frac{N}{P} + \alpha \right)$$

Donde:

μ_c = coeficiente de fricción de corte

N = fuerza normal de corte

P = fuerza paralela de corte de la herramienta

α = ángulo de corte de la herramienta

Los vectores N y P actúan sobre el filo de la herramienta de corte y pueden ser determinados experimentalmente.

Evidentemente, el coeficiente de fricción de corte (μ_c) no representa el coeficiente de fricción físico determinado por deslizamiento o por rodadura. Alexander y Brewer (1) mencionan que la analogía entre los dos tipos de coeficientes de fricción (corte y deslizamiento), es descartada debido a que en el corte ortogonal (metales) el área real de contacto es una fracción apreciable del área aparente o nominal, por lo tanto no es de esperar que el coeficiente de fricción permanezca constante como lo especifican las leyes de Amontons. El corte ortogonal o rectilíneo es un tipo de procesamiento de la madera (o de metales) en el que el filo de la herramienta de corte está ubicado perpendicularmente a la dirección de movimiento de la herramienta y donde la profundidad de corte es uniforme (26); esta acción de corte es análoga a la del cepillo manual de carpintero.

El coeficiente de fricción de corte refleja la interacción de las fuerzas de corte que se desarrollan en la madera cuando se corta ortogonalmente (58). Específicamente, McKenzie (38) menciona que en el corte de la madera existe una fase inicial de incisión dependiente de la calidad del filo de la herramienta, que da lugar a una concentración de esfuerzos y a un consumo de energía para el rompimiento de las fibras de la madera. Posiblemente ésta sea una de las causas de la diferencia entre el coeficiente de fricción de corte y el determinado por deslizamiento.

Las fuerzas de corte son variables para las distintas especies forestales y aún dentro de una misma, entre otros factores a causa de la anisotropía de la madera (39). Esto implica que el coeficiente de fricción determinado durante el corte de la madera está influenciado por una serie de variables (peso específico o dureza, cantidad y tipo de tejido parenquimático, plano de corte, orientación de las fibras, contenidos cristalinos en los radios y parénquima, radio de filo de la herramienta, ángulo de corte, temperatura, entre otras), por la interacción de ellas y por la forma de corte (42).

De tal modo que los resultados de estos estudios proporcionan un coeficiente de fricción que generalmente es superior a los proporcionados por la fricción en deslizamiento (31).

Sin embargo, es interesante ver que el comportamiento del coeficiente de fricción frente a determinados factores

es similar en ambos casos (corte y deslizamiento).

Así, McMillin en 1958 (43) estudiando el proceso de corte de chapas encontró que el coeficiente de fricción (μ) tiene una tendencia característica en relación a la temperatura de la madera entre el rango 80°F - 200°F (27°C-93°C); inicialmente μ disminuye con la elevación de la temperatura y luego aumenta ligeramente al acercarse a los 200°F. En 1970, McMillin y colaboradores (44) observaron entre el mismo rango de temperatura, un comportamiento similar del coeficiente determinado por deslizamiento. Sólo hay diferencia en la magnitud de valores encontrados. Según estos autores, en los resultados hay una notable influencia de los extractivos presentes en el leño.

Por otro lado, McKenzie y Karpovich (41) en sus estudios de la fricción por deslizamiento, encontraron un incremento del coeficiente de fricción con el aumento de la rugosidad de la superficie del acero. Recientemente Klamecki (23) (24), estudiando el corte ortogonal en madera (raíces y tronco) de pino ponderosa, observó un comportamiento de μ muy parecido al observado por McKenzie y Karpovich.

Klamecki (23) menciona que en el mecanismo de fricción entre la viruta y la herramienta de corte (Cuchilla), la adherencia interfacial es de primera importancia.

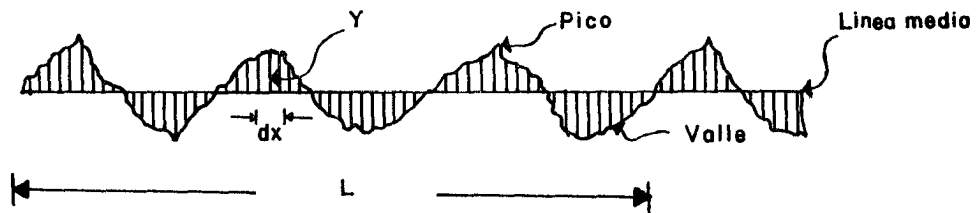
2.4 MEDICIONES PARA EVALUAR EL ACABADO SUPERFICIAL DE LOS MATERIALES.

La metodología para evaluar superficies de materiales inicialmente fue desarrollada en metales. Como resultado, se han propuesto numerosos aparatos de medida.

De acuerdo con Caubet (11), existen tres tipos de aparatos: los que registran los deslizamientos de un estilete o palpador, los ópticos (incidencia de luz en dirección oblicua a la superficie), y los aparatos - neumáticos. De los tres, el más empleado y citado por la bibliografía es el palpador, que consta de un zafiro de punta fina, del orden de una o dos micras de radio. Con un movimiento a lo largo de una línea de la superficie, el zafiro es arrastrado a una velocidad de terminada; es posible amplificar y registrar gráficamente este movimiento.

Las medidas de rugosidad superficial mediante el estilete o palpador se rigen por varios sistemas convencionales; los más importantes son el sistema Ra (rugosidad media aritmética) y el sistema R_{rms} (rugosidad media cuadrática), definidos en la figura N° 1.

La evaluación de la superficie de la madera también ha sido motivo de estudio por numerosos autores, con el objeto de complementar las prácticas de control de calidad tanto de la madera aserrada y chapas, como también de otros productos derivados de la madera. Stumbo (61), menciona que es imprescindible el control de calidad de la superficie de la madera en procesos tales como el encolado y el acabado.



$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx$$

$$R_{rms} = \frac{1}{L} \left[\int_0^L y^2 dx \right]^{1/2}$$

L = longitud recorrida por el palpador

y = distancia entre la línea media y el borde de un pico o un valle

R_a = Rugosidad media aritmética

R_{rms} = Rugosidad media cuadrática

Fig. No. 1 Sistemas Ra y Rrms para medir la rugosidad superficial de los materiales

A causa de que la madera posee características anatómicas variables según la especie, es necesario distinguir durante las mediciones de la lisura superficial, las diferencias entre textura anatómica y textura debida al procesamiento mecánico de la madera (61).

En 1957 Hann (16) propuso un método de análisis topográfico cuantitativo para superficies de madera. Este método consiste en convertir los cambios de la topografía superficial de la madera en deformaciones, ampliarlos mediante extensómetros eléctricos (strain gages) y registrar los perfiles para analizarlos estadísticamente. Para esto Hann recurre al empleo de un equipo especial.

Los valores de rugosidad encontrados por Hann (16), están relacionados con la velocidad de alimentación en el planeado o garlopado de la madera a través de una curva parabólica creciente.

Más tarde Elmendorf y Vaughan (14) realizaron una breve revisión de los métodos para medida de la lisura de la madera. Fundamentalmente se citan dos métodos: el primero consiste en fotografiar la superficie de la madera usando un haz de luz con una inclinación determinada o empleando contrastes de luz y sombra; el segundo método usa dos tipos de palpadores de la superficie: el de Foster y el Talysurf. El palpador de Foster difiere del Talysurf en que posee la punta de zafiro con radio mayor.

En 1970 Peters y Cumming (52) realizaron una extensa revisión de literatura relacionada con las medidas de la lisura superficial de la madera. Mencionan que - los métodos de evaluación visual y por el tacto, dan una información ligera y no muy exacta. Refiriéndose a los métodos ópticos. Peters y Cumming manifiestan que tienen como principal ventaja el no producir contacto físico sobre la madera que podría alterar sus condiciones superficiales y se puede detectar fácilmente alguna vellosidad presente; la desventaja es que la evaluación numérica es difícil y consume mucho tiempo.

En cuanto al uso de los palpadores, Peters y Cumming citan como ventajas la eliminación de la subjetividad en las mediciones y también la facilidad de conversión de los datos recogidos a valores numéricos para el análisis. Su desventaja es que evalúa tan sólo una línea angosta a través de la superficie.

En los palpadores, es necesario que el peso del estilete o la presión de la punta de zafiro sobre la madera, sea pequeña de modo de no causar ningún deterioro en el material (52). Peters y Cumming, mencionan que la selección del radio de la punta del zafiro está de acuerdo a la precisión que se requiera en las lecturas.

La mayoría de los investigadores que están trabajando en éste campo enfatizan ante todo, la necesidad de promover trabajos tendientes a desarrollar un método estándar de medida superficial de la madera.

2.5 ALCANCE PRACTICO DEL ESTUDIO DE LA FRICCION EN LA MADERA.

Entre las aplicaciones prácticas que conlleva el estudio de la fricción del tipo madera-metal, se tiene:

2.5.1 Cojinetes de madera

Kollmann (27) refiere que los cojinetes hechos con maderas duras usados en vagonetas, coches de ferrocarriles desmontables, ejes de grúas, cintas transportadoras y bastidores de laminador, son muy eficaces. Entre las ventajas que señala Kollmann para los cojinetes de madera, en relación a los fabricados de aleación metálica, se mencionan: menor consumo de energía, menor costo, mayor duración y mejor lubricación.

Un inconveniente que cita Kollmann es la hinchazón de los cojinetes de madera cuando se detiene la máquina, lo cual dificulta el arranque posterior. Además, los cojinetes constituidos solamente de madera no parecen resistir bien los choques intermitentes.

En Rusia Janov (20) estudió las propiedades de fricción y desgaste, de cojinetes fabricados de desechos de madera aglomerados usando el adhesivo fenol-formaldehído y presiones de 200 a 300 Kg/cm² a temperaturas de 160°C. Janov indica que esos cojinetes pueden reemplazar con un menor precio, a los fabricados de aleación metálica

para ser usados como asientos de ejes en las máquinas cosechadoras combinadas.

2.5.2 Zapatas de madera en frenos de automotores

Desde 1976 se emplean zapatas de madera en el sistema de frenos del transporte ferroviario subterráneo (Metro) de Santiago de Chile, sustituyendo de esta manera a las fabricadas de hierro fundido de los ferrocarriles tradicionales (13). La madera utilizada para este objeto procede del olivillo (Aextoxicum punctatum) una de las especies comercialmente importantes de Chile. De otro lado, el haya europea (Fagus sylvatica) es utilizada en las zapatas del freno del metro de París (5) y de otras ciudades europeas. La razón de esta forma de uso de la madera, radicaría en que "las zapatas de hierro fundido producen un polvillo metálico corrosivo que daña los equipos de este medio de transporte y además tiene un costo seis veces superior a las de madera" (13).

En México Herrera y colaboradores (17) iniciaron un estudio para determinar la aptitud de maderas nativas para la fabricación de zapatas de freno. Estos autores refieren que la norma para la fabricación de estos accesorios deriva de las características del haya. Específicamente, citan que la madera, debe tener alta capacidad de sujeción de tornillos y alta resistencia a la carbonización, debe ser de grano recto, de peso específico básico entre 0,5 a 0,6, la zapata debe absorber 300 g (mínimo) de aceite de maní y en servicio debe tener una

vida útil de cuatro a cinco meses con un coeficiente de fricción menor de 0,22. Al parecer, la impregnación con aceite de maní mejora la conducción del calor de la zapata de madera (5).

Herrera y colaboradores (17) no dan mayores detalles de los requisitos que deben cumplir las maderas, para ser usadas como zapatas ni el método para determinar el coeficiente de fricción, pero mencionan que la madera de grano entrecruzado puede causar un desgaste pronunciado en los metales. De ahí que probablemente en el uso de la madera como zapatas de frenos, jueguen un papel importante las características de abrasión o desgaste de la madera.

El Fagus sylvatica según estudios de Kollman (28), tiene una dureza entre 500 y 650 Kg/cm², un peso específico básico de 0,55, una resistencia a la abrasión relativa mayor que el pino (Pinus sp) y ligeramente menor que el roble (Quercus sp); Kollmann menciona que las pruebas de abrasión o desgaste (medidas por pérdida de peso o de espesor) de la madera, se determinan frotando las muestras con diversos agentes abrasivos como ser: arena fina o granos de cuarzo, papel lija, discos esmeriles, cepillos y raspadores metálicos o por una combinación de ellos.

Kollmann (28) reporta también, que la abrasión depende del tipo de grano, tipo de extractivos y peso específico básico de la madera: los extractivos del tipo de aceites tienen un efecto retardante del desgaste, sustancias resinosas frágiles lo favorecen; el peso específico bá-

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

sico, según Kollmann, está relacionado inversamente con la resistencia al desgaste. No se especifica el efecto del tipo de grano de la madera sobre la resistencia a la abrasión.

2.5.3 Lanzaderas de madera

En la industria de textiles se emplean a menudo lanzaderas hechas de madera. El trabajo de este accesorio involucra también un proceso de fricción del tipo madera-metal. En algunas textileras de Mérida la duración de las lanzaderas es de sólo seis meses, a causa del desgaste de la madera usada (Cedrela sp); en tanto que las fabricadas de productos sintéticos es mayor por su resistencia al desgaste, relativamente mayor.

No se tiene referencias a cerca de las especificaciones que deben cumplir la madera para ser usada como lanzaderas en la industria de textiles.

2.5.4 Comportamiento Friccional de los conectores de madera y mejora en el sistema de sujeción de mordazas en ensayos de tensión de la madera.

De acuerdo con los estudios de McKenzie y Karpovich (41) y las referencias de Bowden (8), el coeficiente de fricción madera-acero se asemeja al correspondiente a madera-madera y disminuye con la presión ejercida en la interfaz de contacto.

Möler y Maier (46) en Alemania, estudiando la resistencia a la fricción de conectores de madera, encontraron también una disminución en el coeficiente de fricción madera-madera con el aumento de la presión o carga normal. Esto indicaría que el estudio de la fricción madera-acero podría proporcionar una guía del comportamiento friccional que presentan los conectores de madera. No está muy estudiado el fenómeno del roce en los conectores y otros tipos de uniones de la madera.

Por otro lado, Lemoine y Koch (32) estudiando el coeficiente de fricción (dinámica y estática) entre la madera (Pinus elliotti y Quercus falcata) y otros materiales, con el fin de mejorar el sistema de sujeción de las mordazas metálicas durante los ensayos de tensión de la madera; encontraron que el poliuretano proporciona un coeficiente de fricción estática 9 veces mayor que una superficie de acero de 9 micropuladas RMS y que podría utilizarse en el sistema de sujeción de las mordazas, para impedir el deslizamiento de la madera en los ensayos de tensión. Sus resultados fueron confirmados en la práctica.

2.5.5 Optimización del corte de madera

En los estudios de la fricción entre dos cuerpos realizados por Bowden y Tabor (9) (10), se determinó que uno de los valores más bajos de μ se produce en el roce metal-Teflón y madera-Teflón (Politetrafluoretileno ó P.T.F.E.). Esto dió lugar a que en 1969 la empresa Acheson Colloids de Estados Unidos, recomienda el uso del P.T.F.E. como lubricante en el proceso de planeado o gar-

lopado de grandes bloques de roble (Quercus sp.) (3). Normalmente el deslizamiento de estos bloques sobre la base de alimentación de la planeadora se realiza con un marcado deslizamiento intermitente o "stick-slip".

La aplicación del Teflón se hace en forma de fumigación y proporciona una capa muy delgada y transparente del material que se mantiene adherida a la superficie de la madera, facilitando el deslizamiento suave de los bloques durante la alimentación a la máquina. Los resultados obtenidos en la práctica fueron muy satisfactorios, inclusive en otros procesos de corte usando sierras, cepillos de mano y escoplos.

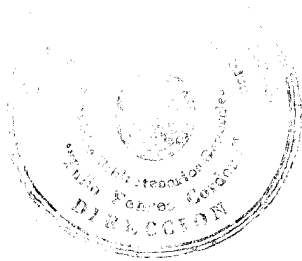
Stewart (58) (59), reporta que el coeficiente de fricción determinado en experimentos de corte de la madera, constituye un parámetro importante en la selección de un adecuado ángulo de corte de las herramientas.

2.6 ALCANCE DEL PRESENTE ESTUDIO

El presente estudio se propone fundamentalmente, estudiar la influencia que podrían causar en el coeficiente de fricción madera-acero, las variables; plano de roce de la madera, peso normal aplicado y velocidad de deslizamiento (2 niveles por cada variable).

El trabajo se encaró debido a la carencia de investigaciones acerca del coeficiente de fricción madera-acero (μ) en maderas tropicales y a la incertidumbre del efecto de algunas variables sobre μ , mencionada en

Licencia Creative Commons:



la bibliografía. En nuestro estudio se consideraron seis especies forestales venezolanas seleccionadas dentro de un amplio rango de peso específico básico.

La metodología de estudio seleccionada es similar a la practicada por Lemoine, McMillin y Manwiller (31) (44) (45) en razón de la disponibilidad del material y equipo necesario para su realización. La citada metodología tiene como principales ventajas, la opción de deslizar una probeta de madera sobre una superficie de acero (31) (44) (45) ó viceversa (25), y el empleo de superficies nuevas de madera en cada ensayo de roce, lo cual asigna mayor validez al coeficiente de fricción de terminado. La desventaja constituye la limitación de la velocidad máxima de ensayo en 100 cm/min, que es la máxima velocidad del cabezal de la máquina de ensayos INSTRON.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 MATERIAL DE ESTUDIO

3.1.1 Selección de especies

El material de estudio se obtuvo de las seis especies siguientes:

Bombacopsis quinata (Jacq.) Dugand (Saqui-saqui).....
Bombacaceae

Didymopanax morototoni (Aubl.) Dcne. & Pl. (Sun sun)..
Araliaceae

Hieronyma laxiflora (Tul.) Muell. Arg. (Carne asada)..
Euphorbiaceae

Moiriri barinensis (Morley) Morley (Perhuétamo)....
Melastomaceae

Pouteria anibifolia (A.C. Smith) Baehni. (Chupón rosado)
Sapotaceae

Tabebuia rosea (Bertol.) DC. (Apamate)....
Bignoniaceae

Las especies fueron seleccionadas de manera de poder cubrir un amplio rango de peso específico básico, pretendiendo discernir un posible efecto de este factor.

Con el fin de realizar algunas observaciones del posible efecto de los extractivos de la madera, sobre el coeficiente de fricción, se eligió la especie Copaife-
ra pubiflora Benth. (Aceite cabimo) de la familia CAESALPINACEAE. De acuerdo a los estudios químicos realizados en el L.N.P.F. siguiendo las normas de trabajo ASTM y TAPPI (30), esta especie contiene en su leño un elevado porcentaje de extractivos como se detalla a continuación:

Tabla Nº 1. Porcentaje de extractivos de aceite cabimo

Solvente usado	Tiempo de extracc.	% de Extractivos
Etanol-benceno (mezla 1:2)	8 horas	12,01
agua caliente	4 "	9,64
acetona	7 "	11,01
Hidróxido de sodio 1%	-	24,32

FUENTE: División de Química de la Madera del L.N.P.F.

Todas estas especies han sido objeto de estudios tecnológicos anteriores en cuanto a sus propiedades fisicomecánicas y de trabajabilidad, dentro de los proyectos de investigaciones forestales que promueve el Pacto Andino en la Subregión. Sin embargo aún no se han encarado estudios del comportamiento friccional de estas maderas ni de ninguna otra en el L.N.P.F.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

3.1.2 Características generales y anatómicas

Las características generales y anatómicas de las especies que se detallan en este trabajo, corresponden a observaciones macroscópicas y microscópicas realizadas por el autor y también a consulta de literatura especializada (12) (51) (53) (63).

Bombacopsis quinata (Jacq.) Dugand

La madera de Saqui-saqui es de color castaño rosáceo a castaño rojizo en el duramen y amarillento en la albura con una transición abrupta entre ellos. Olor ausente, sabor a veces ligeramente astringente. Grano recto o algo entrecruzado, textura mediana a moderadamente gruesa. Fácil de trabajar, muy durable. Moderadamente blanda y liviana.

Incrementos de crecimiento generalmente poco diferenciados. Poros grandes, solitarios y en múltiples radiales hasta de cuatro, tñlides presentes. Porosidad difusa. Parénquima en líneas apotraqueales finas cortas e irregulares que se extienden en dirección tangencial formando un retículo con los radios, parénquima estratificado.

Radios multiseriados, heterocelulares tipo III.

Didymopanax morototoni (Aubl.) Dcne. & Pl.

Duramen color pardo grisáceo o amarillento, poca o nin-

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

guna diferenciación entre albura y duramen; líneas vasculares visibles a simple vista. Olor ausente, sabor ligeramente amargo. Grano recto, textura mediana a moderadamente fina. Fácil de trabajar, poco durable. Moderadamente blanda y liviana.

Poros abundantes, visibles a simple vista, solitarios y en múltiples radiales hasta de cuatro. Porosidad difusa, Parénquima escasamente paratraqueal o vasicéntrico angosto.

Radios finos a muy finos, heterocelulares tipo III.

Hieronyma laxiflora (Tul.) Muell. Arg.

Madera de color castaño oscuro a castaño rojizo, albura de color rosácea, transición abrupta entre albura y duramen. Textura media a moderadamente gruesa. Grano entrecruzado, difícil de trabajar, Medianamente pesada.

Poros exclusiva o predominantemente solitarios, medianos a grandes. Porosidad difusa a veces, localmente con tendencia a semicircular. Parénquima apotraqueal difuso y en agregados cortos, muchas de las células con el lumen lleno de una goma oscura.

Radios finos, heterocelulares, con varias hileras de células marginales. Presencia de cristales en los lúmenes de los radios.

Mouriri barinensis (Morley) Morley

Madera de color castaño rosáceo y rojizo a castaño amarillento. Poca diferenciación entre albura y duramen. Grano a veces entrecruzado, textura mediana. Incrementos de crecimiento pobremente definidos. Olor y sabor ausentes. Dura y pesada.

Poros pequeños a medianos, solitarios y en múltiplos, predominando los primeros. Presencia de tñlide en los poros. Parénquima paratraqueal escasamente vasicéntrico. Islas de floema incluso.

Radios finos, predominantemente uniseriados, con algunos biseriados. Presencia de algunos cristales en los radios y depósitos oscuros de goma.

Pouteria anibifolia (A.C. Smith) Baehni

Duramen de color castaño grisáceo o rojizo, transición gradual a la albura de color más claro. Grano recto, a veces entrecruzado u ondulado. Textura mediana a fina; incrementos de crecimiento poco definidos. El duramen no tiene olor característico pero algunas veces posee un sabor astringente. Muy pesada y difícil de trabajar.

Poros moderadamente pequeños, solitarios y comúnmente en múltiplos radiales de 2 a 4. Esclerotñlides a veces presente. Parénquima en bandas apotraqueales conteniendo algunos glomérulos de goma en su interior.

Radios uni y biseriados, heterocelulares del tipo II y III. Presencia de goma, numerosos cristales y depósitos silíceos en los lúmenes de las células radiales. Series parenquimáticas cristalíferas presentes.

Al respecto, Amos (2) manifiesta que el género Pouteria de las SAPOTACEAE, además de depósitos silíceos presenta cristales de otro tipo, parecidos a los cristales de lija, y que en las familias MELASTOMACEAE Y ARALIA-CEAE, entre otras, no se encontraron maderas silicosas.

Tabebuia rosea (Bertol.) DC.

Es una madera de color castaño grisáceo con veteado conspicuo producido por los incrementos de crecimiento y el parénquima asociado con los poros. Poca diferencia de color entre la albura y el duramen, posee grano recto y a veces entrecruzado. Textura mediana. Incrementos de crecimiento a veces algo indistintos indicados por la ausencia de poros en una zona angosta y concéntrica de leño tardío, de igual color que el leño temprano y una línea fina de parénquima terminal. Olor y sabor ausentes o no distintivos. Medianamente pesada.

Poros de tamaño medio, solitarios y en múltiples cortos. Parénquima paratraqueal vasicéntrico aliforme, confluyente-aliforme y confluyente formando bandas irregulares, onduladas tangencialmente; estratificado.

Radiales de dos a cuatro células de ancho, la mayoría biseriados; radios típicamente homocelulares; estratificados.

3.1.3 Propiedades mecánicas

Estudios efectuados en el L.N.P.F. (29) (30), proporcionan para las seis especies los valores de resistencia mecánica detallados en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2. Resistencia Mecánica de las Especies en estudio.

Especie	Peso Esp. Bás.	Comp. Par.		Comp. Perp. ELP	Flexión		Dureza LAT.	Cizalle Lat.
		E x1000	EM		E x1000	EM		
Apamate	0,545	84	658	63	128	1129	547	129
Carne Asada	0,550	76	569	70	126	1082	510	128
Chupón	0,666	91	666	99	152	1309	821	148
Perhuétamo	0,784	109	926	121	181	1617	1093	151
Saqui-saqui	0,412	53	387	52	101	736	237	51
Sun Sun	0,356	58	414	27	108	653	291	88

Nota. Los valores de resistencia mecánica están expresados en Kg/cm².

E = módulo de elasticidad; ELP = esfuerzo al límite proporcional; EM = esfuerzo máximo

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Diseño experimental

El presente estudio se ha encarado como un experimento factorial completamente aleatorizado, con los siguientes factores fijados para cada especie.

FACTOR

NIVELES

A - plano de roce	$a_1 = \text{radial}; a_2 = \text{tangencial}$
B - velocidad de desliz	$b_1 = 5 \text{ cm/min}; b_2 = 50 \text{ cm/min}$
C - peso normal aplicado	$c_1 = 500 \text{ g}; c_2 = 2000 \text{ g}$

Cada combinación de niveles (o tratamientos) $a_i b_j c_k$ fue replicado en un número de 20 para cada especie. El número de repeticiones ha sido estadísticamente calculado en base a datos recogidos en madera de apamate y Perhuétamo en un estudio anterior sobre la variabilidad del coeficiente de fricción, μ (64). Se asumió que las otras cuatro especies tienen un comportamiento similar que el Apamate y el Perhuétamo en cuanto a variabilidad de μ ; el intervalo % de confianza (+P) adoptado para el promedio total de μ en los distintos tratamientos se fijó en 10%.

El diseño seleccionado permite encontrar el efecto particular de cada variable sobre el coeficiente de fricción, asimismo permite estimar la interacción entre los factores en estudio.

El modelo lineal del diseño adoptado, de acuerdo a terminología de Ostle (49) es:

$$Y_{ijkl} = \bar{\mu} + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl}$$

siendo:

l = número de repeticiones: 1,2.....20; para todo i, j, k.

Y_{ijkl} = observación "l" del coeficiente de fricción,

correspondiente al tratamiento "i" del factor A (plano o cara de roce), al "j" tratamiento del factor B (velocidad de desliz) y al "k" tratamiento del factor C (peso aplicado a la muestra de ensayo).

- $\bar{\mu}$ = media poblacional del coeficiente de fricción.
- α_i = efecto fijo del nivel "i" del factor A.
- β_j = efecto fijo del nivel "j" del factor B.
- γ_k = efecto fijo del "k" nivel del factor C.
- $\alpha\beta_{ij}$ = efecto fijo debido a la interacción del nivel i (factor A) y j (factor C).
- $\alpha\gamma_{ik}$ = efecto fijo debido a la interacción del nivel i (factor A) con k (factor C).
- $\beta\gamma_{jk}$ = efecto fijo debido a la interacción del nivel "j" del factor B con el nivel "k" del factor C.
- $\alpha\beta\gamma_{ijk}$ = efecto fijo debido a la interacción del iésimo nivel del factor A con el nivel "j" del factor B y con el nivel "k" del factor C.
- ϵ_{ijkl} = efecto (aleatorio) residual de la observación Y_{ijkl}

De acuerdo al modelo adoptado, la comparación del efecto de los diferentes factores en estudio se evalúa según el esquema que se da en la tabla N° 3, para cada especie.

Tabla N° 3. Esquema de análisis de varianza para el modelo estadístico adoptado.

<u>Fuente de Variación</u>	<u>Grados de Libertad</u>	<u>Cuadrado Medio</u>	<u>F Calculado</u>	<u>Hipótesis Nula</u>
A	a - 1	CM A	$\frac{CM A}{CM R}$	$\alpha_i = 0$
B	b - 1	CM B	$\frac{CM B}{CM R}$	$\beta_j = 0$
C	c - 1	CM C	$\frac{CM C}{CM R}$	$\gamma_k = 0$
AB	(a-1)(b-1)	CM AB	$\frac{CM AB}{CM R}$	$(\alpha \beta)_{ij}=0$
AC	(a-1)(c-1)	CM AC	$\frac{CM AC}{CM R}$	$(\alpha \gamma)_{ik}=0$
BC	(b-1)(c-1)	CM BC	$\frac{CM BC}{CM R}$	$(\beta \gamma)_{jk}=0$
ABC	(a-1)(b-1)(c-1)	CM ABC	$\frac{CM ABC}{CM R}$	$(\alpha \beta \gamma)_{ijk}=0$
RESIDUAL	abc(1-1)	CM R		para todo i, j, k.
TOTAL	abc1-1			

Se consideraron sólo los niveles radial y tangencial del factor A (plano de roce) ya que esas caras proporcionan bases de referencia de los procesos de uso de la madera. Aunque en el estudio exploratorio anterior no se detectaron diferencias significativas para el coeficiente de fricción en las caras radial y transversal, y además Lemoine y colaboradores (31) tampoco encontraron diferencias significativas para las tres caras de la madera, en el presente trabajo se hicieron nuevos ensayos de fricción empleando tres caras de la madera, para esto se recurrió al material procedente de Aceite cabimo.

En cuanto a los dos niveles es del factor B (velocidad de desliz), se seleccionó 5 cm/min. con el fin de realizar comparaciones de resultados con los mostrados por la bibliografía, y 50 cm/min. por limitaciones de equipo en los ensayos.

Finalmente, los niveles correspondientes al factor C se fijaron, por una parte (500 g) con objeto de comparación de resultados con la bibliografía y por otro lado, los 2000 g del segundo nivel constituyeron el peso límite para poder controlar el "stick-slip", ya que en ensayos preliminares se vió que pesos mayores al indicado acentúan el fenómeno de intermitencia en el deslizamiento de la muestra de ensayo.

Con respecto al análisis de la influencia del contenido de extractivos de la madera sobre el coeficiente de fricción, se adoptó el esquema de diseño anteriormente citado, sólo que en el plano de roce se consideraron tres

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

niveles: caras radial, tangencial y transversal, y el número de repeticiones se fijó en 6 debido a limitaciones de tiempo fundamentalmente.

En el presente estudio se considera como muestra en su sentido estadístico, solamente la parte superficial de la probeta de madera en contacto con el acero. Como en cada probeta debían ejecutarse 8 diferentes ensayos (8 tratamientos), luego de cada prueba las muestras fueron lijadas con el fin de renovar la superficie de la madera y dejarla apta para un nuevo ensayo.

Sin embargo, con el fin de hacer una estimación del posible efecto de compactación que teóricamente podría ser ocasionado por la carga aplicada, se hizo un breve análisis numérico tomando en cuenta la carga mayor empleada (2000 g), como se describe a continuación.

Se consideró una especie de peso específico medio: Carne asada. Estudios realizados en el L. N. P.F. (29) (30) proporcionan los siguientes valores de resistencia de esta madera (ver también Tabla N° 2).

COMPRESION PARALELA:

módulo de elasticidad: 76.000 Kg/cm²

esfuerzo máximo: 570 Kg/cm²

COMPRESION NORMAL:

esfuerzo al límite proporcional: 70 Kg/cm²

CIZALLE:

esfuerzo máximo: 128 Kg/cm²

Cálculo de la deformación unitaria ϵ causada a la madera durante los ensayos:

peso aplicado: 2 Kg

área probeta: 6,25 cm²

esfuerzo: $\sigma = \frac{\text{peso}}{\text{área}} = 0,32 \text{ Kg/cm}^2$

% de resistencia solicitada = $\frac{0,32 \text{ Kg/cm}^2}{70 \text{ Kg/cm}^2} \times 100 = 0,5 \%$

$$\epsilon = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{módulo de elasticidad}} = \frac{0,32 \text{ Kg/cm}^2}{76.000 \text{ Kg/cm}^2} = 4 \times 10^{-6}$$

Se efectuaron también mediciones de la remoción de madera durante el lijado de las probetas con lijas N^o 240 y N^o 400 obteniéndose un valor promedio de 22,5 mm³ para las tres caras. El espesor removido promedio fué 0,003 cm.

$$\text{remoción unitaria} = \frac{0,003 \text{ cm}}{2,50 \text{ cm}} = 1,2 \times 10^{-3}$$

o sea el 0,12 % del espesor total de la muestra, esto representa:

$$\frac{1,2 \times 10^{-3}}{4 \times 10^{-6}} = 300 \text{ veces más que la deformación unitaria.}$$

Esto implicaría que podría considerarse como una muestra estadística la superficie removida durante el lijado (ver figura N° 2); teóricamente no debería afectar los resultados de los ensayos de deslizamiento, según se demostró numéricamente. Sin embargo, se consideraron pruebas de comprobación de esta suposición utilizando material de Carne Asada, preparándose dos probetas - por cada uno de los 8 tratamientos en todos los árboles. Se realizaron también algunos ensayos empleando madera de Saqui-saqui.

La figura N° 2 muestra la representación ampliada de una parte de la probeta aledaña a la interfaz de contacto; en ella se puede apreciar la magnitud de la remoción originada durante el lijado y la deformación causada por el peso mayor aplicado (2000 g).

3.2.2. Metodología general

Las probetas de ensayo fueron preparadas de material residual existente en la actualidad en la División de Asestado y Trabajabilidad del L.N.P.F. Ese material procede de 10 árboles por especie recolectados por el L.N.P.F. para estudios tecnológicos de los Proyectos Andinos de Desarrollo Tecnológico en el Área de los Recursos Forestales Tropicales (PADT-REFORT), fase I. los árboles de Sun sun provienen del Estado Bolívar a 80 kilómetros de la carretera El Dorado - Santa Elena de Uairén. La madera fue tomada en zonas de 50 metros de ancho a cada lado de las vías de saca. De cada árbol se obtuvieron dos trozas destinadas a los diferentes ensayos. En la selec

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

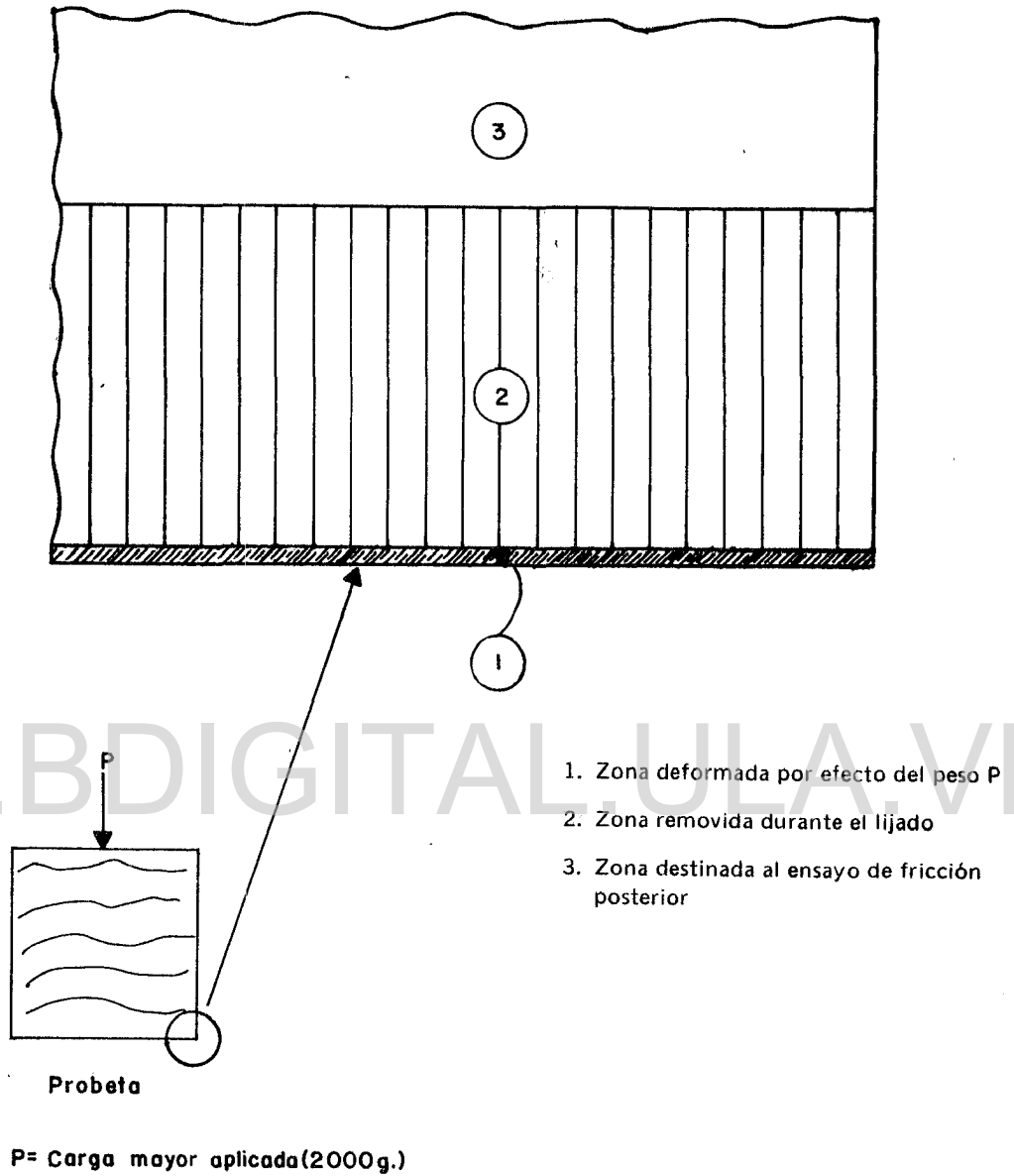


Fig. No. 2 Relación gráfica entre la deformación causada por la mayor carga aplicada y el espesor removido durante el lijado de las probetas

ción de esos árboles se tomó en cuenta la representatividad de la generalidad de los árboles de esta especie y la aptitud de ellos para la obtención de material suficiente para los ensayos tecnológicos.

Las demás seis especies (incluyendo Aceite cabimo) se obtuvieron en la Unidad 2 de la Reserva Forestal de Ticoporo (Estado Barinas). En la selección de los árboles se tomaron en consideración los mismos criterios - que para el caso del Sun sun.

Las tablas (1 metro de largo) de las seis especies se mantuvieron estacionadas en la Sala de Aserrado por espacio de 3 años. Como cada tabla procede de cada uno de los diez árboles por especie, se prepararon dos probetas de 2,5 x 2,5 x 2,5 cm por tabla (cortadas de los extremos), teniendo cuidado en obtener superficies radiales y tangenciales bien orientadas.

La razón principal para usar probetas cúbicas es que cada una de ellas permite el empleo consecutivo de las caras radiales y tangenciales durante los ensayos, limitando la variabilidad debida a la posición y destacando el efecto de la anisotropía de la madera.

Las dimensiones se seleccionaron de acuerdo a las usadas por Lemoine y colaboradores (31) (44) (45), con fines de comparación de resultados. Sin embargo se realizaron algunas observaciones en Sun sun, Apamate, y Chupón rosado con probetas de dimensiones: 3,5 x 3,5 x 3,5 cm (área duplicada) y 5 x 5 x 5 cm (área cuadruplicada), obteniéndose resultados bastante similares en todos los casos.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

En cuanto al análisis del efecto de los extractivos de la madera, de un extremo de cada una de seis tablas - (árboles) pertenecientes a Aceite cabimo, se tomaron dos probetas con las mismas dimensiones del material preparado en las otras seis especies. Una de esas probetas fue destinada al tratamiento de extracción y la otra se mantuvo como control.

Además, se preparó material adicional para el control del contenido de humedad y para la observación de otras variables no contempladas en el diseño descrito anteriormente.

Seguidamente todo el material fue almacenado en el ambiente natural de la Sala de Ensayos Mecánicos del L.N.P.F. En este período las superficies radiales y tangenciales de las probetas fueron mejoradas con lijas N° 80, N° 120 y N° 320, sucesivamente. Aunque las muestras ya estaban climatizadas anteriormente en un ambiente similar, se controló el peso de ellas hasta el equilibrio.

Para realizar los ensayos de fricción por deslizamiento, se tomó un trozo de lámina de acero procedente del fleje de una sierra cinta UDDEHOLM nueva. Este acero tiene una composición de 0,75 % de carbono, 0,20% de sílice, 0,35 % de manganeso y 2% de níquel. Por su temple tiene unas características similares a las del grupo de acero para sierras de cinta, cuya dureza es 450 + Vickers o 45 Rockwell C (48).

Esta lámina fue instalada sobre un soporte de madera (ver Figura N° 3). La superficie de deslizamiento se dividió en seis zonas de 8 cm de largo cada una y se asignó una para cada especie en estudio. En estas zonas se hicieron mediciones de la rugosidad de la superficie con la ayuda de un aparato del tipo estilete o palpador marca TAYLOR - HOBBSON (Ver Figura N° 4). El estilete posee una punta de zafiro con un radio de 0,0001 pulgada (2,5 micras); el movimiento del estilete o palpador se realiza a una velocidad constante de 0,5 cm/min; el rango de desplazamiento está entre 2,5 y 16 mm, regulable. Las medidas que proporciona están expresadas en rugosidad media aritmética (R_a) y el máximo valor que se puede medir con este aparato es de 1000 micropulgadas R_a .

Este equipo lleva consigo un patrón de calibración o de referencia de 230 μ pulg. R_a , de modo que antes de realizar lecturas con este aparato se busca la presión óptima del estilete sobre la muestra patrón hasta encontrar el valor correcto de rugosidad, deslizando el palpador en sentido perpendicular a las estrias del metal. Esto se logra por medio de un soporte de movimiento vertical.

Antes de los ensayos, las caras radiales y tangenciales de las probetas se lijaron con una lija N° 400 y se verificó el área de contacto madera-metal. La superficie del acero se limpió con acetona y luego con agua destilada, para eliminar impurezas. Seguidamente se tomó una muestra patrón de Apamate para deslizarla sobre la pista de ensayo con objeto de eliminar impurezas restante.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

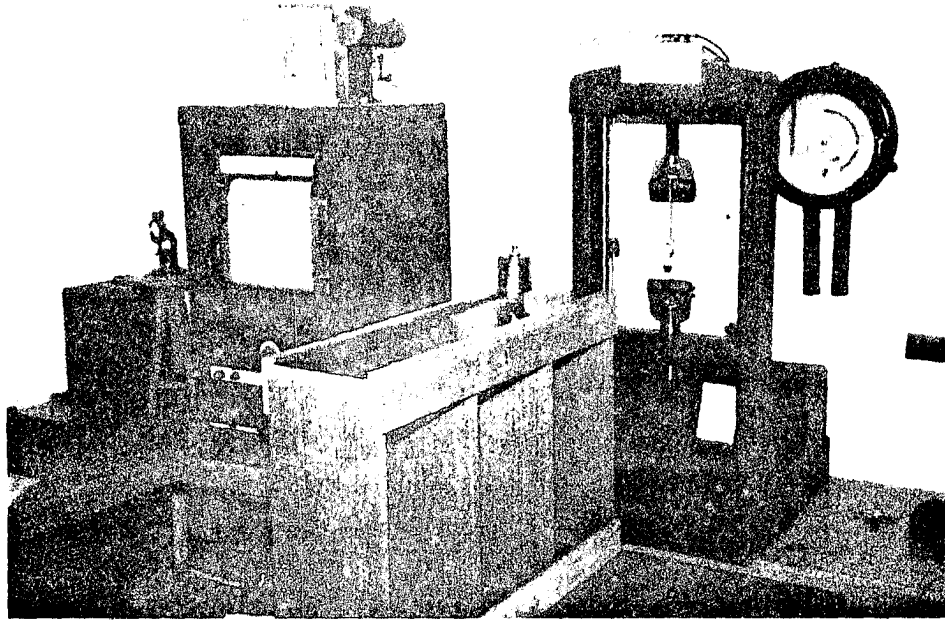


Fig. No. 3 Equipo de ensayo empleado para el estudio de la fricción por deslizamiento



Fig. No. 4 Rugosímetro para evaluar el acabado superficial de los materiales

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Luego, las probetas de ensayo fueron deslizadas sobre la superficie de acero en dirección paralela a las estrias del metal, aplicándoles una determinada carga - normal. El cabezal de una máquina INSTRON permitió - mantener una velocidad constante en el deslizamiento de la muestra sobre la superficie metálica y también proporcionó simultáneamente la fuerza de fricción de la interfaz madera-acero. El sistema de ensayo empleado se encuentra detallado en la Figura N° 5.

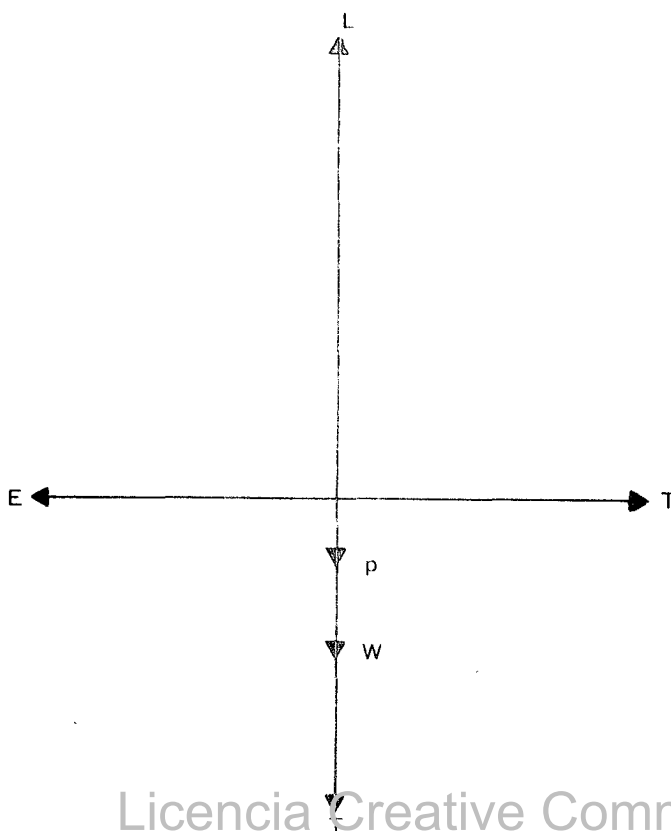
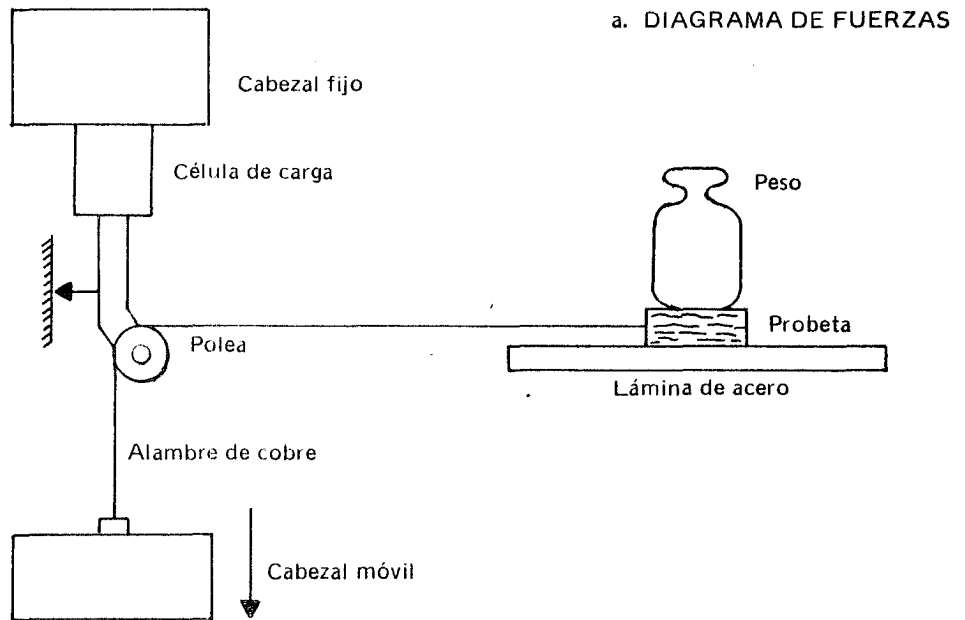
Los ensayos se realizaron según el siguiente orden:

- 5 cm/min de velocidad de deslizamiento y 500 g de - peso normal aplicado.
- 50 cm/min de velocidad de deslizamiento y 500 g de peso normal aplicado.
- 5 cm/min velocidad y 2000 g de peso aplicado
- 50 cm/min de velocidad y 2000 g de peso aplicado

De modo que se tomaba una probeta de ensayo y se realizaban todos los ensayos descritos. Sin embargo luego de cubrir un gran número de probetas de las primeras especies ensayadas se obtuvieron algunos resultados erráticos; concretamente se vió que el coeficiente de fricción disminuía a medida que progresaban los ensayos.

Posiblemente hayan influido en este fenómeno residuos de extractivos presentes en el acero debido a una deficiencia en la forma de limpieza de las pistas (acetona y agua destilada), y también los períodos prolongados

FIG. Nº. 5 ANALISIS VECTORIAL PARA DETERMINACION DE LA FUERZA DE FRICCION



de carga y descarga de las probetas hayan producido un compactamiento progresivo de la superficie de roce de la madera.

Por ello se procedió a lijar las muestras antes de cada ensayo con lijas N° 240 y N° 400 con el fin de lograr una mayor remoción, y se limpió el acero derramando un poco de acetona sobre la pista y luego se pasó un trapo seco por encima; además se redistribuyó el orden de los ensayos realizándose primero la totalidad de ensayos correspondientes al peso menor (500 g) en cada especie y luego los del peso mayor (2000 g). Se observó que este procedimiento además de eliminar la anomalía anterior, posee mayor versatilidad ya que permite visualizar la variabilidad de los resultados directamente en el papel de registro de la INSTRON y permite también agilizar la realización de los ensayos.

Cada observación del coeficiente de fricción se hizo por triplicado. La variación de la fuerza de fricción de la muestra patrón estuvo comprendida entre 180 ± 3 g ($\mu = 0,140 \pm 0,005$) en las 6 pistas.

El contenido de humedad de las probetas fue determinado después de cada ensayo; al finalizar los ensayos se midió nuevamente la rugosidad del acero en cada una de las seis zonas del acero y se determinó el peso específico de las probetas. Para ello, las muestras fueron saturadas en agua a través de la inmersión bajo vacío y luego de determinar el volumen saturado, todo el material fué secado en una estufa eléctrica a 105°C de

temperatura por espacio de 70 horas continuas.

Para la evaluación del acabado superficial de la madera antes y después de los ensayos de deslizamiento, se recurrió al empleo del palpador TAYLOR-HOBBSON; para esto se realizaron 3 mediciones de la rugosidad en cada cara (radial y tangencial), desplazando el estilete en sentido perpendicular al grano con su máximo rango de movimiento (16 mm).

Tomando en cuenta las recomendaciones de Peters y Cumming (52), en sentido de usar una baja presión en la punta del palpador. Se empleó la misma requerida para calibrar la muestra patrón. Esta presión correspondió a un movimiento vertical descendente promedio de 0,102 mm de la punta del palpador.

Luego de efectuadas las mediciones, las probetas fueron observadas en un microscopio estereoscópico con el fin de detectar algún daño por efecto de la punta del estilete. No se encontró ningún daño visible en esas zonas.

Posiblemente haya un deterioro sobre las capas exteriores de la pared celular, como bien lo demostraron los estudios de Knudson y Schniewind (25), esto podría ser apreciado con la ayuda del microscopio electrónico.

3.2.3 Ensayos adicionales

3.2.3.1 Extracción con solventes

Las probetas de Aceite Cabimo permanecieron estacionadas

en las condiciones ambientales naturales de la Sala de Ensayos durante 5 meses, al cabo de este tiempo se introdujeron en aparatos del tipo Soxhlet para su extracción con mezcla alcohol-benceno en proporción 1:2. La extracción se hizo durante 8 horas consecutivas obteniéndose una solución fuertemente coloreada. Luego las muestras fueron introducidas en un erlemmeyer con teniendo agua destilada para su extracción en ese líquido. El proceso se realizó en un baño de agua hirviendo por espacio de 10 horas y luego en agua fría durante 36 horas, obteniéndose una solución marrón. La secuencia de la extracción se basó en la norma ASTM D 1105 - 56.

Ante la sospecha de residuos de extractivos presentes en el leño, se procedió a extraer nuevamente las probetas con acetona durante 25 horas; cada 4 a 5 horas se cambiaba solvente debido a la coloración intensa por los extractivos.

Finalmente las muestras fueron tratadas con etanol 95% durante 9 horas continuas en un aparato Soxhlet.

El estacionamiento de las probetas se hizo en el ambiente natural de la Sala de Ensayos del L.N.P.F.

3.2.3.2 Efecto de la dirección de las fibras de madera

Con el fin de realizar ensayos de comprobación en cuanto a la similitud del coeficiente de fricción según deslizamientos en sentido paralelo y perpendicular a las fibras, se tomaron dos probetas de cada una de tres es-

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

pecies: Saqui-saqui, Apamate y Chupón rosado. Estas muestras fueron deslizadas en sentido paralelo a las estrias del acero. Razones de tiempo limitaron el número de especies y de muestras por especie en estos ensayos.

3.2.3.3 Efecto del desliz perpendicular a las estrias del acero.

Aunque en los estudios de Lemoine y colaboradores (31) (44) (45) no se consideraron pruebas de deslizamientos en dirección perpendicular a las estrias del acero, es de suponer, de acuerdo a las observaciones de McKenzie y Karpovich (41) que en ensayos en sentido perpendicular a las estrias del acero nos encontremos con un valor de la rugosidad del acero superior al que posee el metal en dirección paralela a las estrias, lo cual puede ocasionar una elevación del coeficiente de fricción.

Con el fin de estudiar mejor este hecho, se tomaron en consideración tres especies: Saqui-saqui, Apamate y Chupón rosado; de cada una de ellas se tomaron dos probetas, realizándose las observaciones por duplicado.

3.2.3.4 Ensayos de fricción a elevada velocidad

Para el estudio del deslizamiento a velocidades mayores de 50 cm/min. se recurrió al empleo de cilindros de madera procedente de las especies: Saqui-saqui, Apamate,

Carne asada, Chupón rosado y Perhuétamo. Se omitió el estudio en Sun sun por limitaciones de material. Los cilindros fueron preparados en el L.N.P.F. y montados en un torno en la Escuela de Ingeniería Mecánica, con el grano paralelo al eje del torno.

Se tornearon nuevamente los cilindros hasta obtener un diámetro de 92 mm en cada uno de ellos y también para mejorar su forma; se lijó la superficie con lijas N^os 240, 320 y 400 sucesivamente. El torno tiene las siguientes características: marca COLMAC 160, 3 HP, 16 velocidades discontinuas de giro desde 26 hasta 1500 rpm, carro portacuchillas maniobrable.

Para determinar las fuerzas normal y de fricción se recurrió a un dinamómetro diseñado para medir las fuerzas de corte en el torneado de metales (Figuras N^os 6 y 7. Este dinamómetro consta de un prisma con cuatro extensómetros eléctricos (Strain gauges), dos para registrar la fuerza axial y dos para registrar la fuerza de flexión (fricción en este caso), y una placa circular de acero de 39 mm de diámetro que toma contacto con la madera.

Esta placa fue preparada de acero amutis para herramientas, recibió un tratamiento de temple a 800°C durante media hora y fue enfriado en aceite. Se determinó la dureza en una máquina de ensayos y la rugosidad (transversal a las estrias) con el palpador TAYLOR-HOBBSON, obteniéndose 50 Rockwell C y 370 μ pulg. R_a respectivamente.

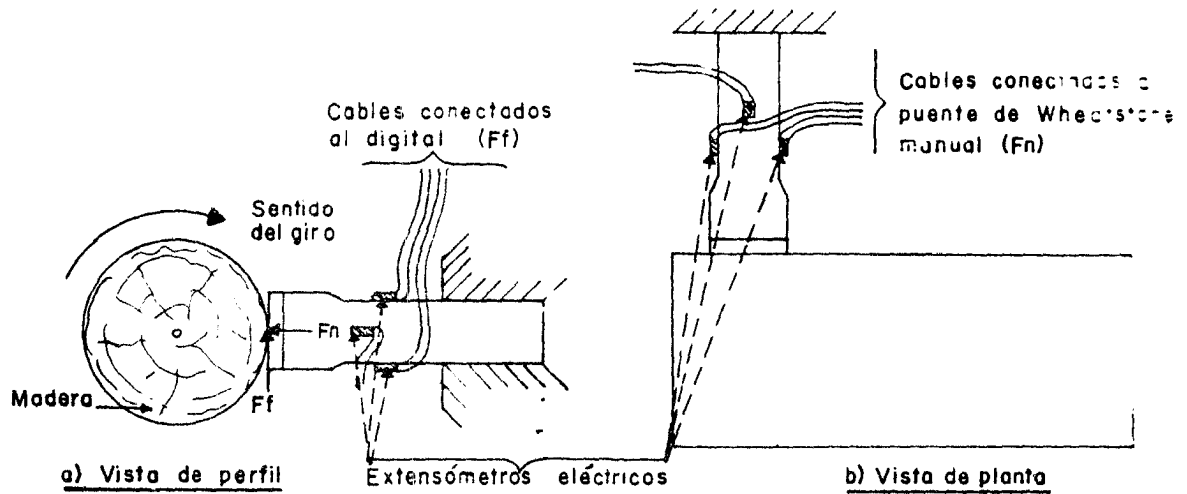


Fig. No. 6 Esquema del método empleado para determinar las fuerzas: normal (F_N) y de fricción (F_f) en el torno

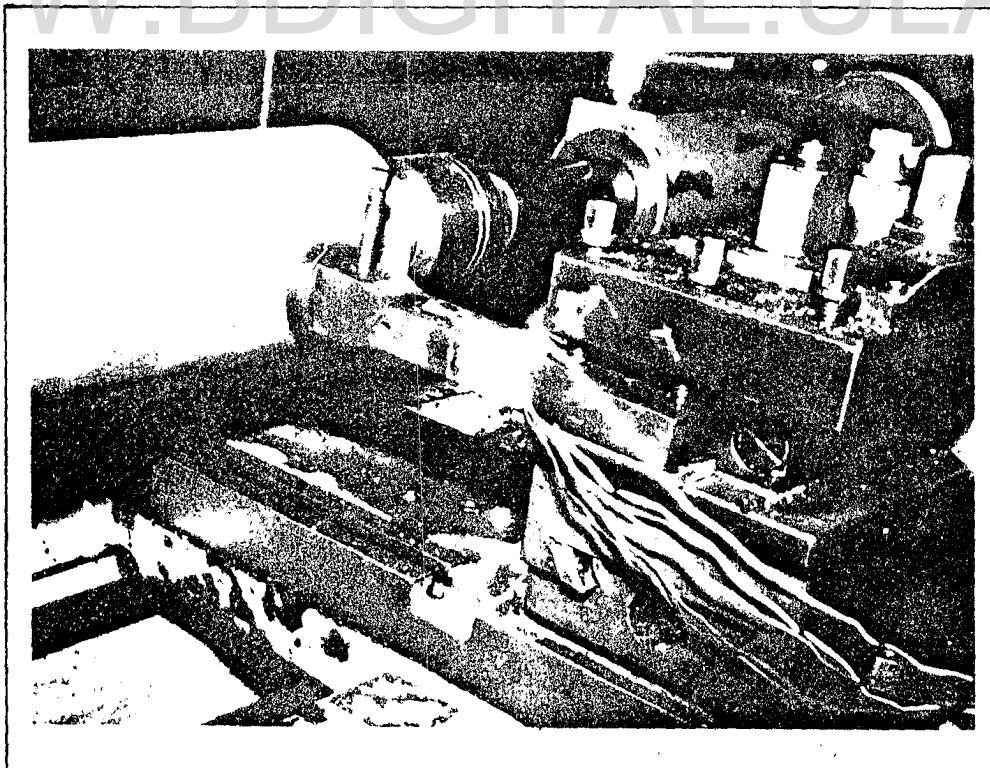


Fig. No. 7 Equipo empleado en el estudio de la fricción a velocidad elevada

Los extensómetros eléctricos correspondientes a la fuerza axial fueron conectados a un puente de Wheatstone manual marca VISHAY 1300 que registra deformaciones de hasta 1 μ pulg/pulg. Los otros dos extensómetros fueron conectados a un indicador de deformaciones marca VISHAY/ELLIS - 20. Este equipo consta de amplificador y de una unidad de lectura digital, la sensibilidad de sus lecturas es 1 micropulgada/pulgada.

En los ensayos primeramente se aplicó con el dinamómetro una presión sobre la madera, a través del movimiento del carro portacuchillas. Este movimiento se controló en las divisiones del tambor que produce el movimiento y también se registró la lectura proporcionada por el puente de Wheatstone. Seguidamente se calibró en cero el digital y se hizo girar a 170 rpm el cilindro de madera (velocidad de deslizamiento obtenida en la superficie: 4900 cm/min.).

Se tomaron rápidamente las lecturas en el digital para evitar alguna interferencia a causa de la elevación de la temperatura del dinamómetro. En cada cilindro se ejecutaron 3 ensayos de aproximadamente 5 a 8 segundos de duración cada uno.

Las lecturas de la deformación obtenidas en el puente de Wheatstone y en el digital fueron transformadas a fuerzas a través de las respectivas curvas de calibración.. Para esto se recurrió al empleo de un anillo detector de compresiones; se aplicaron con él diferentes niveles de carga en sentido normal (fuerza axial) y lateral -

(fuerza de fricción). En cada caso se registraron las diferentes deformaciones que permitieron trazar las curvas de calibración carga-deformación.

Resumen de los diferentes ensayos realizados en el presente trabajo se proporciona en la Tabla N° 4.

3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

El procesamiento de los datos obtenidos en el presente estudio se realizó en una computadora IBM 370-1355 (definición de memoria en 4 particiones: 2 particiones en 512 K, una en 256 K y una en 64 K), en el Centro de Computación de la Universidad de Los Andes, recurriéndose para ello al paquete de programas SAS.

Anexo a este trabajo se presenta un resumen de los principales programas utilizados.

Tabla Nº 4 Resumen de los ensayos y las variables consideradas en el presente estudio.

ENSAYOS	VARIABLES EN CONSIDERACION	NIVELES	Nº Probetas por especie	Nº Total Ensayos
PRINCIPALES:	ESPECIE	6 (de acuerdo al peso específico)		
a. Empleo de 1 probeta/8 Tratam.	SUPERFICIE DE ROCE Peso normal VELOCIDAD	2 (Rad. y Tang) 2 (500 y 2000 g) 2 (5 y 50 cm/min)	20	2.880
b. Empleo de 1 probeta/1 Tratam.	ESPECIE SUPERFICIE DE ROCE PESO NORMAL VELOCIDAD	1 (Carne asada) 2 (Rad. y Tang.) 2 (500 y 2000 g) 2 (5 y 50 cm/min)	160	480
ADICIONALES:	ESPECIE	1 (Aceite Cabimo)		
a. Efecto de los extractivos	TRATAM. DE EXTRACC. SUPERFICIE DE ROCE PESO NORMAL VELOCIDAD	2 (con y sin Trat) 3 (Rad. Tang., Trans) 2 (500 y 2000 g) 2 (5 y 50 cm/min)	12	432
b. Dirección de las fibras ó del grano.	ESPECIE DIREC. DEL GRANO SUPERFICIE DE ROCE PESO NORMAL VELOCIDAD	3 (según el Peb.) 2 (Pararel. y Perpend.) 2 (Rad. y tangen.) 2 (500 y 200 g) 2 (5 y 50 cm/min.)	2	144

Continuación

ENSAYOS	VARIABLE EN CONSIDERACION	NIVELES	Nº Probetas por especie	Nº Total Ensayos.
b. Desliz perpendicular a las estrias del acero.	ESPECIE	3 (según el Peb.)	2	144
	DIREC. DEL GRANO	2 (Par. y Perpend.)		
	SUPERFICIE DE ROCE	2 (Rad. y Tang.)		
	PESO NORMAL	2 (500 y 2000 g)		
	VELOCIDAD	2 (5 y 50 cm/min.)		
d. Deslizamiento a velocidad elevada (torno)	ESPECIE	5 (según el Peb.)	1	15
	DIRECCION DEL GRANO	1 (perpendicular)		
	SUPERFICIE DE ROCE	1 (entre Rad. y tangencial)		
	PESO NORMAL	3 (errático)		
	VELOCIDAD	1 (4900 cm/min)		

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 RUGOSIDAD DEL ACERO EN ESTUDIO

Los resultados obtenidos en las mediciones de la rugosidad superficial del acero, antes y después de los ensayos se encuentran detallados en la Tabla N° 5

Tabla N° 5. Valores de rugosidad superficial del acero en estudio.*

Especie (1)	Pista ** (2)	Rugosidad antes de ensay. (3)	Ra, μ pulg. después de ensay. (4)
Perhuétamo	1	410	390
Chupón rosado	2	410	370
Carne asada	3	410	400
Apamate	4	400	400
Saqui-saqui	5	420	410
Sun sun	6	420	410

* Valor promedio de 3 mediciones

** Pista de acero sobre la cual se ensayó la especie correspondiente a la columna (1)

En general, la rugosidad del acero medida transversalmente a la dirección de las estrias antes de los ensayos, fue homogénea en toda la superficie y estuvo comprendida entre $410 \pm 10 \mu\text{pulg. } R_a$. De acuerdo con la relación de transformación de unidades expuesta por Straneo y Consorti (60); $1 R_a = 40 \text{ RMS}$, la superficie metálica empleada en nuestro estudio tuvo una rugosidad de 10 a 10,5 RMS. Según las normas de la ISO (Organización Internacional para la Normalización) para especificar el acabado superficial, las mediciones realizadas corresponden a un acero de un acabado N10.

Lemoine y colaboradores (31) (44) (45) y McKenzie y Karpovich (41) también utilizaron un material de rugosidad parecida a la nuestra en sus experimentos: 9 y 13 RMS, respectivamente.

Algunas medidas de rugosidad realizadas en dirección paralela a las estrias del acero proporcionaron los valores $240 \pm 20 \mu\text{Pulg. } R_a$.

En cuanto a los valores encontrados después de los ensayos, se puede apreciar que en las dos primeras pistas (correspondientes a perhúetamo y Chupón rosado respectivamente), los valores fueron mínimos y se alejan del rango de variación de la rugosidad determinada inicialmente. Los demás valores prácticamente no resultaron alterados, respecto a los iniciales.

Como se discutirá más adelante, probablemente haya habido una influencia de la estructura anatómica de la madera en estos resultados especialmente en el caso del Chupón.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

4.2 RUGOSIDAD DE LA MADERA UTILIZADA

La Tabla Nº 6 proporciona los valores de la rugosidad medida en la superficie de roce de las seis maderas.

Los resultados indican que la rugosidad superficial de la madera antes de los ensayos fue menor que la del acero, a excepción del Perhuétamo que posee un valor de rugosidad similar al de la superficie del acero. Posiblemente la mayor rugosidad determinada en Perhuétamo se deba al grano mediano a grueso y a la textura entrecruzada de la madera.

No hay mucha diferencia entre los valores de la rugosidad de las superficies de las muestras de madera medidas antes y después de los ensayos.

Considerando que el radio de la punta del zafiro usado es de 2,5 micras y tomando en cuenta las acotaciones de Peters y Cumming (52), el aparato empleado en la determinación de la rugosidad de la madera tiene la suficiente sensibilidad como para detectar pequeñas irregularidades de la superficie; sin embargo sería de mucha utilidad encarar estudios tendientes a cuantificar, con la ayuda del microscopio electrónico, el daño superficial en la pared celular que probablemente pueda causar la punta del zafiro.

Tabla N° 6 Valores de la rugosidad superficial de la madera.*

<u>Especie</u>	<u>Cara</u>	<u>Rugosidad antes de ens.</u>	<u>Ra, μ Pulg. después de ens.</u>
Didymopanax morototoni	Radial	330	320
	Tangencial	340	340
Bombacopsis quinata	Radial	320	300
	Tangencial	300	300
Hieronyma laxiflora	Radial	380	340
	Tangencial	350	320
Tabebuia rosea	Radial	300	280
	Tangencial	300	280
Ponteria anibifolia	Radial	290	280
	Tangencial	280	280
monriri	Radial	400	380
barinensis	Tangencial	440	380

* Cada valor es el promedio de 3 lecturas realizadas en una muestra. Rango de variación \pm 30 μ Pulg.

4.3 ENSAYOS PRINCIPALES

De acuerdo con la Tabla N° 4 los ensayos principales se realizaron para evaluar el efecto de la superficie o plano de roce, velocidad de deslizamiento y carga normal; los demás ensayos (extractivos de la madera, dirección del grano, dirección de las estrias del acero y fricción a elevadas velocidades) se consideraron como a dicionales.

4.3.1 Resultados numéricos

La Tabla N° 7 muestra los valores del coeficiente de fricción (μ).

El contenido de humedad promedio de las probetas osciló entre 15,6 % (Saqui-saqui) y 17 % (Apamate); mientras que el rango promedio del peso específico básico estuvo entre 0,387 (Sun sun) y 0,793 (Perhuétamo).

En todas las especies se registró un ligero aumento del coeficiente de fricción con el incremento de la velocidad de deslizamiento y una disminución con el aumento de la carga aplicada.

Los ensayos realizados con el peso menor (500 g), registraron un promedio mínimo de 0,159 en chupón rosado para deslizamientos a 5 cm/min., en la cara radial. -

TABLA Nº 7 VALORES DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN DETERMINADOS EN LAS SEIS ESPECIES PARA DOS PESOS Y DOS VELOCIDADES DIFERENTES APLICADAS EN LAS CARAS RADIALES Y TANGENCIALES

a) SUN SUN*

No. de Arbol	No. de Probeta	C.H. %	Peso específico básico	500 gr. PESO APLICADO				2000 gr. PESO APLICADO			
				5 cm/min.		50 cm/min.		5 cm/min.		50 cm/min.	
				Rad. 1**	Tang. 2**	Rad. 3**	Tang. 4**	Rad. 5**	Tang. 6**	Rad. 7**	Tang. 8**
1	A	17,4	0,416	0,231	0,215	0,280	0,284	0,162	0,170	0,195	0,177
	B	16,8	0,402	0,174	0,168	0,189	0,189	0,186	0,176	0,147	0,153
2	A	17,8	0,360	0,263	0,280	0,271	0,299	0,204	0,204	0,204	0,225
	B	17,5	0,397	0,225	0,225	0,258	0,255	0,211	0,209	0,214	0,206
3	A	17,4	0,401	0,228	0,225	0,302	0,284	0,226	0,214	0,212	0,227
	B	16,9	0,406	0,190	0,231	0,231	0,228	0,177	0,174	0,187	0,180
4	A	18,4	0,402	0,176	0,176	0,226	0,225	0,169	0,185	0,196	0,189
	B	18,2	0,375	0,177	0,184	0,230	0,225	0,150	0,148	0,176	0,174
5	A	18,3	0,355	0,176	0,182	0,225	0,227	0,151	0,152	0,176	0,161
	B	17,9	0,353	0,170	0,170	0,194	0,180	0,165	0,138	0,167	0,172
6	A	16,9	0,386	0,160	0,165	0,176	0,167	0,125	0,130	0,156	0,156
	B	16,6	0,395	0,224	0,204	0,232	0,219	0,134	0,125	0,144	0,146
7	A	16,0	0,359	0,170	0,180	0,204	0,204	0,134	0,140	0,166	0,163
	B	15,8	0,350	0,185	0,175	0,204	0,208	0,126	0,127	0,141	0,142
8	A	16,2	0,427	0,189	0,184	0,200	0,207	0,145	0,143	0,165	0,161
	B	16,5	0,428	0,179	0,184	0,191	0,199	0,152	0,146	0,171	0,175
9	A	15,6	0,339	0,206	0,190	0,233	0,205	0,155	0,162	0,182	0,216
	B	15,9	0,352	0,171	0,178	0,260	0,240	0,160	0,136	0,187	0,171
10	A	16,3	0,416	0,199	0,189	0,218	0,205	0,140	0,135	0,161	0,157
	B	16,8	0,416	0,179	0,184	0,204	0,197	0,141	0,135	0,165	0,155
Promedio		17,0	0,387	0,193	0,194	0,226	0,222	0,161	0,157	0,176	0,175
Desv. típica		0,87	0,029	0,027	0,028	0,034	0,035	0,028	0,028	0,021	0,025

* Los valores del coeficiente de fricción son el promedio de 3 observaciones

** Número de tratamiento

b) SAQUI – SAQUI*

No. de Arbol	No. de Probeta	C.H. %	Peso específico básico	500 gr. PESO APLICADO				2000 gr. PESO APLICADO			
				Vel. 5 cm/min		Vel. 50 cm/min		Vel. 5 cm/min		Vel. 50 cm/min	
				Rad. 1**	Tang. 2**	Rad. 3**	Tang. 4**	Rad. 5**	Tang. 6**	Rad. 7**	Tang. 8**
1	A	15,8	0,411	0,234	0,181	0,242	0,194	0,141	0,138	0,151	0,153
	B	15,4	0,413	0,179	0,174	0,219	0,209	0,144	0,134	0,166	0,155
2	A	15,6	0,471	0,197	0,199	0,196	0,202	0,144	0,136	0,159	0,157
	B	14,7	0,478	0,217	0,213	0,233	0,241	0,141	0,140	0,155	0,154
3	A	15,8	0,412	0,172	0,165	0,204	0,194	0,131	0,135	0,153	0,143
	B	15,5	0,398	0,169	0,167	0,190	0,187	0,134	0,129	0,148	0,148
4	A	15,8	0,370	0,146	0,166	0,182	0,177	0,126	0,124	0,153	0,147
	B	16,3	0,364	0,180	0,175	0,199	0,195	0,120	0,122	0,149	0,153
5	A	16,5	0,356	0,145	0,136	0,176	0,176	0,127	0,126	0,162	0,162
	B	16,6	0,353	0,221	0,224	0,260	0,244	0,122	0,129	0,144	0,143
6	A	15,9	0,359	0,152	0,152	0,178	0,177	0,143	0,140	0,175	0,175
	B	15,7	0,360	0,206	0,209	0,234	0,229	0,147	0,154	0,167	0,165
7	A	15,1	0,377	0,181	0,181	0,224	0,224	0,144	0,141	0,160	0,164
	B	16,5	0,372	0,208	0,190	0,219	0,214	0,129	0,125	0,150	0,147
8	A	14,9	0,433	0,165	0,165	0,194	0,184	0,135	0,137	0,157	0,153
	B	14,7	0,428	0,134	0,132	0,155	0,153	0,145	0,135	0,165	0,155
9	A	15,1	0,419	0,165	0,170	0,179	0,184	0,131	0,133	0,156	0,160
	B	15,4	0,422	0,165	0,161	0,191	0,179	0,131	0,132	0,157	0,152
10	A	15,4	0,491	0,164	0,164	0,199	0,199	0,140	0,136	0,160	0,161
	B	15,2	0,489	0,184	0,174	0,204	0,197	0,141	0,136	0,160	0,163
Promedio		15,6	0,409	0,179	0,175	0,204	0,198	0,136	0,134	0,157	0,156
Desv. típica		0,57	0,046	0,027	0,023	0,026	0,023	0,008	0,007	0,007	0,008

* Los valores del coeficiente de fricción son el promedio de 3 observaciones

** Número de tratamiento

c) APAMATE*

No. de Arbol	No. de Probeta	C.H. %	Peso específico básico	500 gr. PESO APLICADO				2000 gr. PESO APLICADO			
				Vel. 5 cm/min		Vel. 50 cm/min		Vel. 5 cm/min		Vel. 50 cm/min	
				Rad. 1**	Tang. 2**	Rad. 3**	Tang. 4**	Rad. 5**	Tang. 6**	Rad. 7**	Tang. 8**
1	A	17,7	0,574	0,167	0,169	0,171	0,175	0,148	0,152	0,159	0,156
	B	18,4	0,548	0,173	0,175	0,203	0,194	0,158	0,152	0,172	0,156
2	A	17,7	0,518	0,159	0,159	0,175	0,177	0,145	0,149	0,164	0,171
	B	17,2	0,515	0,175	0,159	0,164	0,174	0,139	0,148	0,159	0,178
3	A	16,5	0,500	0,169	0,189	0,193	0,208	0,143	0,144	0,180	0,173
	B	16,2	0,520	0,174	0,174	0,208	0,213	0,159	0,137	0,171	0,171
4	A	17,5	0,471	0,169	0,164	0,189	0,179	0,145	0,141	0,165	0,163
	B	18,0	0,483	0,189	0,189	0,210	0,207	0,144	0,150	0,161	0,163
5	A	18,3	0,571	0,204	0,187	0,226	0,213	0,124	0,127	0,157	0,157
	B	18,6	0,573	0,213	0,222	0,196	0,213	0,124	0,127	0,154	0,147
6	A	18,2	0,533	0,164	0,178	0,174	0,183	0,120	0,125	0,144	0,147
	B	17,7	0,529	0,169	0,223	0,200	0,221	0,131	0,157	0,151	0,157
7	A	18,8	0,563	0,165	0,222	0,203	0,186	0,120	0,120	0,156	0,147
	B	18,7	0,562	0,192	0,169	0,183	0,183	0,160	0,155	0,174	0,163
8	A	15,7	0,495	0,198	0,223	0,192	0,213	0,145	0,139	0,157	0,161
	B	15,5	0,513	0,174	0,164	0,164	0,171	0,150	0,136	0,170	0,177
9	A	17,0	0,519	0,184	0,174	0,197	0,184	0,125	0,147	0,151	0,152
	B	17,6	0,531	0,152	0,159	0,174	0,179	0,130	0,140	0,161	0,156
10	A	18,1	0,522	0,154	0,179	0,183	0,188	0,144	0,141	0,174	0,176
	B	18,5	0,536	0,172	0,166	0,167	0,179	0,121	0,137	0,153	0,152
Promedio		17,6	0,529	0,176	0,182	0,189	0,192	0,139	0,141	0,162	0,161
Desv. típica		0,98	0,030	0,016	0,023	0,017	0,016	0,013	0,011	0,009	0,010

* Los valores del coeficiente de fricción son el promedio de tres (3) observaciones

** Número de tratamiento

d) CARNE ASADA*

No. de Repección	No. de Probeta	C.H. %	Peso específico básico	500 gr. PESO APLICADO				2000 gr. PESO APLICADO			
				Vel. 5 cm/min		Vel. 50 cm/min		Vel. 5 cm/min		Vel. 50 cm/min	
				Rad. 1**	Tang. 2**	Rad. 3**	Tang. 4**	Rad. 5**	Tang. 6**	Rad. 7**	Tang. 8**
1	A	16,9	0,558	0,178	0,203	0,234	0,239	0,150	0,142	0,156	0,187
	B	17,1	0,512	0,193	0,179	0,219	0,218	0,142	0,170	0,182	0,219
2	A	16,7	0,471	0,176	0,199	0,225	0,230	0,136	0,214	0,185	0,206
	B	16,9	0,495	0,198	0,189	0,225	0,225	0,129	0,137	0,159	0,180
3	A	16,5	0,584	0,154	0,146	0,198	0,189	0,131	0,147	0,171	0,163
	B	16,2	0,586	0,150	0,149	0,237	0,193	0,125	0,131	0,148	0,151
4	A	16,3	0,563	0,159	0,173	0,212	0,206	0,132	0,130	0,157	0,145
	B	16,7	0,542	0,173	0,159	0,183	0,183	0,135	0,132	0,161	0,157
5	A	17,2	0,510	0,142	0,154	0,183	0,178	0,141	0,143	0,160	0,159
	B	16,9	0,506	0,149	0,145	0,187	0,187	0,129	0,130	0,166	0,154
6	A	17,0	0,581	0,144	0,154	0,178	0,206	0,128	0,132	0,147	0,138
	B	16,6	0,554	0,196	0,206	0,200	0,217	0,134	0,130	0,150	0,150
7	A	16,7	0,503	0,149	0,151	0,180	0,174	0,131	0,139	0,150	0,152
	B	16,4	0,518	0,149	0,154	0,179	0,172	0,132	0,135	0,185	0,228
8	A	16,8	0,603	0,141	0,144	0,174	0,188	0,132	0,149	0,182	0,147
	B	16,8	0,597	0,155	0,145	0,175	0,170	0,194	0,141	0,185	0,145
9	A	17,1	0,492	0,145	0,154	0,179	0,189	0,137	0,157	0,180	0,160
	B	17,2	0,476	0,171	0,154	0,197	0,189	0,130	0,128	0,159	0,157
10	A	17,5	0,445	0,165	0,155	0,176	0,165	0,140	0,132	0,165	0,157
	B	16,7	0,447	0,160	0,168	0,184	0,200	0,132	0,132	0,167	0,164
Promedio		16,8	0,527	0,162	0,164	0,196	0,196	0,137	0,143	0,166	0,166
Desv. típica		0,32	0,049	0,018	0,020	0,021	0,021	0,015	0,020	0,013	0,025

* Los valores del coeficiente de fricción son el promedio de tres (3) observaciones

** Número de tratamiento

e) CHUPON ROSADO*

No de Arbol	No de Probeta	C.H. %	Peso específico básico	500 gr. PESO APLICADO				2000 gr. PESO APLICADO			
				Vel. 5 cm/min		Vel. 50 cm/min		Vel. 5 cm/min		Vel. 50 cm/min	
				Rad. 1**	Tang. 2**	Rad. 3**	Tang. 4**	Rad. 5**	Tang. 6**	Rad. 7**	Tang. 8**
1	A	16,3	0,704	0,177	0,190	0,184	0,181	0,149	0,145	0,177	0,178
	B	16,2	0,709	0,172	0,171	0,184	0,174	0,142	0,147	0,177	0,185
2	A	16,8	0,683	0,173	0,171	0,179	0,174	0,147	0,153	0,173	0,174
	B	16,7	0,683	0,169	0,163	0,176	0,177	0,150	0,150	0,177	0,172
3	A	17,8	0,649	0,163	0,163	0,178	0,176	0,151	0,149	0,158	0,150
	B	17,8	0,651	0,163	0,165	0,176	0,170	0,154	0,176	0,183	0,174
4	A	17,5	0,706	0,155	0,164	0,179	0,187	0,171	0,172	0,174	0,183
	B	17,9	0,708	0,159	0,167	0,182	0,177	0,154	0,157	0,187	0,188
5	A	16,2	0,683	0,159	0,158	0,192	0,187	0,153	0,145	0,169	0,158
	B	16,4	0,774	0,158	0,163	0,186	0,184	0,145	0,157	0,169	0,177
6	A	15,9	0,660	0,158	0,153	0,173	0,178	0,158	0,153	0,164	0,169
	B	15,8	0,661	0,150	0,150	0,169	0,173	0,147	0,147	0,171	0,169
7	A	17,3	0,682	0,151	0,150	0,171	0,177	0,151	0,159	0,179	0,192
	B	17,2	0,712	0,150	0,153	0,172	0,169	0,153	0,151	0,177	0,174
8	A	16,9	0,662	0,153	0,169	0,173	0,173	0,152	0,156	0,173	0,172
	B	17,2	0,659	0,148	0,150	0,173	0,178	0,151	0,152	0,176	0,173
9	A	17,9	0,712	0,151	0,158	0,172	0,172	0,146	0,153	0,174	0,173
	B	17,1	0,701	0,153	0,158	0,176	0,177	0,154	0,150	0,176	0,175
10	A	16,8	0,651	0,160	0,162	0,188	0,188	0,153	0,154	0,174	0,179
	B	17,2	0,677	0,160	0,160	0,186	0,187	0,149	0,151	0,173	0,171
Promedio		16,9	0,686	0,159	0,162	0,178	0,178	0,152	0,154	0,174	0,174
Desv. típica		0,66	0,030	0,008	0,009	0,006	0,006	0,006	0,008	0,006	0,009

* Los valores del coeficiente de fricción son el promedio de tres (3) observaciones

** Número de tratamiento

f) PERHUETAMO

No de Arbol	No de Probeta	C.H. %	Peso específico básico	500 gr. PESO APLICADO				2000 gr. PESO APLICADO			
				5 cm/min.		50 cm/min		5 cm/min.		50 cm/min	
				Rad. 1**	Tang. 2**	Rad. 3**	Tang. 4**	Rad. 5**	Tang. 6**	Rad. 7**	Tang. 8**
1	A	16,6	0,835	0,173	0,172	0,181	0,183	0,151	0,151	0,165	0,168
	B	17,4	0,827	0,172	0,175	0,185	0,185	0,152	0,156	0,165	0,161
2	A	18,0	0,821	0,172	0,175	0,220	0,219	0,144	0,154	0,163	0,179
	B	17,8	0,823	0,173	0,172	0,193	0,191	0,152	0,160	0,167	0,176
3	A	17,5	0,817	0,162	0,162	0,195	0,193	0,169	0,169	0,173	0,172
	B	17,6	0,807	0,159	0,154	0,175	0,177	0,167	0,179	0,186	0,192
4	A	18,3	0,830	0,156	0,154	0,188	0,175	0,173	0,175	0,178	0,195
	B	18,0	0,795	0,164	0,153	0,172	0,174	0,169	0,158	0,174	0,175
5	A	18,2	0,770	0,167	0,164	0,171	0,167	0,174	0,173	0,176	0,179
	B	18,5	0,795	0,166	0,162	0,191	0,183	0,171	0,181	0,183	0,191
6	A	16,5	0,722	0,182	0,185	0,203	0,202	0,176	0,192	0,180	0,196
	B	16,7	0,725	0,177	0,192	0,200	0,202	0,176	0,184	0,181	0,196
7	A	17,7	0,707	0,181	0,197	0,197	0,205	0,167	0,164	0,178	0,198
	B	18,3	0,710	0,187	0,198	0,199	0,197	0,169	0,177	0,183	0,194
8	A	17,4	0,767	0,180	0,182	0,190	0,197	0,169	0,172	0,190	0,192
	B	17,2	0,792	0,174	0,174	0,193	0,192	0,164	0,167	0,181	0,178
9	A	16,9	0,870	0,164	0,167	0,180	0,177	0,171	0,177	0,185	0,186
	B	16,9	0,871	0,159	0,165	0,176	0,176	0,171	0,169	0,185	0,182
10	A	17,4	0,787	0,179	0,183	0,182	0,190	0,176	0,177	0,178	0,191
	B	17,7	0,780	0,179	0,177	0,190	0,195	0,167	0,165	0,194	0,190
Promedio		17,5	0,793	0,171	0,173	0,189	0,189	0,166	0,170	0,178	0,185
Desv. Típica		0,59	0,048	0,009	0,013	0,012	0,013	0,009	0,011	0,008	0,011

* Los valores del coeficiente de fricción son el promedio de tres (3) observaciones

** Número de tratamiento

En tanto que el valor promedio máximo (0,226) se encontró en la cara radial de las muestras de *Sun sun* ensayadas a 50 cm/min.

Los ensayos correspondientes al peso 2000 g arrojaron un valor promedio mínimo de 0,134 para el coeficiente de fricción de la madera de Saqui-saqui (cara tangencial), deslizada a 5 cm/min. El valor promedio máximo (0,185) se encontró en las caras tangenciales de Perhuétamo ensayadas a una velocidad de 50 cm/min. La Figura N° 8 muestra la variación de los valores promedios de en las seis especies.

Las determinaciones del coeficiente de fricción realizadas, están dentro del rango de los valores encontrados por Lemoine, McMillin y Manwiller (31), por Knudson y Schniewind (25) y por McKenzie y Karpovich (41).

Lemoine y Colaboradores obtuvieron para μ el rango de valores: 0,166 (cara tangencial) y 0,218 (cara radial) en madera de *Pinus glabra* al 18,3% de contenido de humedad. Knudson y Schniewind determinaron para μ el valor promedio 0,240 (cara tangencial) en *Pseudotsuga menziesii* seca al horno. Por su parte, McKenzie y Karpovich encontraron un rango de μ entre 0,10 (*Eucalyptus microcorys*) y 0,21 (*Picea glauca*) ensayando a velocidades de 1,2 a 3 cm/min. La madera tenía un contenido de humedad entre 10 y 14 %. Ver Figuras en anexos.

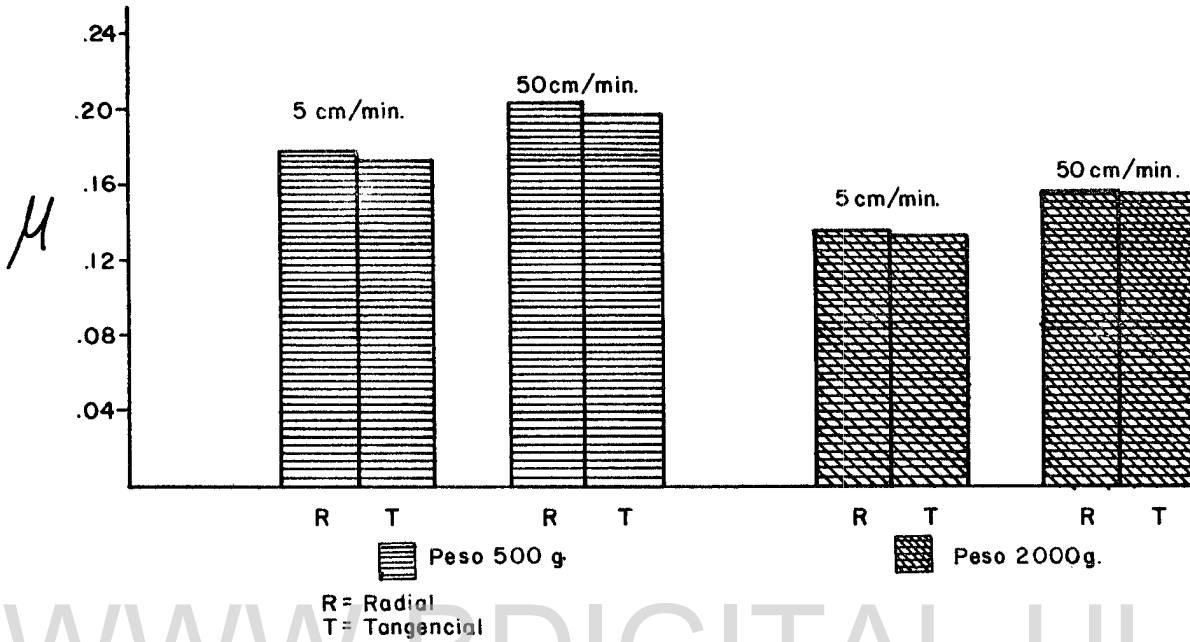
La Tabla N° 8 detalla los valores del intervalo porcentual ($\pm P$) del promedio de μ en cada uno de los 8 tratamientos aplicados en las seis especies. De acuerdo a la

Licencia Creative Commons:

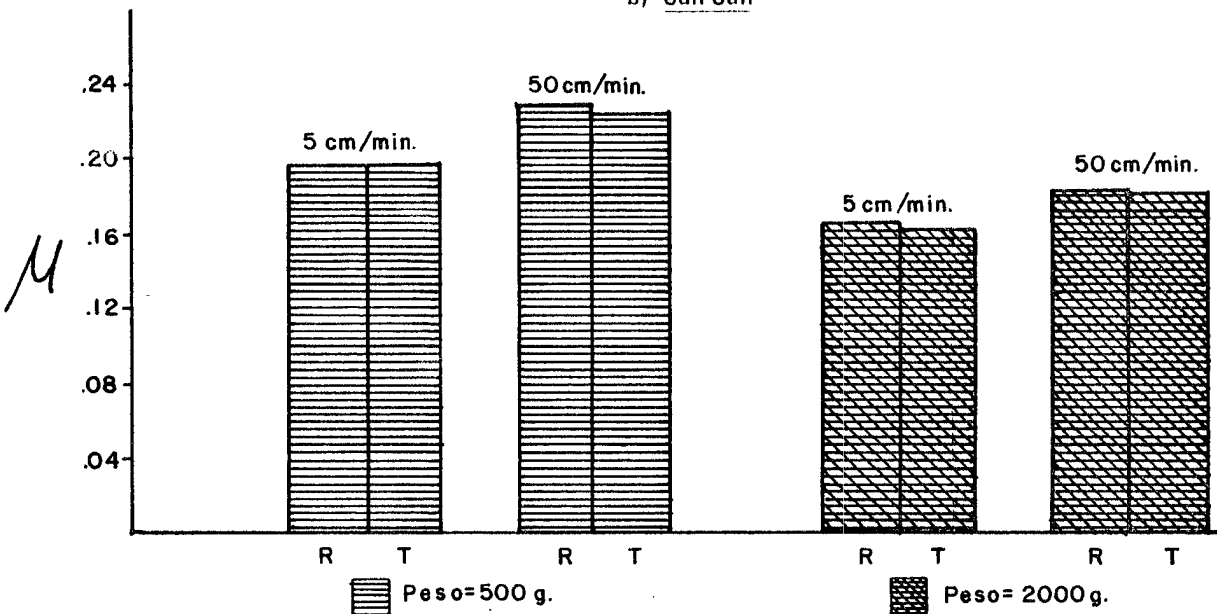
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

FIG. NO. 8 VALORES PROMEDIO DEL COEFICIENTE DE FRICCION (μ) SEGUN LAS DIFERENTES COMBINACIONES DE PLANO DE ROCE, PESO Y VELOCIDADES ESTUDIADAS

a) Saquisaqui



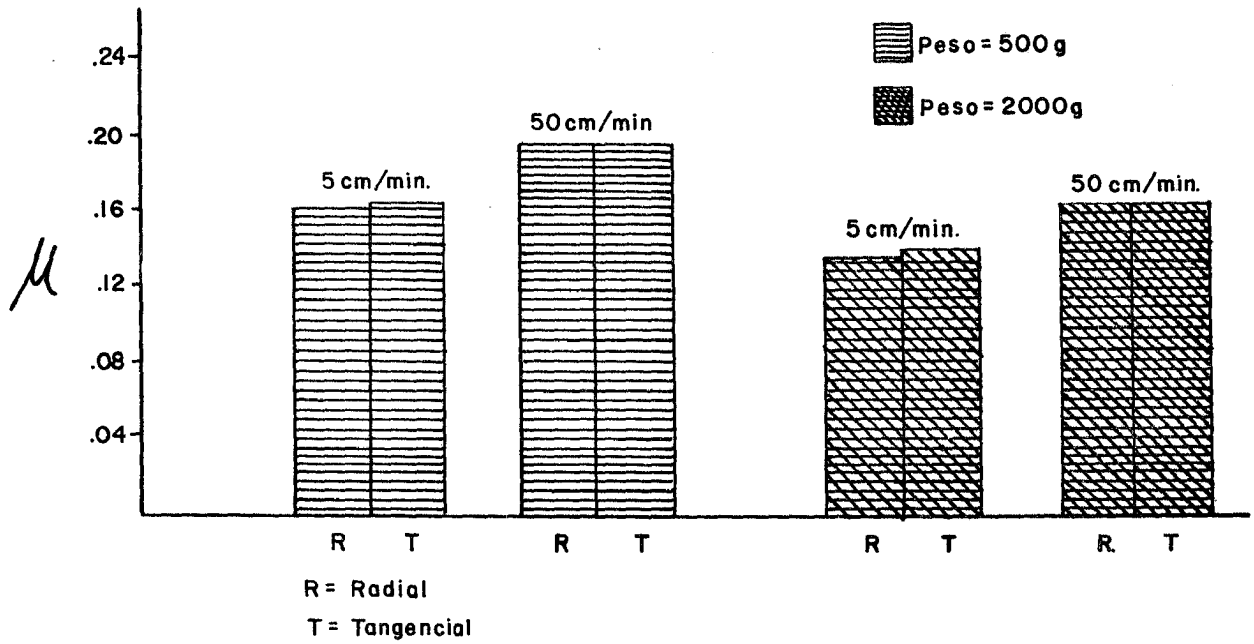
b) Sun Sun



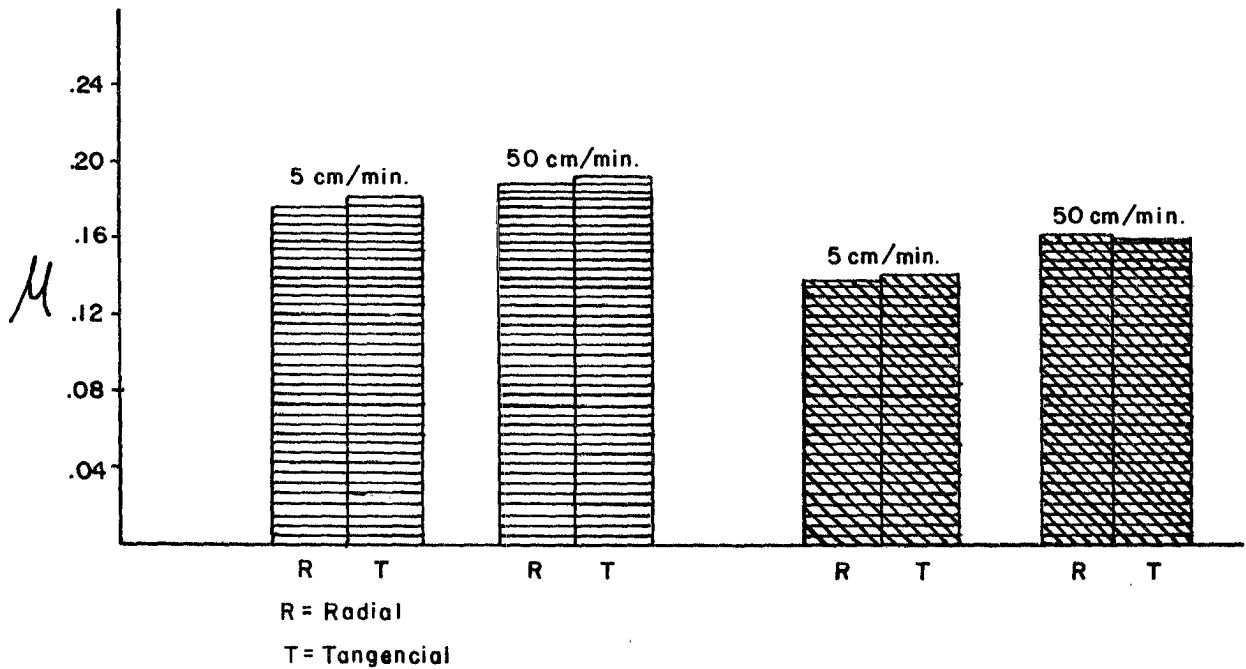
Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

c) Carne Asada

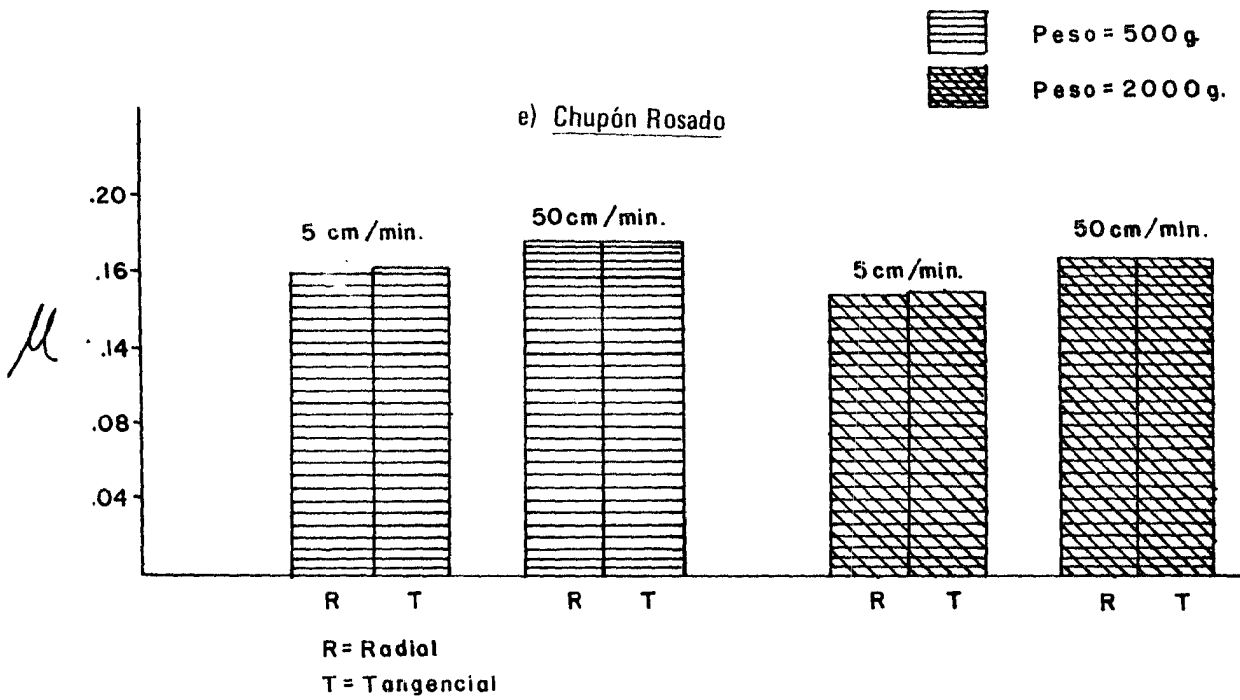


d) Apamate

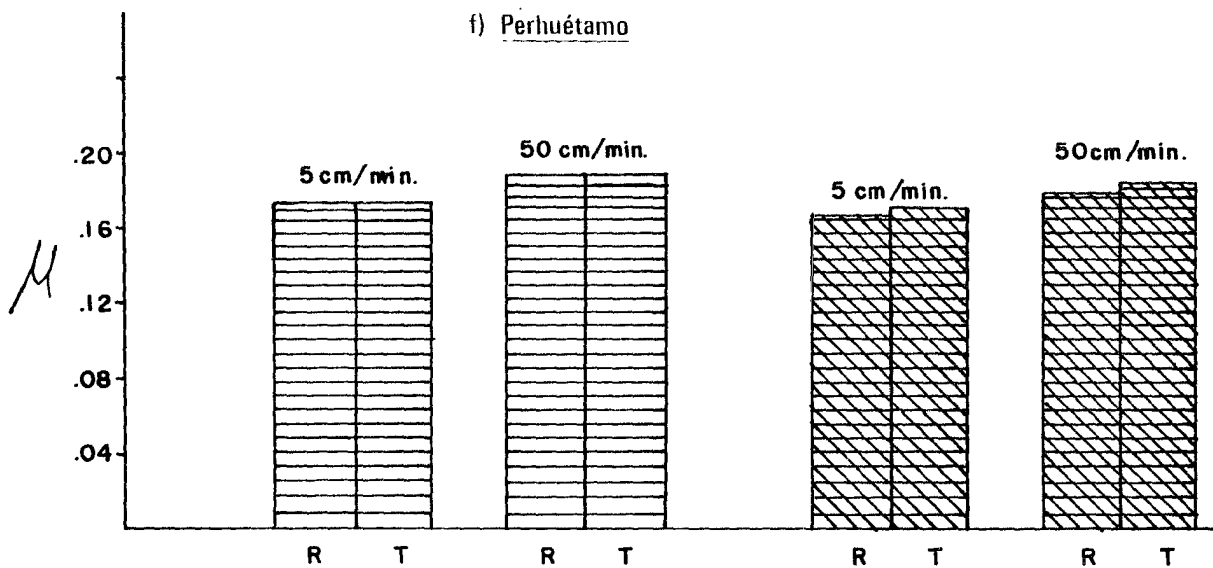


Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



WWW.BDIGITAL.ULA.VE



terminología empleada por Hoheisel (19) ese rango de confianza está expresado por la fórmula:

$$\pm P = t_{(k-1)} \cdot \frac{100}{\bar{\mu}} \sqrt{\frac{S_1^2}{N}}$$

Tabla N° 8. Resultados del intervalo porcentual de confianza del promedio total $\pm P$ para los diferentes tratamientos en estudio.

ESPECIE	T R A T A M I E N T O							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Didymopanax Morototoni	7,8	9,3	8,2	8,7	12,0	12,1	7,8	9,1
Bombacopsis quinata.	7,5	6,2	6,2	6,0	4,1	3,5	3,0	9,2
Hieronyma laxiflora	6,6	7,9	7,1	7,2	5,4	7,0	4,0	9,1
Tabebuia rosea	5,5	6,1	4,8	4,7	5,5	3,6	3,3	3,8
Pouteria anibifolia	3,7	3,7	3,0	6,3	3,0	3,0	3,0	3,1
Mouriri barinensis	3,6	5,3	3,7	4,4	4,0	4,1	9,2	10,7

siendo:

$t_{(k-1)}$: valor de la distribución de "student" para (k-1) grados de libertad y el 95% de probabilidad.

k: número de árboles ensayados

$\bar{\mu}$: media total de cada tratamiento

S_1^2 : varianza entre árboles

N : número de ensayos

Como se puede ver en los resultados obtenidos, la suposición del valor 10% para $\pm P$ en la determinación del número de replicaciones, se cumplió casi en la totalidad de los tratamientos. Tan sólo se obtuvo una ligera superioridad en las caras radiales y tangenciales de Sun Sun ensayadas a una velocidad de 5 cm/min. bajo un peso de 2000 g. (tratamientos 5 y 6). Las probetas tangenciales de Perhuétamo deslizadas a 50 cm/min. con un peso de 2000 g, también proporcionaron un valor de $\pm P$ levemente superior.

4.3.2 Análisis estadístico

El análisis de varianza aplicado a los datos de la Tabla N° 7 permitió diferenciar el efecto particular en

cada especie, tanto de las variables en estudio como de las correspondientes interacciones (Tabla N° 9).

En este análisis se tomó en consideración 7 conjuntos de hipótesis:

1. Prueba del efecto del tratamiento A (plano o cara de roce).

$$H_0: \alpha_i = 0; \quad i = 1, 2$$

$$H_1: \alpha_i \neq 0 \quad \text{para alguna } i$$

2. Prueba del efecto del tratamiento B (velocidad de deslizamiento).

$$H_0: \beta_j = 0; \quad j = 1, 2$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \quad \text{para alguna } j$$

3. Prueba del efecto del tratamiento C (peso aplicado)

$$H_0: \gamma_k = 0; \quad k = 1, 2$$

$$H_1: \gamma_k \neq 0 \quad \text{para alguna } k$$

4. Prueba del efecto de la interacción entre los factores A y B.

$$H_0: (\alpha \beta)_{ij} = P; \quad i = 1, 2$$

$$j = 1, 2$$

$$H_1: (\alpha \beta)_{ij} \neq 0 \quad \text{para algunas } i \text{ y } j$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

5. Prueba del efecto de la interacción entre los factores A y C.

$$H_0: (\alpha \gamma)_{ik} = 0; \quad i = 1, 2$$

$$k = 1, 2$$

$$H_1: (\alpha \gamma)_{ik} \neq 0 \text{ para algunas } i \text{ y } k$$

6. Prueba del efecto de la interacción entre los factores B y C.

$$H_0: (\beta \gamma)_{jk} = 0; \quad j = 1, 2$$

$$k = 1, 2$$

$$H_1: (\beta \gamma)_{jk} \neq 0 \text{ para algunas } j \text{ y } k$$

7. Prueba del efecto de la interacción entre los factores A, B y C.

$$H_0: (\alpha \beta \gamma)_{ijk} = 0; \quad i = 1, 2$$

$$j = 1, 2$$

$$k = 1, 2$$

$$H_1: (\alpha \beta \gamma)_{ijk} \neq 0 \text{ para algunas } i, j \text{ y } k$$

La Tabla N° 9 muestra los resultados obtenidos en el análisis. En ninguna de las seis especies se obtuvo diferencia significativa (al nivel del 1%) en el efecto del factor A (plano de roce) ni en la interacción de este factor con la velocidad de deslizamiento.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tabla N° 9. Resultados del análisis de varianza para valores de μ de las seis especies.

a) Sun Sun (*Didymopanax morototoni*)

<u>Fuente de Variación</u>	<u>Grados de libertad</u>	<u>Suma de Cuadrados</u>	<u>F Calculado</u>
A	1	0,000104	0,13
B	1	0,070183	85,67 **
C	1	0,021973	26,82 **
AxB	1	0,000001	0,00
AxC	1	0,000013	0,02
BxC	1	0,001981	2,42
AxBxC	1	0,000162	0,20
Error	152	0,124521	
Total	159	0,218937	

** significativo al nivel del 1%

A - plano o superficie de roce; B - velocidad de deslizamiento;
C - carga o peso aplicado

b) Saqui-saqui (*Bombacopsis quinata*)

<u>Fuente de Variación</u>	<u>Grados de libertad</u>	<u>Suma de cuadrados</u>	<u>F calculado</u>
A	1	0,000476	1,33
B	1	0,074996	209,53 **
C	1	0,018998	53,08 **
AxB	1	0,000112	0,31
AxC	1	0,000144	0,40
BxC	1	0,000000	0,00
AxBxC	1	0,000218	0,51
Error	152	0,054405	
Total	159	0,148422	

c) Apamate (Tabebuia rosea)

<u>Fuente de Variación</u>	<u>Grados de libertad</u>	<u>Suma de cuadrados</u>	<u>F Calculado</u>
A	1	0,000336	1,48
B	1	0,046240	202,88 **
C	1	0,0107256	47,06 **
AxB	1	0,000156	0,68
AxC	1	0,000084	0,37
BxC	1	0,001040	4,56 *
AxBxC	1	0,000000	0,00
Error	152	0,034643	
Total	159	0,093226	

** significativo al nivel del 1%

* significativo al nivel del 5 %

A -- plano o superficie de roce; B - velocidad de deslizamiento;

C - carga o peso aplicado

d) Carne asada (Hieronyma laxiflora)

<u>Fuente de Variación</u>	<u>Grados de Libertad</u>	<u>Suma de cuadrados</u>	<u>F Calculado</u>
A	1	0,000124	0,32
B	1	0,028756	74,95 **
C	1	0,034722	90,50 **
AxB	1	0,000047	0,12
AxC	1	0,000135	0,35
BxC	1	0,000466	1,21
AxBxC	1	0,000026	0,07
Error	152	0,058318	
Total	159	0,122594	

e) Chupón rosado (*Pouteria anibifolia*)

<u>Fuente de Variación</u>	<u>Grados de libertad.</u>	<u>Suma de Cuadrados</u>	<u>F Calculado</u>
A	1	0,000060	1,04
B	1	0,001404	24,43**
C	1	0,015366	267,36**
AxB	1	0,000000	0,00
AxC	1	0,000073	1,27
BxC	1	0,000144	2,51
AxBxC	1	0,000004	0,06
Error	152	0,008736	
Total	159	0,025788	

** Significativo al nivel del 1%

A - plano o superficie de roce; B - velocidad de deslizamiento; C-carga o peso aplicado.

f) Perhuétamo (*Mouriri barinensis*)

<u>Fuente de variación</u>	<u>Grados de libertad</u>	<u>Suma de cuadrados</u>	<u>F Calculado</u>
A	1	0,000316	2,71
B	1	0,001305	11,20**
C	1	0,009136	78,37**
AxB	1	0,000183	1,57
AxC	1	0,000004	0,03
BxC	1	0,000146	1,26
AxBxC	1	0,000043	0,37
Error	152	0,017718	
Total	159	0,028852	

En cinco especies (excepción de Apamate) tampoco se detectó diferencia significativa para la interacción entre las variables velocidad de deslizamiento y peso. El efecto de la interacción conjunta de las tres variables (cara, peso, velocidad) no fue significativo.

Se encontraron diferencias altamente significativas debidas a los factores velocidad de deslizamiento y peso normal aplicado.

De acuerdo a estos resultados se acepta H_0 en los conjuntos de hipótesis: 1 - 4-5 y 7. Se rechaza en los conjuntos: 2 - 3 y 6. El conjunto 6 fue rechazado - tan sólo en muestras de Apamate con un nivel de significación del 5%.

Por otra parte, los resultados de las pruebas realizadas en Carne asada tomando una probeta por cada ensayo para demostrar la validez del análisis numérico anteriormente detallado en metodología y del empleo de 1 probeta para 8 tratamientos (Ver Tabla N° 10) también fueron evaluados con el esquema de análisis estadístico anterior. Como se puede ver en la Tabla N° 11, el análisis de varianza proporciona resultados similares a los de la Tabla N° 9 d; tan sólo hay diferencia en la variación entre las observaciones de cada tratamiento (o combinación de niveles a_i b_j c_k) posiblemente - causadas por la variación dentro de cada árbol.

TABLA Nº 10 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN CARNE ASADA EMPLEANDO 1 PROBETA POR CADA TRATAMIENTO (METODOLOGIA ALTERNA)*

No. de Arbol	No. de Probeta	500 gr. PESO APLICADO				2000 gr. PESO APLICADO			
		Vel. 5 cm/min		Vel. 50 cm/min		Vel. 5 cm/min		Vel. 50 cm/min	
		Rad. 1**	Tang. 2**	Rad. 3**	Tang. 4**	Rad. 5**	Tang. 6**	Rad. 7**	Tang. 8**
1	A	0,180	0,198	0,222	0,237	0,140	0,139	0,174	0,172
	B	0,198	0,182	0,219	0,208	0,145	0,148	0,186	0,208
2	A	0,193	0,191	0,228	0,218	0,137	0,140	0,162	0,182
	B	0,178	0,180	0,218	0,213	0,143	0,146	0,212	0,224
3	A	0,173	0,173	0,197	0,207	0,123	0,126	0,157	0,154
	B	0,173	0,178	0,198	0,201	0,125	0,123	0,150	0,152
4	A	0,164	0,169	0,200	0,208	0,127	0,133	0,168	0,165
	B	0,169	0,169	0,188	0,191	0,129	0,131	0,169	0,177
5	A	0,156	0,157	0,188	0,181	0,134	0,140	0,156	0,160
	B	0,154	0,152	0,177	0,176	0,130	0,128	0,163	0,153
6	A	0,147	0,142	0,174	0,178	0,130	0,136	0,150	0,164
	B	0,139	0,154	0,181	0,188	0,129	0,138	0,155	0,157
7	A	0,154	0,154	0,177	0,179	0,131	0,134	0,155	0,162
	B	0,152	0,156	0,179	0,188	0,129	0,135	0,165	0,160
8	A	0,144	0,149	0,183	0,178	0,136	0,144	0,156	0,179
	B	0,149	0,144	0,173	0,181	0,127	0,138	0,173	0,244
9	A	0,169	0,172	0,214	0,219	0,141	0,142	0,159	0,175
	B	0,162	0,158	0,205	0,208	0,131	0,133	0,160	0,162
10	A	0,164	0,157	0,214	0,211	0,134	0,135	0,165	0,163
	B	0,166	0,172	0,218	0,216	0,137	0,142	0,167	0,163
Promedio		0,164	0,165	0,198	0,199	0,133	0,137	0,165	0,174
Desv. Típica		0,016	0,015	0,018	0,018	0,006	0,007	0,014	0,024

* Cada valor es el promedio de 3 observaciones realizadas en una probeta diferente

** Número de tratamiento

Tabla N° 11. Análisis de varianza para datos de correspondientes a Carne asada (Metodología alterna)

<u>fuentes de Variación</u>	<u>Grados de libertad</u>	<u>Suma de cuadrados</u>	<u>F Calculado</u>
A	1	0,000258	1,16
B	1	0,037915	171,42 **
C	1	0,043461	196,49 **
AxB	1	0,000052	0,23
AxC	1	0,000001	0,00
BxC	1	0,000022	0,10
AxBxC	1	0,000001	0,00
Error	152	0,033620	
Total	159	0,115328	

** significativo al nivel del 1%

A - plano o superficie de roce; B - velocidad de deslizamiento; C - carga o peso aplicado

Tabla N° 12. Resultados de ensayos comparativos de μ realizados en Saqui-saqui empleando dos metodologías diferentes *

N° de Rep.	Peso=500 g				Peso=2000 g			
	v = 5 cm/min		v=50 cm/min		v=5 cm/min		v=50 cm/min	
	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ensayos con 1 probeta/8 tratamientos								
1	0,190	0,200	0,214	0,214	0,153	0,157	0,172	0,171
2	0,219	0,221	0,232	0,232	0,157	0,145	0,160	0,165
3	0,204	0,204	0,222	0,219	0,151	0,145	0,165	0,161
$\bar{\mu}$	0,204	0,208	0,223	0,222	0,154	0,149	0,166	0,166
Ensayos con 1 probeta/ 1 tratamiento								
1	0,195	0,199	0,217	0,216	0,148	0,157	0,172	0,170
2	0,208	0,219	0,229	0,229	0,151	0,147	0,175	0,164
3	0,196	0,207	0,217	0,219	0,149	0,157	0,168	0,165
$\bar{\mu}$	0,200	0,208	0,221	0,221	0,150	0,154	0,172	0,166

* cada valor es el promedio de dos observaciones

v = velocidad de deslizamiento

A pesar de las limitaciones del número de ensayos realizados en Saqui-saqui (Tabla Nº 12), los resultados obtenidos por las dos metodologías son parecidos.

De acuerdo a esto, el cálculo numérico descrito anteriormente, en la metodología resultó verificado en los ensayos realizados. Aunque éste tipo de análisis se completó solamente en una especie, es de esperar un resultado similar para las demás especies, Sin embargo es recomendable encarar pruebas de verificación para otras especies diferentes de Carne asada..

4.3.3 Interpretación de los resultados

Los resultados recogidos en los ensayos pueden ser analizados en términos de tres mecanismos básicos: adhesión, deformación (8) (9) (62) y lubricación (41) (45).

En primer lugar, un aumento en el coeficiente de fricción con la elevación de la velocidad de deslizamiento sugiere el aumento del término de deformación (resistencia al cizalle) propuesto por Bowden y Tabor (9)(10), debido a un efecto dinámico. Normalmente la resistencia de la madera aumenta con la velocidad de la carga, dentro de ciertos límites (15) (50); según Panshin y de Zeeuw (50) esto es evidente para todas los tipos de esfuerzos que se aplican a la madera. A modo indicativo, se estima que la resistencia de la madera aumenta o disminuye alrededor del 8%, cuando la duración de la carga varía por un factor de 10, según observaciones realizadas en maderas de la zona templada (15).

En nuestro caso, el aumento de μ observado con el incremento de la velocidad (en un factor de 10) fue del 8% aproximadamente en varios casos, lo cual hace presumir que la velocidad de la carga en cizalle (y eventualmente en flexión) originada en los puntos de contacto interfacial, haya influido en la variación de μ detectada.

Este aumento de μ con la velocidad de deslizamiento también fué observado por McKenzie y Karpovich (41), en una proporción similar. Según estos autores a velocidades menores de 0,5 mm/seg (3 cm/min), el efecto sería más pronunciado; a velocidades mayores que la mencionada la elevación de μ es menos acentuada. Ello supone un probable efecto de la temperatura de la interfaz madera-acero, que produciría una disminución de las propiedades mecánicas de la madera (28) y también del coeficiente de fricción (44), de esta manera el efecto dinámico de la carga en el término de deformación, se vería algo disminuido a velocidades muy grandes.

Por otro lado, la ausencia del efecto debido a la cara o plano de roce de la madera, insinúa una combinación similar de valores de la adhesión y deformación en las caras radial y tangencial. Sin embargo, es probable que el término de deformación se vea afectado por la proporción de parénquima presente en la madera. Durante los ensayos se observó que en la cara tangencial de algunas probetas de Apamate, se presentan bandas de tejido parenquimático que cubren una buena proporción del área nominal de contacto; en esas muestras se observó una notoria elevación de la fuerza de fricción.

Posiblemente las células parenquimáticas, por tener paredes más delgadas, se amolden y adapten mejor al contorno superficial del acero, aumentando el área real de contacto y la adhesión entre la madera y el acero. Estos resultados son confirmados por Knudson y Schiewind (25) quienes encontraron un mayor coeficiente de fricción en madera de células más delgadas (madera temprana o de primavera) procedente de Pseudotsuga menziessi y Abies concolor.

Además, en determinados casos el grano entrecruzado de la madera (v.g. Perhuétamo) puede ocasionar un incremento de μ , como lo mencionan Herrera y colaboradores (17).

Esa característica del leño se hace más evidente en la cara tangencial y su acción, debido a una concentración acentuada de fibras en determinadas direcciones, podría dar lugar a un aumento en el término de deformación de la fricción.

Esto se vería confirmado por el hecho de detectarse mayor rugosidad en la superficie tangencial del perhuétamo. (Tabla N° 3).

Lemoine y colaboradores (31) tampoco encontraron en sus estudios diferencias significativas para el coeficiente de fricción en los planos radial, tangencial y transversal de la madera. En el estudio exploratorio realizado en el Laboratorio Nacional de Productos Forestales (64) se detectaron diferencias en los valores de μ por la cara de roce. En dicho estudio se emplearon 5 muestras provenientes de la sola árbol, localidad que posiblemente

te que haya creado un sesgo en los resultados; en las caras radiales pueden presentarse bandas parenquimáticas que influyen sobre el coeficiente de fricción.

La disminución de μ con el aumento del peso normal aplicado a la muestra de ensayo fue notoriamente mayor en las maderas más livianas y de peso específico medio. De acuerdo con lo expuesto por Bowden (8), - es posible que en la interfaz de contacto madera-acero, el fenómeno viscoelástico de la madera (por la carga aplicada) sea diferente en maderas blandas que en las duras.

En las maderas blandas y livianas se tiene un mayor porcentaje de volumen de espacios vacíos (50) y por tanto paredes celulares delgadas y menos resistentes, comparándolas con las maderas más pesadas que generalmente tienen una textura más fina, paredes celulares gruesas y mayor resistencia mecánica. Estas características darían lugar a que un aumento del área real de contacto por efecto de un incremento en el peso aplicado, sea menor en las maderas blandas, lo cual originaría una disminución más pronunciada del valor de μ que en caso de maderas duras.

Es posible que los extractivos de la madera jueguen un papel muy importante de lubricación en la interfaz de contacto, como lo sugieren McKenzie y Karpovich - (41). Algunos tipos de extractivos podrían disminuir su acción de lubricación bajo el efecto de una mayor carga, originando el aumento de μ . En el fenómeno tendría importancia la temperatura desarrollada duran-

Licencia Creative Commons:

te el deslizamiento, ocasionando alteración de la viscosidad y composición de los extractivos (41) como se discutirá más adelante, la elevación de la temperatura puede ser importante en los deslizamientos realizados. La explicación también podría ser válida para esclarecer la interacción significativa (al nivel de 5%) entre las variables velocidad de deslizamiento-peso normal, encontrada en Apamate. Apamate posee 3,6 % de extractivos solubles en etanol-benceno (tiempo de extracción: 8 horas), que influyen significativamente en la adhesividad de algunas coías (65).

En cuanto a la acción originada por la estructura anatómica de la madera, sobre la superficie metálica, las mediciones de la rugosidad del acero realizadas después de los ensayos de Chupón y Perhuétamo, acusaron un leve pulimento del metal. Sin embargo, las observaciones realizadas en la superficie del acero con lupa 10X no detectaron ningún indicio de ésta acción del leño.

Las incrustaciones cristalinas que posee el Chupón rosado en los radios y en el parénquima, se encuentran cubiertas de una goma oscura. Es probable que la cubierta actúe como un colchón durante el deslizamiento de la muestra aislando el efecto de los cristales. Durante el deslizamiento, los cristales que podrían tomar contacto con el acero posiblemente se desprendan, rueden y/o acomoden entre las estrias del metal o en algún otro espacio de la madera.

Los valores bajos del coeficiente de fricción encontrados en Chupón, hacen suponer que en los ensayos realizados no ejercieron totalmente su influencia los contenidos silicosos y cristalinos de la madera. La disminución detectada en la rugosidad del acero podría también ser causada por el aumento del término de deformación y la disminución de la adhesión durante el roce. La disminución de la adhesión podría ser ocasionada por la estructura compacta de la madera (fibras de paredes gruesas) y por la presencia de los cristales y depósitos silíceos, de modo que en el contacto con el metal se registraría una disminución del área real de contacto. La zona de contacto estaría concentrada en los picos de la superficie del metal, los cuales serían fraccionados (en especial los más frágiles) durante el deslizamiento.

De todas maneras la disminución de la rugosidad registrada, no parece tener mayor efecto sobre μ , de acuerdo con las investigaciones de McKenzie y Karpovich (41) y de Klamecki (23).

Los primeros encontraron valores de μ entre 0,10 y 0,21 (aleatorios) para rugosidad de 13 a 35 RMS del metal. Rugosidades mayores producen una considerable elevación de los resultados (hasta 0,64 para 500 RMS).

Aunque Klamecki (23) estudió la fricción durante el corte de madera y no proporciona valores explícitos del coeficiente de fricción, manifiesta que μ es independiente de la rugosidad en herramientas pulidas, pero sí es fuertemente dependiente en herramientas de rugosidad muy elevada.

Licencia Creative Commons:

En los ensayos adicionales presentados más adelante, se considera una discusión complementaria del efecto de los cristales de chupón sobre la superficie del a cero.

Las figuras N°9a, al N° 9f detallan gráficamente la variación de la fuerza de fricción durante los deslizamientos. Estos perfiles de variación fueron obtenidos para cada uno de los 8 tratamientos en estudio en el equipo INSTRON.

Las curvas correspondientes a los deslizamientos a velocidades 5 cm/min provienen de un ensayo en cada caso; en tanto que los deslizamientos a 50 cm/min provienen de 4 a 5 pruebas, las cuales fueron de menor duración a causa del aumento de la velocidad.

En general todas las curvas procedentes de los ensayos a menor velocidad, tienen un patrón de variación común: un perfil ligeramente sinusoidal conteniendo numerosos picos pequeños.

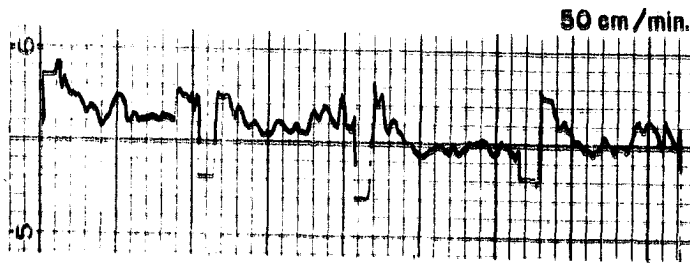
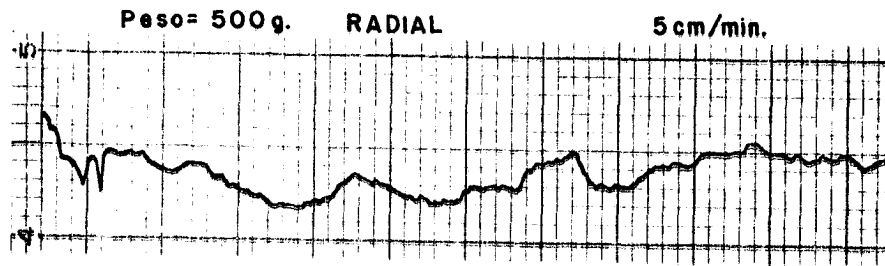
El perfil de variación es pronunciado en algunas especies como Carne asada, posiblemente a causa de los depósitos de goma que posee en los radios y en el parénquima. Estos depósitos harían fluctuar la fuerza de fuerza fricción aumentado la tendencia al "stick-slip". El fenómeno se hizo más evidente con el empleo del peso mayor (2000 g); es probable que el grano grueso y entrecruzado de Carne asada tenga algún aporte. La plasticidad y elasticidad de una madera podrían contribuir en la incidencia del "stick-slip". Posible -

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

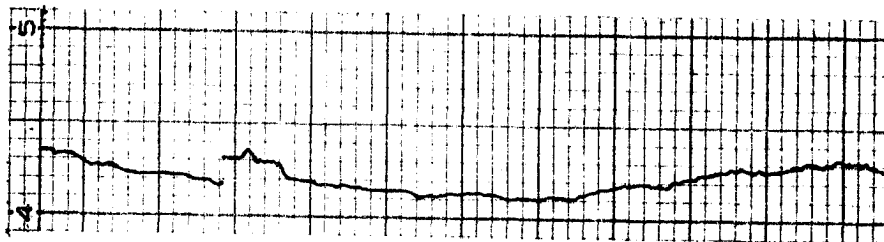
FIG. No. 9 VARIACION DE LA FUERZA DE FRICCION DURANTE EL DESLIZAMIENTO

a) Sun Sun

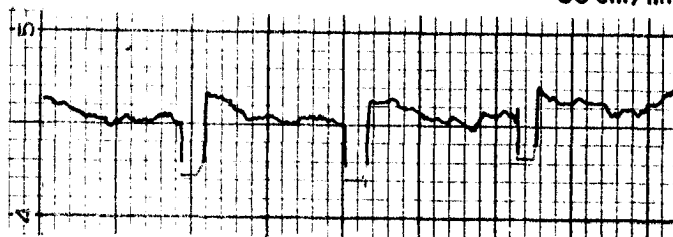


TANGENCIAL

5 cm/min.



50 cm/min.

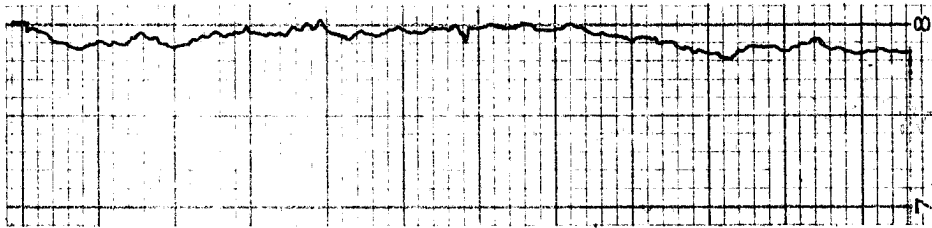


Sun Sun

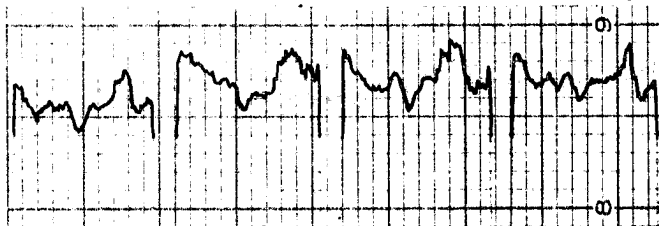
Peso= 2000 g.

RADIAL

5 cm/min.

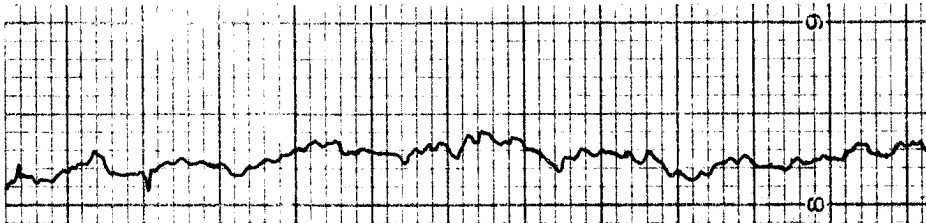


50 cm/min.

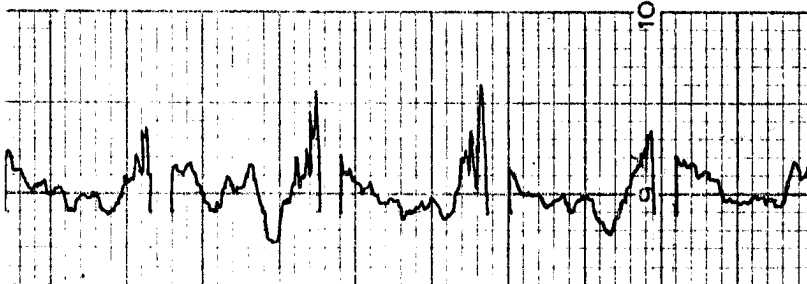


TANGENCIAL

5 cm/min.

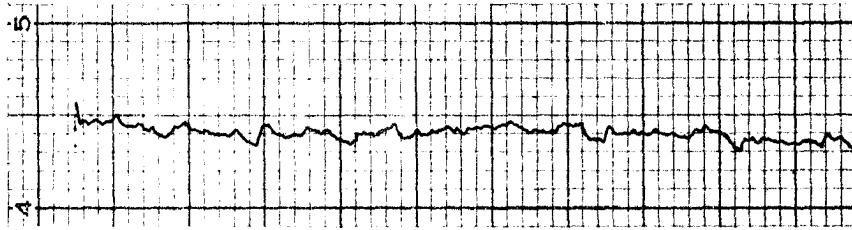


50 cm/min.

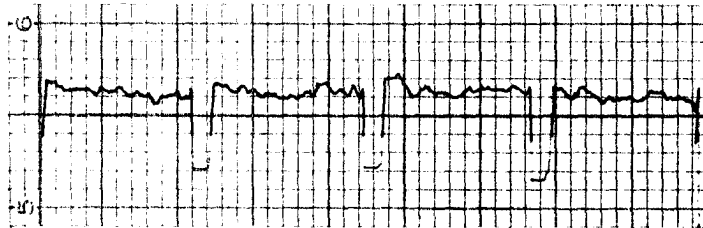


b) Saqui-Saqui

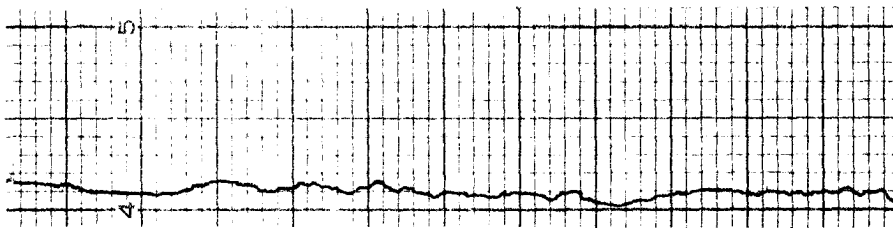
Peso= 500g. RADIAL 5 cm/min.



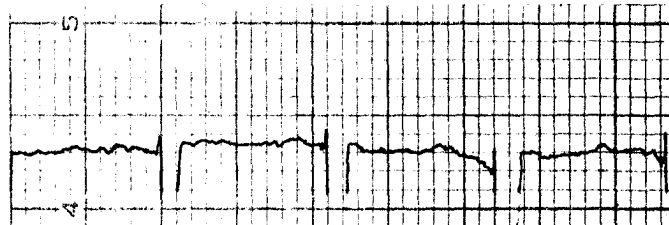
50 cm/min.



TANGENCIAL 5 cm/min



50 cm/min.

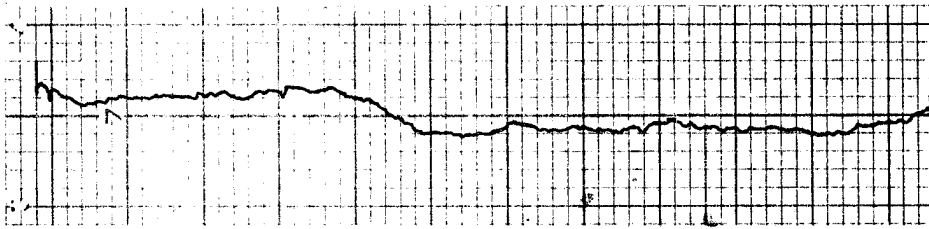


Saqui-Saqui

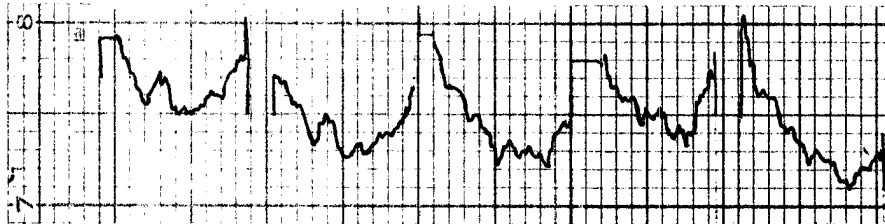
Peso= 2000 g.

RADIAL

5 cm/min.



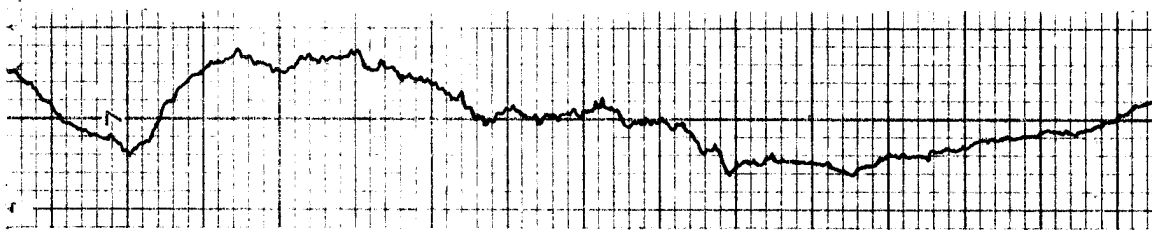
50 cm/min.



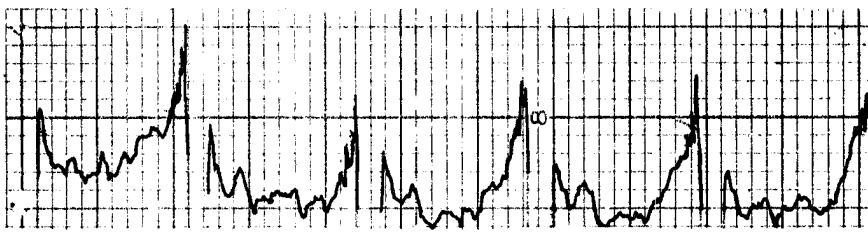
WWW.BDIGITAL.ULA.VE

TANGENCIAL

5 cm/min.

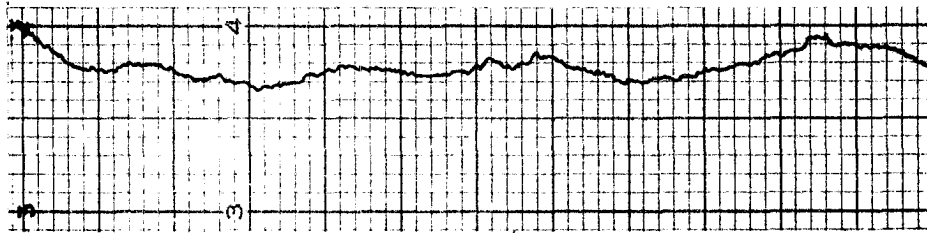


50cm/min.

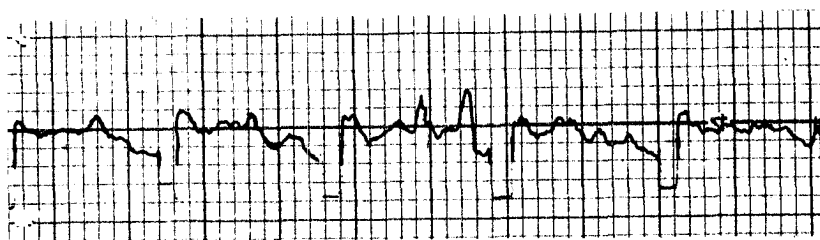


c) Apamate

Peso= 500g. RADIAL 5 cm/min.

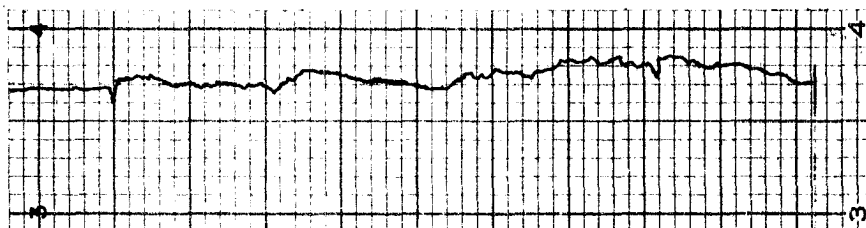


50 cm/min.

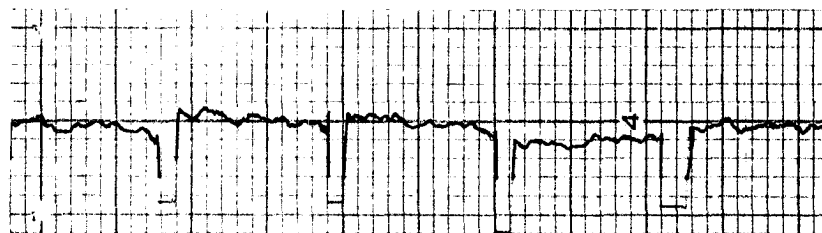


TANGENCIAL

5 cm/min.



50 cm/min.

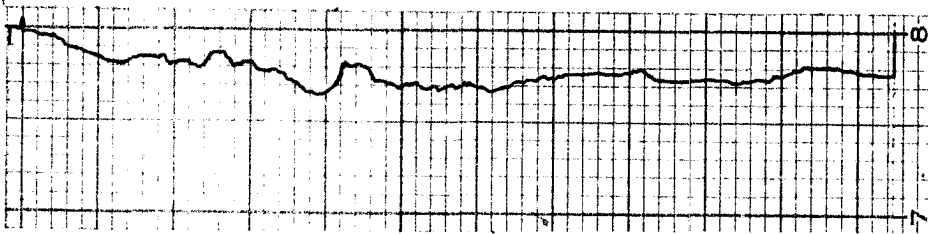


Licencia Creative Commons:

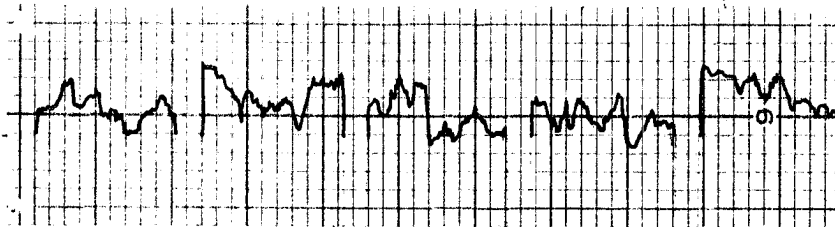
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Apamate

Peso= 2000g. RADIAL 5 cm/min.

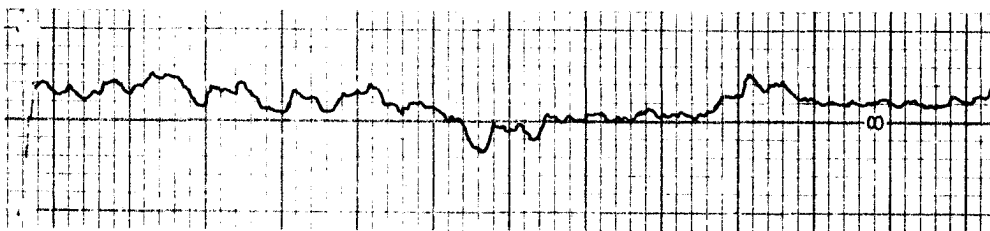


50 cm/min.

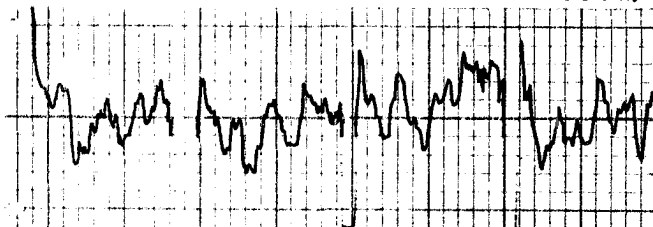


TANGENCIAL

5 cm/min.



50 cm/min.

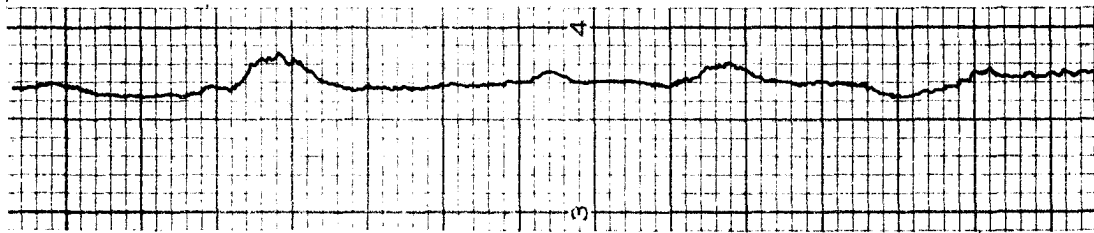


Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

d) Carne asada

Peso= 500 g. RADIAL 5 cm/min.

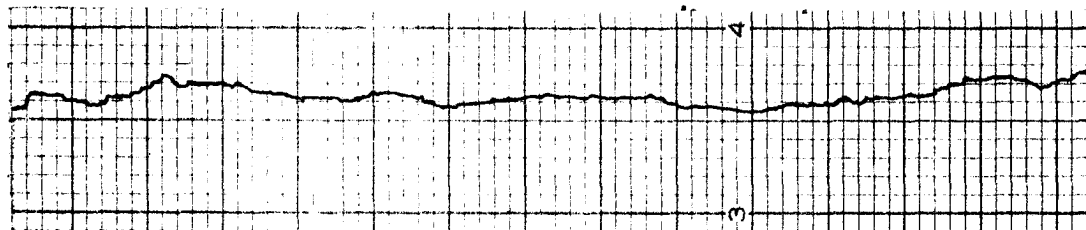


50 cm/min.

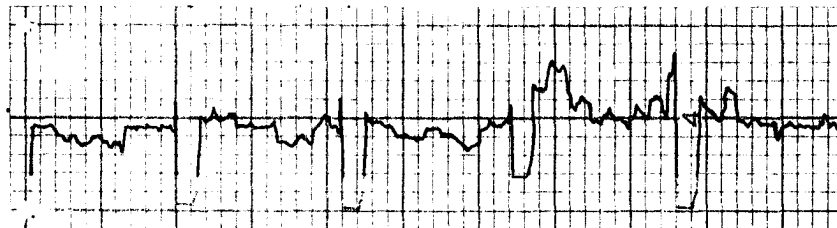


WWW.BDIGITAL.ULA.VE

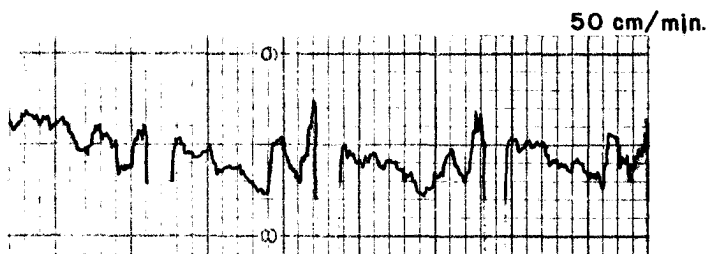
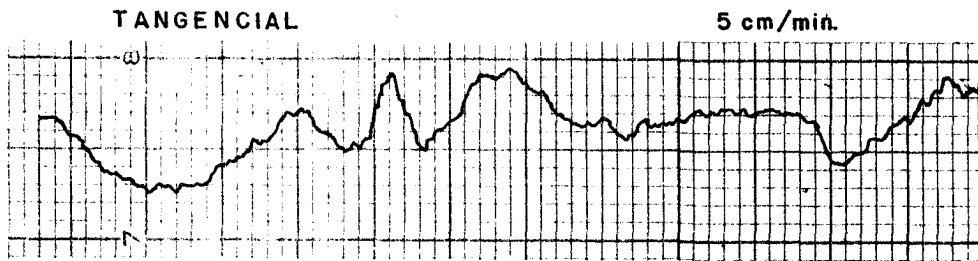
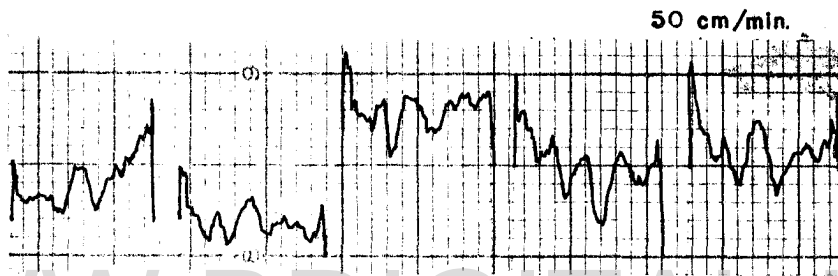
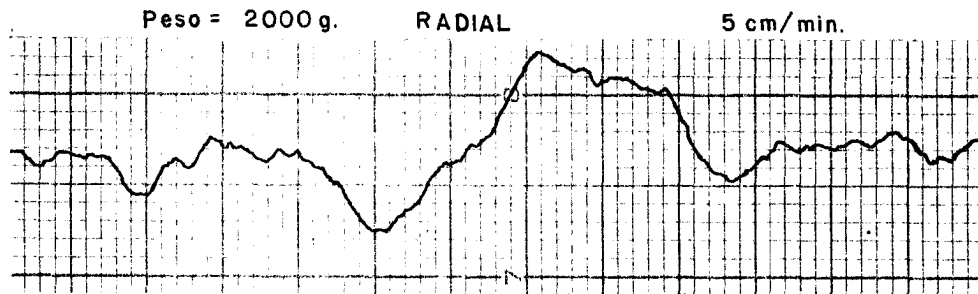
TANGENCIAL 5 cm/min.



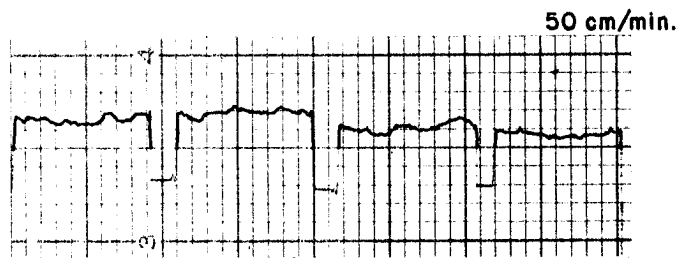
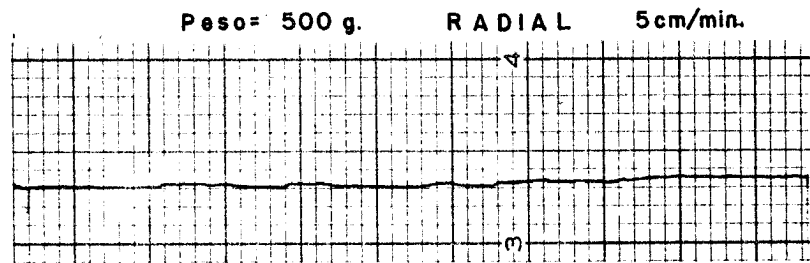
50 cm/min



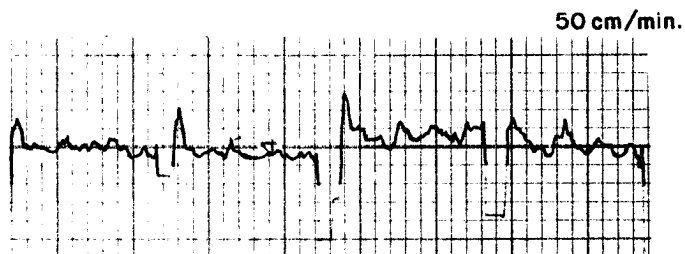
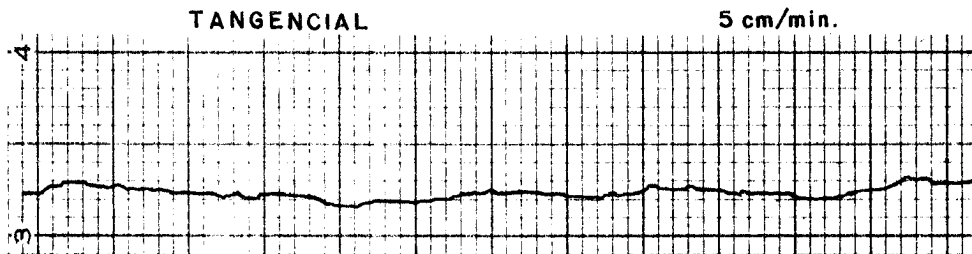
Carne asada



e) Chupón rosado

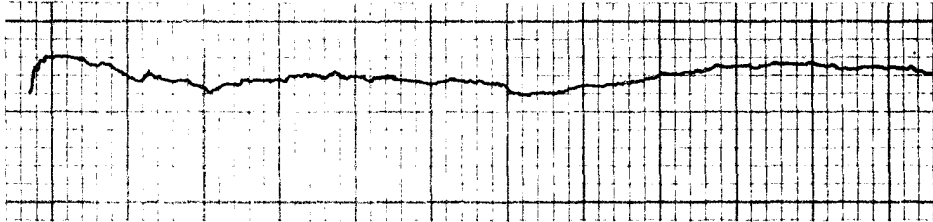


WWW.BDIGITAL.ULA.VE



Chupón rosado

Peso= 2000g. RADIAL 5 cm/min.

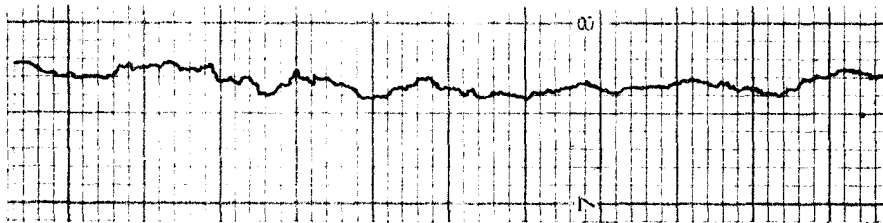


50 cm/min.

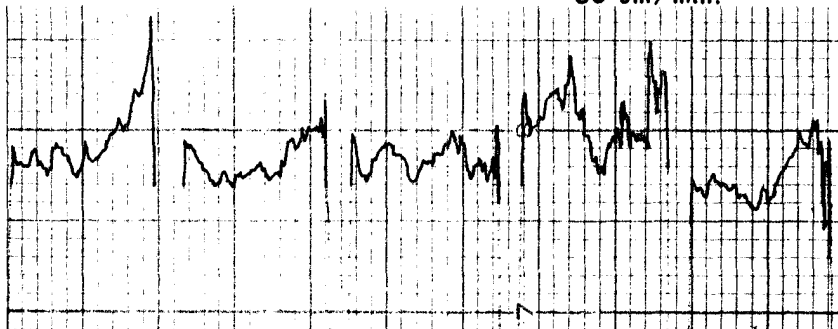


TANGENCIAL

5 cm/min.



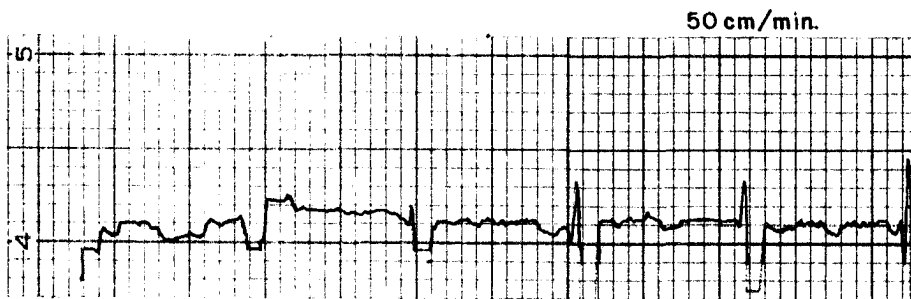
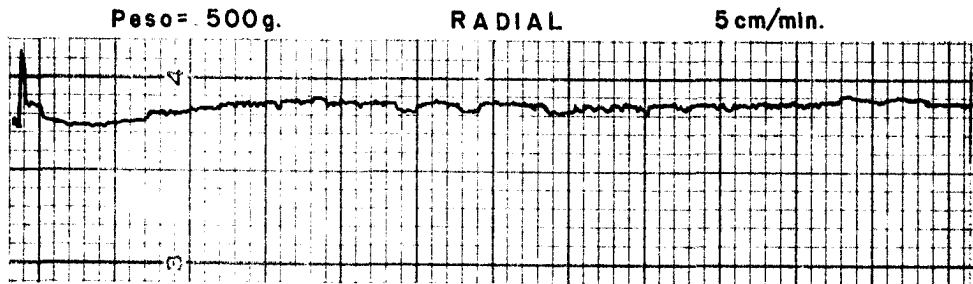
50 cm/min.



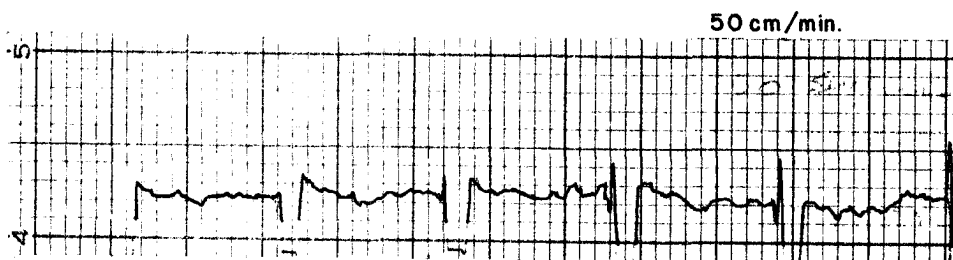
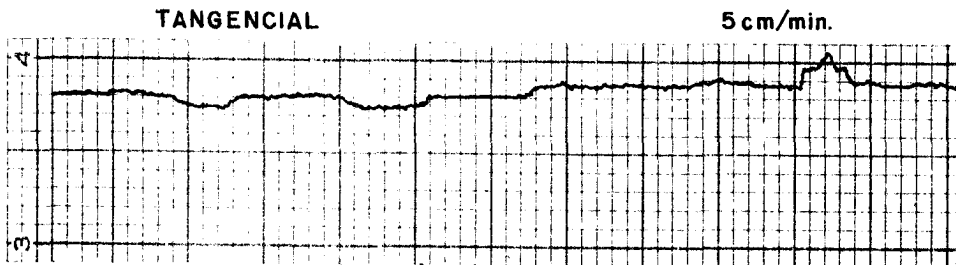
Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

f) Perhuétamo



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

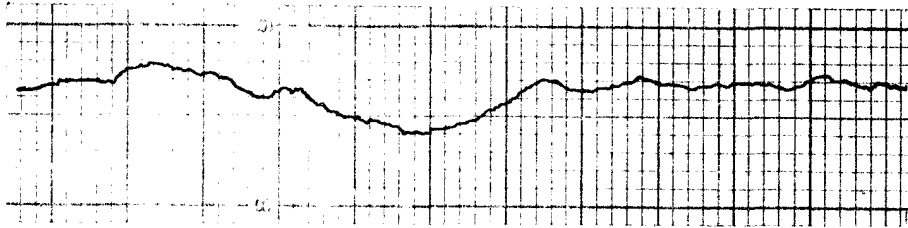


Perhuétame

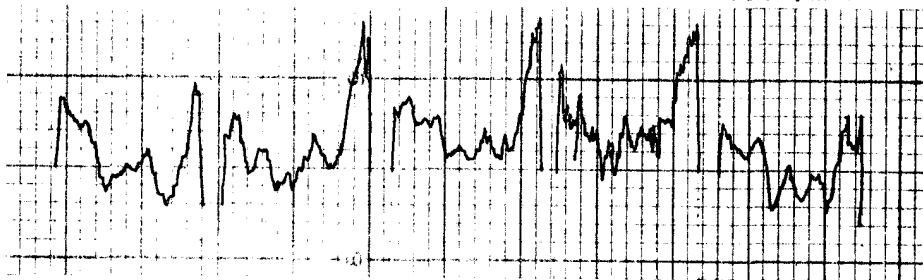
Peso= 2000g.

RADIAL

5 cm/min.

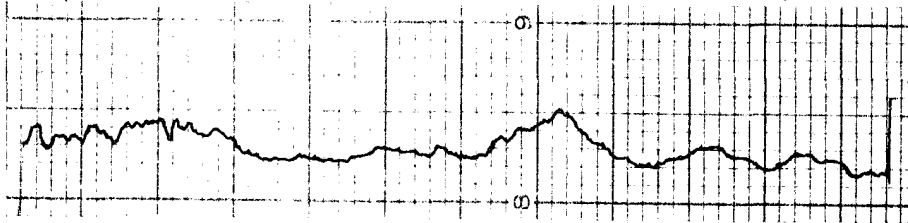


50 cm/min.

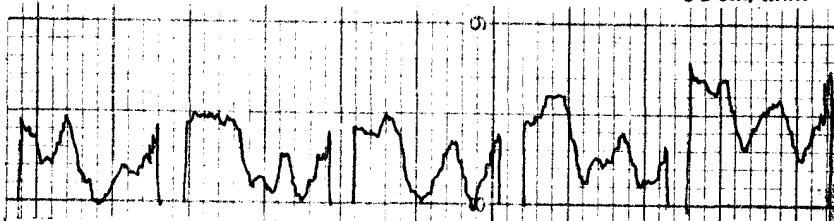


TANGENCIAL

5 cm/min.



50 cm/min.



mente el patrón de variación de las curvas sea específico y característico de cada especie y sería recomendable realizar una investigación más detallada al respecto.

Esa forma sinusoidal de las curvas también sugiere una acción de amortiguamiento del movimiento, causada por la base de la superficie del acero. Al respecto McKenzie y Karpovich mencionan que la rigidez de la base de desplazamiento afecta la magnitud del "stick-slip". El estudio de este fenómeno es una parte muy compleja, en proporciones desconocidas, merece investigaciones con repercusiones prácticas para poder reducirlo o incrementarlo, de acuerdo a la situación.

Al respecto McKenzie, citado por Koch (26, pags 59 y 97), determinó que el ocasionar vibraciones a la herramienta de corte puede resultar en una disminución de la magnitud de las fuerzas necesarias para el corte; según ese autor una gran parte de la fuerza de corte se consume en la fase de incisión; induciendo vibraciones a la herramienta de corte se superaría esta desventaja y también se tendría menores defectos en la superficie de la madera, comparando con la situación del corte normal.

Refiriéndonos a los picos más pequeños que se presentan en la trayectoria de las curvas, ellos pueden ser causados por la ruptura de los enlaces formados entre la madera y el acero, y también por el cizallamiento superficial de la madera en las zonas de contacto con el metal.

Las curvas correspondientes a los deslizamientos realizados a la mayor velocidad (50 cm/min), también - manifiestan en cierto grado las tendencias anteriormente descritas. Además, los picos se presentaron en forma pronunciada, especialmente con las cargas mayores), lo cual confirma la acción de fuerzas interfaciales (cizalle) que pueden ser incrementadas por la mayor velocidad de deslizamiento.

Los valores de la fuerza de fricción se determinaron como el promedio de la variación observada.

Aunque esas curvas se obtuvieron de una probeta representativa del deslizamiento observado en cada especie, se recomienda estudiar el patrón de variación de los perfiles para cada especie en particular, posiblemente pueda detectarse un perfil de variación de la fuerza de fricción típico para cada especie según las variables peso, velocidad, plano de roce, extractivos, etc. Esto puede ser de utilidad en el conocimiento y control del "stick-slip".

Finalmente, en nuestro estudio el efecto del peso específico básico de la madera fue evaluado a través - del análisis de regresión para los 8 tratamientos contemplados en la Tabla N° 7. Los resultados de este análisis están resumidos en la Tabla N° 13 y Figura N° 10.

En razón de no haberse detectado ninguna diferencia estadística en los resultados numéricos de μ para las caras radial y tangencial de la madera, esos valores de la Tabla N° 7, fueron agrupados entre sí, segregados de acuerdo a la velocidad de deslizamiento y de la carga aplicada, y relacionados con el peso específico básico (Peb.) de la madera de las seis especies.

Los pares μ -Peb. (graficados) se presentan en la figura N° 10.

La evaluación del grado o nivel de asociación entre las variables en estudio, fue realizada según metodología del análisis de correlación descrita por Ostle (49). Se plantearon dos hipótesis para el coeficiente de correlación (r):

$$H_0: r = 0 \text{ y } H_1: r \neq 0$$

La decisión de aceptación o rechazo de la hipótesis nula (H_0) se realizó a través de la distribución t de "student".

El análisis empezó considerando la correlación lineal simple; en razón de haberse obtenido diferencias altamente significativas de r (H_0 fue rechazada), se probó la bondad del ajuste de los datos a polinomios de segundo y tercer grado. El criterio para la selección de los términos de primer, segundo y tercer orden de la ecuación de ajuste, se basó en la significación de los coeficientes de regresión; el nivel de significación para esta selección se fijó en 5 %.

En todos los casos se obtuvo un mejor ajuste con el polinomio de segundo grado (Tabla Nº 13), cuya expresión algebraica es:

$$\mu = a + b (\text{Peb}) + c (\text{Peb})^2$$

donde:

- μ = coeficiente de fricción
- Peb - peso específico básico
- a, b, c - constantes determinadas por el método de los mínimos cuadrados.

Las curvas representativas de los ensayos realizados con el peso 500 g y velocidades de 5 - 50 cm/min (Figuras a y b), muestran una tendencia neta de disminución de μ con el aumento del Peb.

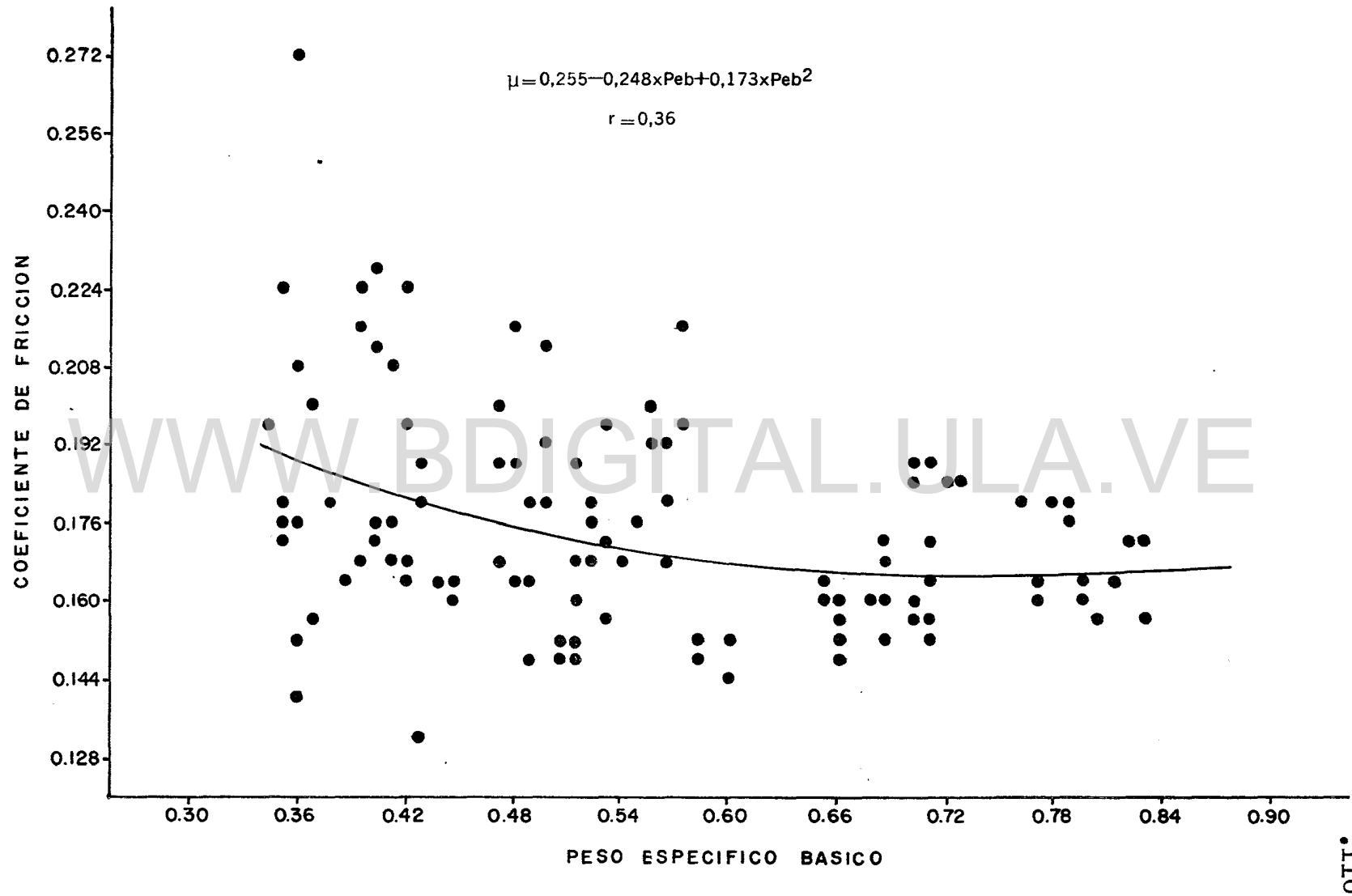
Los coeficientes de correlación (0,36 y 0,48 respectivamente) son significativos al nivel del 1%.

De acuerdo con Knudson y Schniewind (25) para un peso dado, en las maderas livianas se registra un mayor coeficiente de fricción a causa de producirse una mayor adhesión ocasionada por la conformabilidad de la pared celular en el contorno superficial del acero. En el caso de las maderas duras, la mayor rigidez de la pared celular daría lugar a una menor adhesión; en este caso tendría importancia el componente de deformación en la fricción.

En las curvas c y d (ensayos con el peso 2000 g) se observa inicialmente una tendencia decreciente de μ en relación al Peb., luego las curvas se tornan ascendentes a medida que aumenta el Peb. Este curioso comportamiento posiblemente sea debido a una interacción de otras variables con el peso aplicado (2000 g).

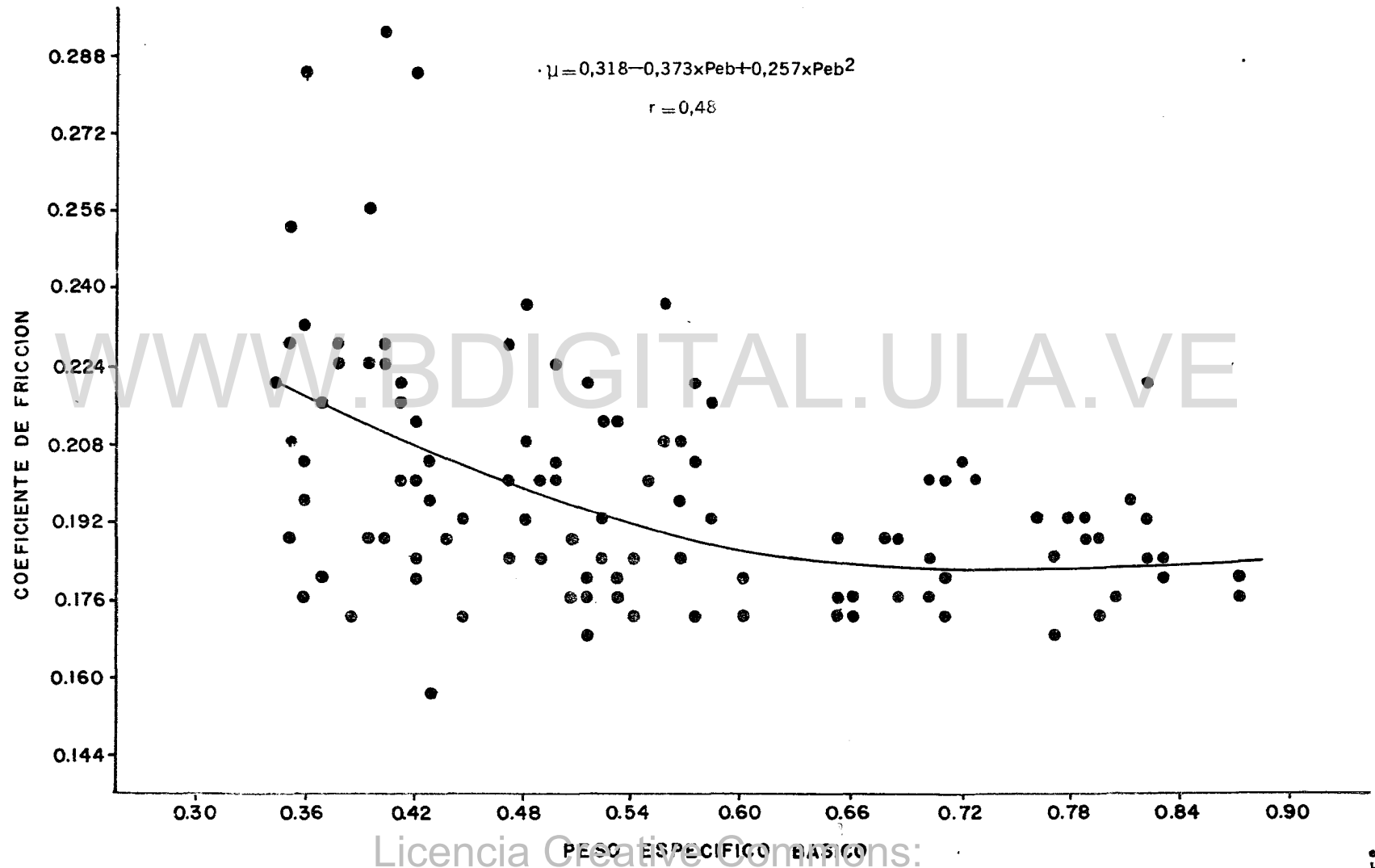
FIG. No. 10 RELACION COEFICIENTE DE FRICCION (μ)-PESO ESPECIFICO BASICO (Peb)

a) Caras: radial y tangencial; Velocidad: 5 cm/min.;
Peso = 500 g.



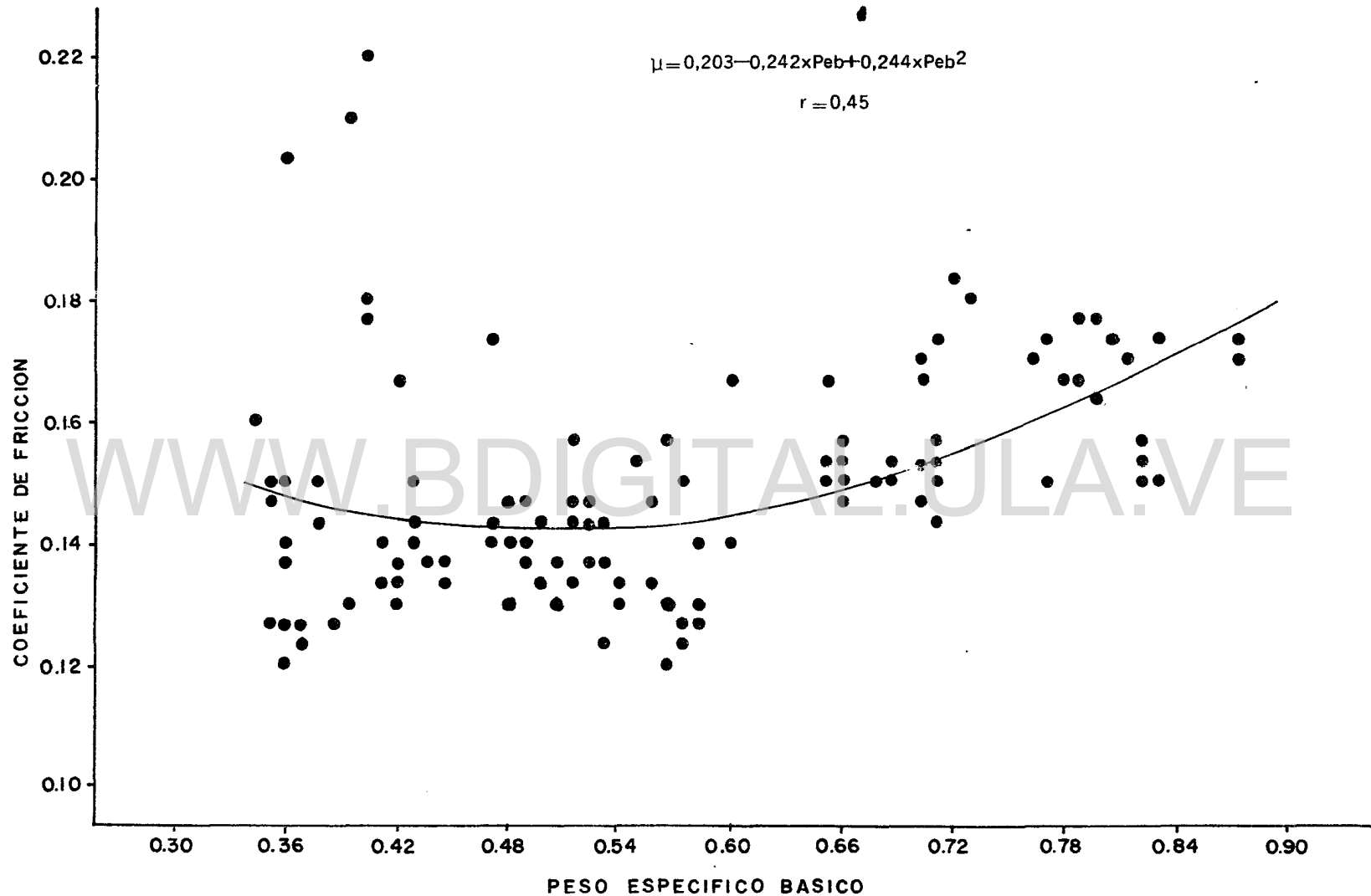
Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

b) Caras: radial y tangencial; Velocidad: 50 cm/min.;
Peso = 500 g.

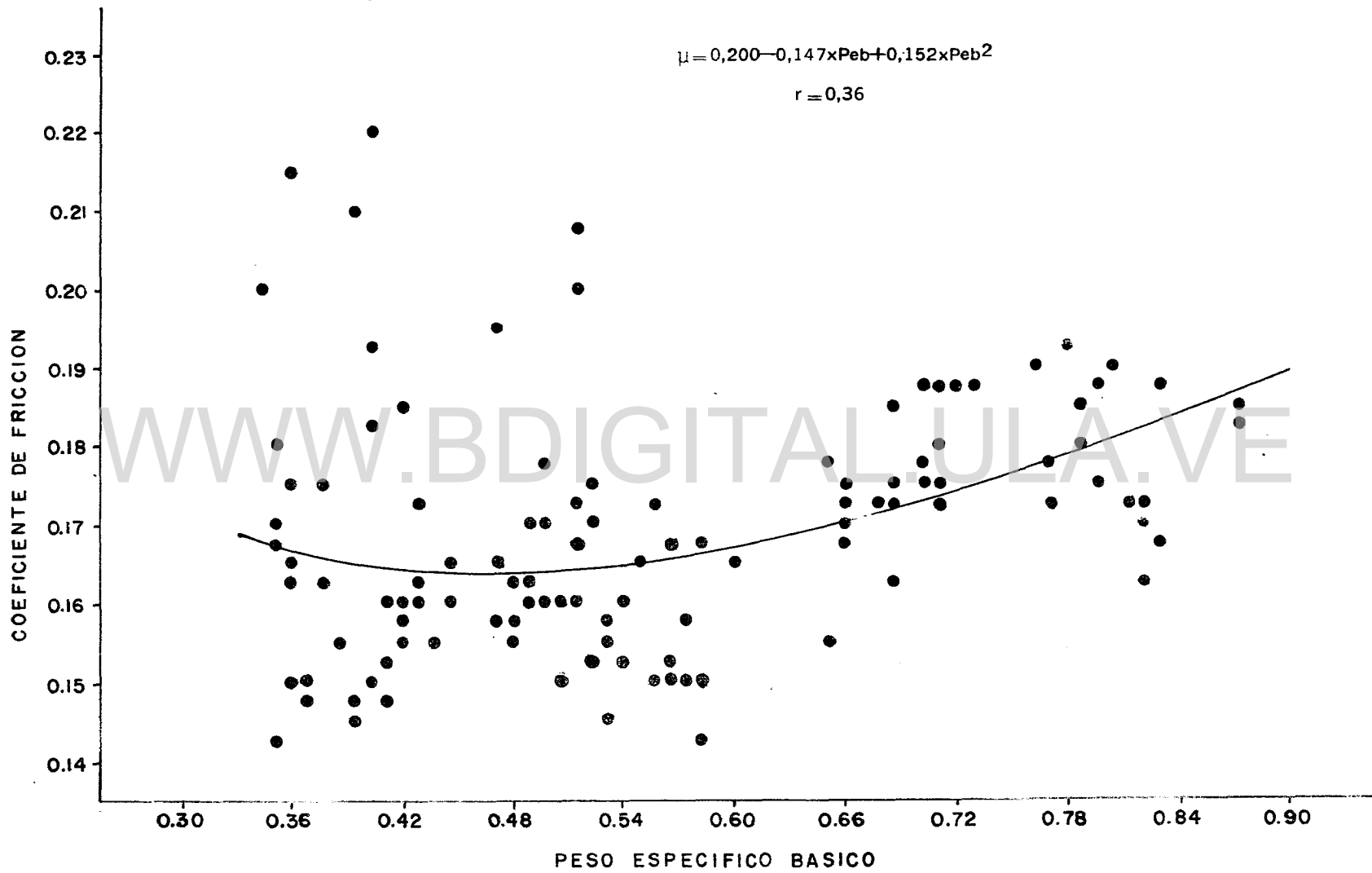


Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

c) Caras: radial y tangencial; Velocidad: 50 cm/min.;
Peso = 2000 g.



d) Caras: radial y tangencial; Velocidad: 50 cm/min.;
Peso = 2000 g.



Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tabla N° 13. Análisis de regresión polinómica entre las variables: coeficiente de fricción (μ)-Peso Específico Básico (Peb)

TRATAMIENTO (o)	P A R A M E T R O S			
	a	b	c	r
A	0,25498**	-0,24809*	0,17254	0,36**
B	0,31840**	-0,37281**	0,25730**	0,48**
C	0,20300**	-0,24245**	0,24416**	0,45**
D	0,20024**	-0,14651	0,15194*	0,36**

** significativo al nivel del 1%

* significativo al nivel del 5%

(o) A = caras radial y tangencial; velocidad: 5 cm/min;
peso: 500 g.

B = caras: radial y tangencial; velocidad: 50 cm/min;
peso: 500 g.

C = caras: radial y tangencial; velocidad: 5 cm/min;
peso: 2000 g.

D = caras: radial y tangencial; velocidad: 50 cm/min;
peso: 2000 g.

r = coeficiente de correlación

Con el fin de indagar el efecto que podría causar la variación del contenido de humedad (en las seis especies) durante el deslizamiento, se realizó una prueba de

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

correlación lineal simple del tipo $\mu = a + b$ (Peb) entre los valores de μ correspondientes a los 8 tratamientos de la Tabla N° 7 y el contenido de humedad (C.H.). Términos de segundo grado y tercer grado introducidos en el análisis, no hacen aportes significativos al coeficiente de correlación lineal simple. Tan sólo se encontró significación en el valor de r correspondiente a ensayos realizados con el peso mayor. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla N° 14.

Tabla N° 14. Análisis de correlación lineal simple entre las variables coeficiente de fricción (μ) - contenido de humedad (CH).

Tratamiento (o)	P A R A M E T R O S		
	a	b	r
1	-	-	0,00
2	-	-	0,09
3	-	-	-0,06
4	-	--	-0,01
5	0,06362*	0,00501**	0,25**
6	0,02922	0,00714**	0,34**
7	0,09751**	0,00422**	0,28**
8	0,09613**	0,00434**	0,22*

** significativo al nivel del 1%

*. significativo al nivel del 5%

(o) tratamientos correspondientes a la Tabla N° 7.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

En los ensayos realizados con el menor peso no se obtuvo significación para μ , lo cual implica que parece no existir correlación entre el coeficiente de fricción de los tratamientos 1, 2, 3 y 4 con el contenido de humedad en el rango observado.

Lemoine y colaboradores (31) tampoco encontraron influencia del contenido de humedad en sus resultados - empleando el peso 500 g. Aparentemente, el contenido de humedad manifiesta su efecto bajo cargas mayores - que ponen en contacto una mayor superficie de madera sobre el acero; esto resultaría en un aumento de la adhesión en la interfaz madera-acero en una magnitud dependiente del C. H. de la madera.

Al respecto, Marian y Stumbo (34) proponen una teoría (teoría de la monocapa de adhesión), según la cual la adhesión entre la madera y una cola es máxima cuando se tiene una monocapa de agua adsorbida en la superficie de la madera. En nuestro material de ensayo se tendría una monocapa de agua en las paredes celulares de las fibras colindantes a la interfaz de contacto con el acero.

McMillin y colaboradores (45) encontraron un aumento de μ con el incremento en el C.H. de la madera (correlación positiva), en un rango menor que el punto de saturación de las fibras. Estos autores explican que el hecho observado se debería a un aumento en la adhesión interfacial ocasionado por la polaridad del agua adsorbida en la madera, confirmando de esta manera lo propuesto por Marian y Stumbo.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

De todos modos, la correlación encontrada entre μ y el C.H. en los 4 tratamientos mencionados, explica solamente una parte de la variación total de μ . Ello hace pensar en el posible efecto de una compleja interacción de otros factores que actuarían junto con el contenido de humedad de la madera.

Pretendiendo estimar de una manera general, la elevación de la temperatura (ΔT) originada en el plano de roce de la madera durante el deslizamiento de la probeta, se realizó un cálculo teórico recurriendo a valores del calor específico de la madera (c) proporcionados por la bibliografía y asumiendo algunos valores del área real de contacto madera-acero.

El calor específico de una sustancia es la relación de su capacidad térmica, a la del agua a 15°C (28). - Kollmann-Coté (28), Skaar (56) y Stamm (57) definen el calor específico de la madera, por la siguiente expresión.

$$c = \frac{Q}{m (T_2 - T_1)} \quad \text{o bien } c = \frac{Q}{m \Delta T}$$

donde: c = calor específico de la madera, en calorías/gramo-°C.

m = masa de la madera en gramos

$\Delta T = (T_2 - T_1)$ = incremento de temperatura, en °C

Stamm (57) manifiesta que el calor específico de la madera (c), varía con la temperatura en forma casi lineal y que es independiente de la especie, peso específico básico y altura del árbol de donde se extrae la muestra. Skaar (56) reporta que el calor específico de la madera varía con el contenido de humedad a causa que el calor específico del agua es más del triple que el de la madera seca; el valor de c para un contenido de humedad de la madera cercano del 20% y a una temperatura de 20°C, es $c = 0,4 \text{ cal/g-}^{\circ}\text{C}$, según Skaar (56).

Como se puede apreciar en las fórmulas citadas anteriormente, para encontrar la elevación de la temperatura ΔT en el plano de contacto de la madera, es suficiente determinar m y Q . Los cálculos que se detallan a continuación, están basados en fórmulas proporcionadas por Resnick y Halliday (54).

Cálculo de la masa (m)

En nuestro caso la masa m constituye la cantidad de materia (madera) bajo contacto con la superficie del acero. Se consideró un espesor de 3 micras (aproximadamente el espesor de la pared celular) y se asumió un porcentaje del 30% (del área nominal), para el área real de contacto de probetas sometidas al peso - 500 g y un 40%, empleando el peso 2000 g.

Tomando en cuenta una probeta de dimensiones nominales: 2,5 x 2,5 x 2,5 cm (área nominal de contacto = 6.25 cm²), los volúmenes (V) de material madera obtenidos son:

$$V_1 = 1.5,6 \times 10^{-10} \text{ m}^3, \text{ usando el peso } 500 \text{ g}$$

$$V_2 = 1.7,5 \times 10^{-10} \text{ m}^3, \text{ usando el peso } 2000 \text{ g}$$

empleando el valor 1,5 como representativo del peso específico de la pared celular (P_w) de acuerdo con Panshin y de Zeeuw (50), obtenemos m de la siguiente manera:

$$m = \frac{P_w V}{g} \times 9,8 \times 10^3$$

siendo:

m = masa de la madera en Kg

P_w = peso específico de la pared celular en kilogramos-fuerza/m³.

V = volumen de madera, en m³.

g = aceleración de la gravedad, en m/seg².

9.8 = constante, transforma los valores de Kg-fuerza a newtons.

los valores obtenidos de m son:

$$m_1 = 8,4 \times 10^{-7} \text{ Kg.}, \text{ empleando el peso } 500 \text{ g}$$

$$m_2 = 11,6 \times 10^{-7} \text{ Kg.}, \text{ empleando el peso } 2000 \text{ g}$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Cálculo de la cantidad de calor (Q)

Para calcular la cantidad de calor Q generada durante el roce, se tomaron en cuenta los siguientes datos:

$$\mu_1 = 0,1 ; \quad \mu_2 = 0,15 ; \quad \text{longitud de deslizamiento} = 5 \text{ cm}$$

Los valores de μ_1 y μ_2 representan los coeficientes de fricción de una muestra de peso específico medio, empleando pesas de 500 g y 2000 g respectivamente.

Se asume que todo el trabajo realizado en transportar la probeta con sus pesas de carga normal, se transformó en calor.

Para obtener el trabajo realizado por la fuerza de fricción durante el deslizamiento, se recurre a las siguientes fórmulas:

$$F_f = \mu \times R \times 9,8 \quad ; \quad W = F_f \times d$$

siendo F_f = fuerza de fricción, en newtons (nt)

μ = coeficiente de fricción

R = peso conjunto de la probeta y de la carga normal aplicada, en nt.

9,8 = constante, transforma Kg-fuerza en nt.

W = trabajo, en Joules.

d = longitud de deslizamiento, en m

Se obtuvieron los siguientes resultados:

$F_{f1} = 0,90$ nt. y $W_1 = 0,05$ jou., usando el peso 500 g

$F_{f2} = 2,95$ nt. y $W_2 = 0,15$ jou., para el peso 2000 g

A través del equivalente mecánico del calor: 4,186
jou/cal, se obtiene:

$Q_1 = 0,01$ cal., para el empleo del peso 500 g

$Q_2 = 0,04$ cal., empleando el peso 2000 g

Cálculo del incremento de temperatura (ΔT):

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c}$$

$\Delta T_1 = 33$ C aplicando el peso 500 g

$\Delta T_2 = 89$ C aplicando el peso 2000 g

De ser ciertas las consideraciones expuestas, la elevación de la temperatura en la cara de roce de la madera durante los ensayos de deslizamiento es apreciable. - Los valores obtenidos anteriormente están considerados desde el punto de vista del plano de roce de la madera,

sin tomar en cuenta la superficie metálica; sin embargo, es posible que durante el deslizamiento parte del calor generado en la interfaz madera-acero, se disipe a través del metal por su mayor conductividad del calor, y en realidad se obtengan temperaturas algo menores que las calculadas.

De todos modos el calor generado durante el roce puede ser suficiente para causar cambios en la parte superficial de la madera. Juneja (21) expresa que temperaturas entre 105 y 280°C originan una descomposición térmica o pirólisis de la madera; la descomposición se manifestaría por lenta disminución de peso, agua de constitución, dióxido de carbono, ácido acético y sustancias volátiles de la madera. Por encima del citado rango de temperatura, Juneja manifiesta que se producen reacciones altamente exotérmicas de la madera, llegando a la carbonización alrededor de 500°C.

4.4 ENSAYOS ADICIONALES

4.4.1 Efecto de los extractivos de la madera

Las Tablas N°s 15 y 16 detallan los valores del coeficiente de fricción (μ) obtenidos en las probetas de Aceite Cabimo que recibieron el tratamiento de extracción y en los controles, respectivamente.

Los valores promedio de μ en las muestras extraídas, oscilaron entre 0,150 (mínimo) para el deslizamiento

TABLA No. 15 VALORES DEL COEFICIENTE DE FRICCION PARA MUESTRAS DE Aceite cabimo; Copaifera pubiflora
EXTRAIDAS CON SOLVENTES ORGANICOS*

No Arbol	PESO = 500 GRAMOS						PESO = 2000 GRAMOS					
	Vel. 5 cm/min			Vel. 50 cm/min			Vel. 5 cm/min			Vel. 50 cm/min		
	Rad.	Tang.	Transv.	Rad.	Tang.	Transv.	Rad.	Tang.	Transv.	Rad.	Tang.	Transv.
1	0,171	0,173	0,171	0,199	0,202	0,199	0,151	0,155	0,146	0,188	0,181	0,167
2	0,160	0,163	0,168	0,199	0,199	0,202	0,142	0,154	0,142	0,180	0,178	0,179
3	0,173	0,168	0,173	0,207	0,207	0,198	0,151	0,151	0,151	0,180	0,190	0,187
4	0,178	0,180	0,173	0,202	0,202	0,198	0,157	0,153	0,151	0,175	0,175	0,174
5	0,173	0,173	0,178	0,202	0,199	0,202	0,161	0,162	0,155	0,187	0,187	0,186
6	0,174	0,177	0,182	0,202	0,208	0,207	0,153	0,156	0,150	0,188	0,187	0,178
\bar{X}	0,172	0,172	0,174	0,202	0,203	0,201	0,153	0,156	0,150	0,183	0,183	0,179
S_x	0,006	0,006	0,005	0,003	0,004	0,004	0,006	0,004	0,005	0,005	0,006	0,008

* Cada valor es el resultado de dos observaciones

TABLA No. 16 VALORES DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN PARA MUESTRA CONTROL (NO EXTRAIDAS) DE ACEITE CABIMO (*Copaifera pubiflora*)*

No Arbol	PESO = 500 GRAMOS						PESO = 2000 GRAMOS					
	Vel. 5 cm/min			Vel. 50 cm/min			Vel. 5 cm/min			Vel. 50 cm/min		
	Rad.	Tang.	Transv.	Rad.	Tang.	Transv.	Rad.	Tang.	Transv.	Rad.	Tang.	Transv.
1	0,221	0,222	0,252	0,242	0,242	0,281	0,155	0,160	0,153	0,209	0,211	0,194
2	0,211	0,213	0,211	0,250	0,249	0,244	0,163	0,164	0,161	0,190	0,195	0,194
3	0,218	0,213	0,215	0,252	0,256	0,274	0,145	0,148	0,150	0,192	0,197	0,199
4	0,206	0,217	0,197	0,232	0,237	0,217	0,147	0,148	0,155	0,188	0,191	0,194
5	0,213	0,214	0,193	0,244	0,235	0,240	0,148	0,148	0,145	0,196	0,196	0,202
6	0,232	0,226	0,219	0,277	0,262	0,260	0,155	0,162	0,155	0,199	0,209	0,198
\bar{X}	0,217	0,218	0,214	0,250	0,247	0,253	0,152	0,155	0,153	0,196	0,200	0,197
S_x	0,009	0,005	0,021	0,015	0,011	0,024	0,007	0,008	0,005	0,008	0,008	0,003

* Cada valor es el resultado de dos observaciones

a 5 cm/min en la cara transversal aplicando un peso de 2000 g, y 0,203 (máximo) en la cara tangencial de muestras deslizadas a 50 cm/min con un peso de 500 g.

En tanto, el rango de variación del promedio de μ en los controles, estuvo comprendido entre 0,152 (cara radial, 5 cm/min y 2000 g) y 0,253 (cara transversal, 50 cm/min y 500 g). El coeficiente de fricción disminuye hasta un 21 % extrayendo las muestras con solventes orgánicos y ensayando con un peso de 500 g; usando el peso de 2000 g la disminución de μ alcanza el 10% del valor control.

En los ensayos se detectaron fenómenos semejantes a los observados en anteriores ensayos; el coeficiente de fricción aumentó de manera significativa (al 1%) con la velocidad de deslizamiento y disminuyó por efecto de la carga aplicada. Ver anexo 4.

La Tabla N° 17 esquematiza el análisis de varianza efectuado para evaluar la influencia de los factores: tratamiento de extracción, plano de roce, peso normal, velocidad de deslizamiento y las interacciones entre las variables.

El tratamiento de extracción disminuye el valor de μ de manera altamente significativa. La disminución es contraria a lo observado por McKenzie y Karpovich (41) quienes determinaron un coeficiente de fricción de 0,08 en Guaiacum officinale, madera con elevado porcentaje de aceites y ceras; pero, hay concordancia con los estudios de McMillin, Lemoine y Manwiller (31)

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tabla N° 17. Análisis de varianza para datos del coeficiente de fricción obtenidos en las muestras de Aceite Cabimo.

<u>Fuente de Variación</u>	<u>Grados de libertad</u>	<u>Suma de cuadrados</u>	<u>F Calculado</u>
T	1	0,026226	304,9 **
A	2	0,000077	0,5
B	1	0,042371	492,5 **
C	1	0,054370	632,1 **
TxA	2	0,000028	0,2
TxB	1	0,000446	5,2
TxC	1	0,013359	155,3 **
AxB	2	0,000060	0,4
AxC	2	0,000109	0,6
BxC	1	0,000000	0,0
TxAxB	2	0,000047	0,3
TxAxC	2	0,000118	0,7
TxBxC	1	0,000000	0,0
AxBxC	2	0,000000	0,0
TxAxBxC	2	0,000049	0,3
Error	119	0,010237	
Total	142		

** altamente significativo al nivel 1%

* significativo al nivel del 5 %

T - tratamiento de extracción; A- plano de roce; B- velocidad de deslizamiento; C - carga aplicada.

que estudiaron el comportamiento friccional de la madera de Pinus glabra seca al horno y encontraron para μ valores de 0,178 en muestras extraídas con solventes orgánicos y 0,209 para muestras control o no extraídas.

En nuestro caso, el aumento de μ observado en los controles puede ser debido a la naturaleza y tipo de los extractivos de la madera empleada. Algunos depósitos de resina y de goma probablemente favorezcan la adherencia entre la madera y el acero, dando lugar a un notable aumento de la fuerza de fricción. No se tiene referencia de algún trabajo de determinación del tipo de extractivos, realizado en madera de Aceite Cabimo; los porcentajes de extractivos determinados en el Laboratorio Nacional de Productos Forestales (30) y presentados en la Tabla N° 1 son elevados.

De acuerdo con Savard y colaboradores (55), la extracción con mezcla etanol-benceno disuelve los taninos, aceites esenciales, algunos colorantes, gomas y resinas de la madera; el agua caliente solubiliza algunas sales minerales, los taninos, gomas, almidón y sustancias pécticas; la acetona disuelve las grasas y aceites. Por estas consideraciones y tomando en cuenta los porcentajes de extractivos determinados en Aceite Cabimo, es posible que en su leño se encuentren sustancias pertenecientes al grupo de los taninos, gomas, resinas, almidones y grasas, que serían las causantes de la elevación del valor de μ .

Por otra parte, el tratamiento de extracción con solventes orgánicos también puede originar cambios en el coeficiente de fricción, como lo demuestran los estudios de Bodig (7) y Knudson y Schniewind (25); los cambios se producirían en la adhesión interfacial y - en las propiedades mecánicas de la madera por efecto de los solventes orgánicos, de manera que se verían afectados los dos términos de la fricción: la adhesión y la deformación. Concretamente, un debilitamiento - en la resistencia mecánica de la madera, conjuntamente con un aumento en la adhesividad de la madera extraída (65) daría lugar a que el coeficiente de fricción no varíe de manera tan marcada con el aumento del peso normal. Esto podría explicar la obtención de una menor diferencia de μ entre tratamientos y controles empleando un mayor peso, y también explicaría la interacción altamente significativa entre el tratamiento de extracción y el peso aplicado.

Por otra parte, el análisis de varianza tampoco detectó diferencias estadísticas para μ en las caras radial, tangencial y transversal. Esto confirma los resultados encontrados por Lemoine y colaboradores (31) y sugiere que en determinados casos (proporción de parénquima presente, tipo de extractivos, grano de recto, etc.), puede obtenerse un comportamiento isotrópico en el coeficiente de fricción para la interfaz madera-acero.

4.4.2 Efecto de la dirección de las fibras de la madera

La Tabla N° 18 resume los resultados de los ensayos realizados con el fin de observar la variación del coeficiente de fricción según el deslizamiento paralelo y perpendicular a las fibras de la madera.

Aunque el número de ensayos realizados es bajo, abarcó pocas especies y no amerita una evaluación estadística de los resultados, los valores encontrados no parecen ser diferentes entre sí. Los resultados están de acuerdo a las observaciones realizadas por el autor en un trabajo anterior (64). (Ver anexo 5).

La ausencia de un efecto debido a la orientación del grano de la madera es respaldado por los estudios de Lemoine, McMillin y Manwiller (31) y por McKenzie y Karpovich (41), quienes manifiestan que el comportamiento de μ observado en relación a la orientación del grano, se debe a una similar resistencia al cizalle de las capas exteriores de la pared celular en sentido paralelo y perpendicular a las fibras de la madera.

En los ensayos también se observó un aumento de μ (alrededor del 20%) por efecto de la velocidad de deslizamiento, una disminución aproximada del 8 % por efecto del peso aplicado y una ligera disminución por aumento del peso específico de la madera. En líneas generales, estos valores se encuentran dentro del rango determinado en los ensayos primarios ó principales.

Licencia Creative Commons:

TABLA No. 18 VALORES DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN SEGUN LA DIRECCION DE DESLIZAMIENTO PARALELA Y PERPENDICULAR AL GRANO DE LA MADERA*

E S P E C I E	Vel. 5 cm/min				Vel. 50 cm/min			
	Deslizam. Paralelo		Desliz. Perpendicular		Desliz. Paralelo		Desliz. Perpendicular	
	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.
PESO = 500 GRAMOS								
Saquisaqui	0,187	0,190	0,183	0,179	0,227	0,237	0,218	0,232
Apamate	0,193	0,188	0,190	0,191	0,225	0,219	0,220	0,223
Chupón rosado	0,179	0,178	0,179	0,179	0,217	0,211	0,217	0,217
PESO = 2000 GRAMOS								
Saquisaqui	0,183	0,188	0,185	0,182	0,219	0,212	0,215	0,218
Apamate	0,164	0,166	0,164	0,166	0,189	0,197	0,207	0,207
Chupón rosado	0,162	0,161	0,162	0,161	0,195	0,194	0,197	0,193

* Cada valor representa el promedio de 4 observaciones

4.4.3 Efecto del desliz perpendicular a las estrias del acero.

Los ensayos realizados en dirección perpendicular a las estrias del acero, de acuerdo a los resultados - presentados en la Tabla N° 19, acusaron un aumento en el coeficiente de fricción; el aumento promedio de μ para Saqui-saqui y Chupón fue cerca de un 52 % y para Apamate, alrededor del 57 %. En el deslizamiento perpendicular a las estrias del acero, la madera encuentra una mayor cantidad de obstáculos (picos y valles) que dan lugar a una elevación de μ por aumento de la rugosidad relativa del acero (23) (41).

En este grupo de ensayos también el coeficiente de fricción disminuyó en un 15 % por aumento de la carga aplicada, pero no registró un aumento ó lo hizo levemente en algunos casos, cuando se incrementó la velocidad de deslizamiento. Probablemente, en los ensayos realizados a baja velocidad se haya podido producir un mayor contacto entre la madera y el acero, aumentando el término de deformación; mientras que con una mayor velocidad, si bien se tendría un efecto dinámico más acentuado en la elevación del término de deformación, el de adhesión podría disminuir a causa de un menor contacto madera-acero (efecto de rebote), por la mayor rugosidad del acero. De acuerdo con Marian y Stumbo (33), el mecanismo de adhesión en la fricción por deslizamiento, es más importante que el de deformación.

TABLA No. 19 DATOS DEL COEFICIENTE DE FRICCION SEGUN LA DIRECCION DE DESLIZAMIENTO PERPENDICULAR A LAS ESTRIAS DEL ACERO (RUGOSIDAD 410 μ Pulg. Ra)*

ESPECIE	Vel. 5 cm/min				Vel. 50 cm/min			
	Desliz. Paralelo		Desliz. Perpendicular		Desliz. Paralelo		Desliz. Perpendicular	
	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.
PESO = 500 GRAMOS								
Saquisaqui	0,273	0,273	0,276	0,276	0,271	0,272	0,278	0,276
Apamate	0,291	0,299	0,301	0,299	0,294	0,295	0,294	0,294
Chupón rosado	0,272	0,274	0,279	0,280	0,277	0,281	0,277	0,277
PESO = 2000 GRAMOS								
Saquisaqui	0,235	0,227	0,228	0,231	0,233	0,233	0,233	0,234
Apamate	0,219	0,223	0,227	0,226	0,242	0,242	0,244	0,243
Chupón rosado	0,213	0,216	0,217	0,229	0,248	0,245	0,239	0,254

* Cada valor representa el promedio de 4 observaciones

El deslizamiento intermitente o "stick-slip" se intensificó durante los ensayos con el peso de 2000 g a causa de las mayores fuerzas de fricción y de la rugosidad del acero.

Finalmente, en el desarrollo de las pruebas de deslizamiento se observó un fenómeno que puede estar relacionado con el desgaste; las probetas de Chupón rosado deslizadas en sentido perpendicular a las estrias del acero produjeron algunas leves rayas sobre el metal, las rayas aumentaron ligeramente en número a medida que se desarrollaron los distintos ensayos. Esta observación, aparentemente se debe a la acción de los cristales de sílice presentes en el leño del Chupón, que actuarían sobre el metal a causa de un desgarramiento en la envoltura de goma que cubre los cristales. El desgarramiento podría ser ocasionado por los picos de la superficie del acero.

Durante los deslizamientos paralelos a las estrias del acero no se pudieron detectar rayas producidas por los granos de sílice, debido a que se confunden con las rayas ocasionadas por el pulido del metal.

Con el fin de indagar más sobre el fenómeno de rayado o abrasión del acero, se hicieron algunas observaciones en la superficie de roce de las probetas ya ensayadas, con la ayuda de un microscopio estereoscópico. La observación tenía por finalidad detectar la presencia de los cristales pero no se tuvo éxito en el cometido. Ante la posibilidad de que los depósitos silíceos podrían desprenderse de la superficie de madera, se tomó una

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

probeta de Chupón Rosado, se golpeó suavemente la cara de roce con un lápiz encima de un portaobjetos de vidrio y se observó el portaobjetos en el microscopio. Numerosos cristales silíceos y de otros tipos se desprendieron de la superficie de madera y podían verse sobre el portaobjetos.

Los cortes anatómicos realizados en la parte superficial de las caras de roce permitieron ver la presencia de los cristales cubiertos de goma.

Finalmente, tratando de detectar algunas rayas ocasionadas por los cristales de sílice durante el corte de Chupón, se montó un diente nuevo de sierra circular, en el disco de ensayos de desgaste (26 cm de diámetro) existente en la División de Aserrío del Laboratorio Nacional de Productos Forestales. El diente tenía un ángulo de hierro de 40° , un ancho de filo de 8,5 mm y trabaja con un ángulo de corte de 40° . El disco se hizo girar a 1800 RPM y se cortó una muestra de Chupón seca al aire de 4 cm de espesor a una velocidad de alimentación de 1,3 m/min. (espesor de viruta: 0,7 mm).

Luego de cada corte, el filo del diente era observado en un microscopio estereoscópico 15X con objeto de detectar el efecto producido en el diente. Sin embargo luego de cortarse una longitud de 5,3 metros aún no se vió ninguna raya que podría ser atribuida a la acción de los depósitos silíceos, pese a que el diente denotaba un elevado desgaste y se dificultaba el corte por excesiva vibración de la máquina.

Durante el corte de madera, la zona de fricción madera-acero está restringida en un área circundante delante del diente (26) (42) lo cual supone que el rayado del metal se efectivizaría en una franja muy pequeña. Probablemente el número elevado de rayas originadas en la zona de fricción del diente, conjuntamente con deslizamientos superficiales del metal debido a las altas temperaturas localizadas en el filo de la herramienta (48) hayan podido causar una invisibilidad de las rayas.

De todos modos, es posible que se tenga un fenómeno similar al observado en los ensayos de deslizamiento perpendicular a las estrías del acero; por lo general las herramientas de corte de madera tienen un acabado con una rugosidad elevada, lo cual originaría elevados coeficientes de fricción (23) (41), y los cristales silíceos aumentarían la magnitud de su acción (rayado o desgaste) por las elevadas fuerzas originadas durante el corte (26).

4.4.4 Fricción a elevadas velocidades

Los resultados obtenidos en los experimentos de fricción a elevada velocidad (4900 cm/min) están resumidos en la Tabla N° 20.

Los valores de la fuerza normal y de fricción fueron obtenidos a través de las curvas de calibración (o relación carga-deformación) detalladas en la figura N° 11

Tabla N° 20 Resultados de los ensayos de fricción realizados en el torno (velocidad de deslizamiento = 4900 cm/min)

Espece	Ensayo N°	Fuerza normal. Kg.	Fuerza Fricción Kg	μ
<u>Saqui-saqui</u>	1	19,9	5,6	0,281
<u>Bombacopsis</u>	2	19,9	5,9	0,297
<u>quinata</u>	3	33,0	7,4	0,224
<u>Apamate</u>	1	26,4	7,4	0,279
<u>tabebuia rosea</u>	2	33,0	7,4	0,224
	3	98,4	17,6	0,179
<u>Carne Asada</u>	1	26,4	8,1	0,307
<u>Hieronyma</u>	2	39,5	9,9	0,251
<u>laxiflora</u>	3	46,1	11,0	0,239
<u>Chupón Rosado</u>	1	26,4	7,7	0,293
<u>Ponteria anbi</u>	2	46,1	10,3	0,223
<u>folia.</u>	3	52,6	10,3	0,196
<u>Perhuétamo</u>	1	26,4	7,4	0,279
<u>Mouriri bari-</u>	2	46,1	12,5	0,271
<u>nensis.</u>	3	98,4	19,8	0,201

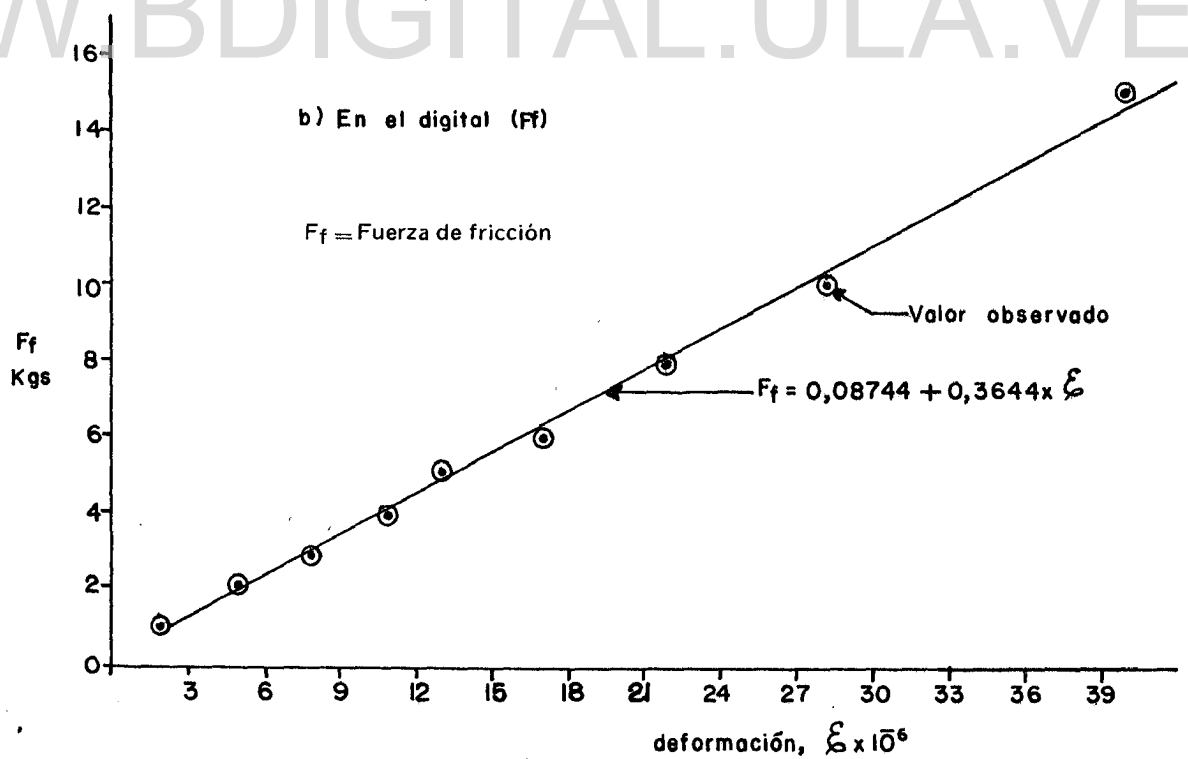
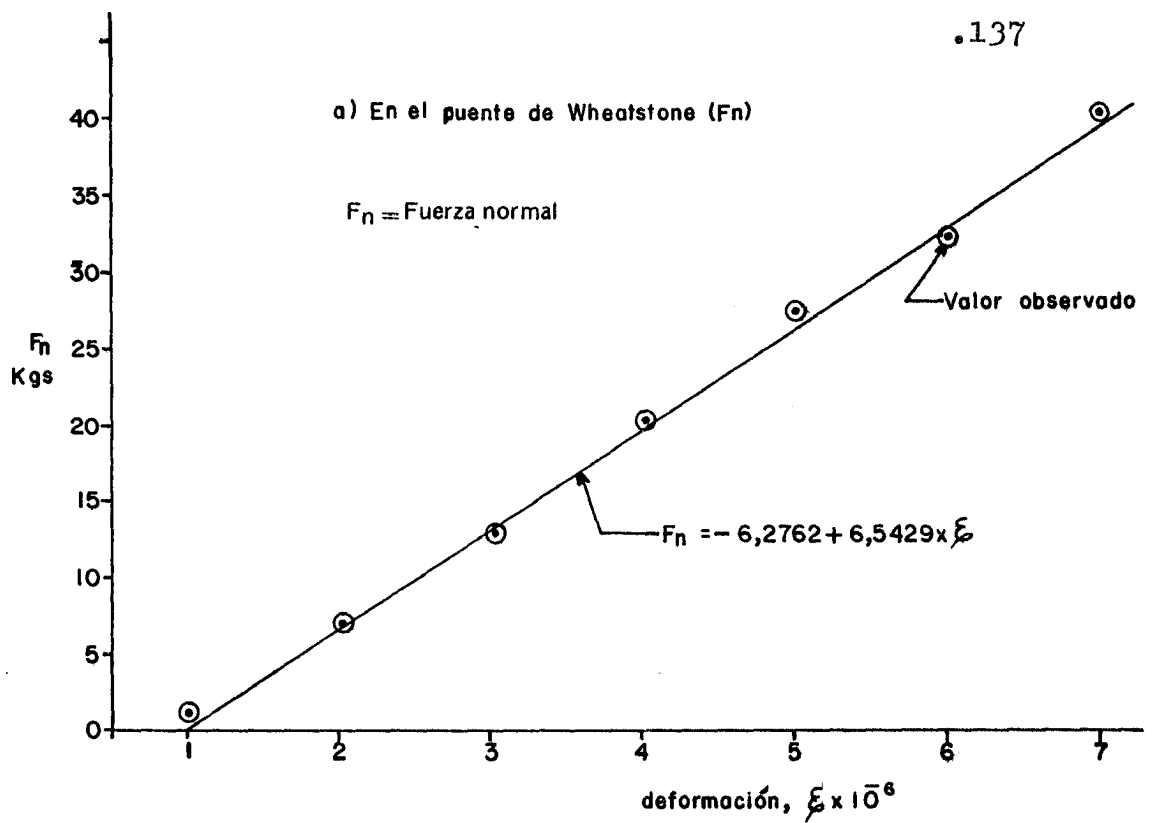


Fig. No. 11 Relación carga-deformación encontrada

Pese a los cuidados puestos en lograr valores uniformes de la carga normal en todos los ensayos, se registraron fuerzas normales diferentes lo cual permite apreciar que el control de la fuerza normal a través de las divisiones del carro portacuchillas no es exacto; sin embargo los resultados obtenidos permiten hacer observaciones del cambio de μ por variaciones de la fuerza normal.

En general los resultados fueron ligeramente superiores a los registrados en los ensayos primarios, a causa del aumento en la velocidad de deslizamiento y concuerdan con los resultados encontrados por McKenzie y Karpovich (41) usando similar metodología.

Dentro de cada especie se observó una notoria disminución de μ con el aumento de la carga normal, verificándose de esta manera los resultados obtenidos en los ensayos primarios. La figura N° 12 muestra gráficamente la variación del coeficiente de fricción con la carga normal.

Los ensayos realizados en el torno tuvieron un carácter exploratorio, fundamentalmente por razones de tiempo. Por ello, una cuantificación confiable del efecto de las variables carga normal y velocidad de deslizamiento (entre otras) sobre μ , requiere un estudio con mayor número de observaciones. Sin embargo, es importante ver que el sistema de estudio de la fricción a través del torno (empleada por McKenzie y Karpovich), no con -

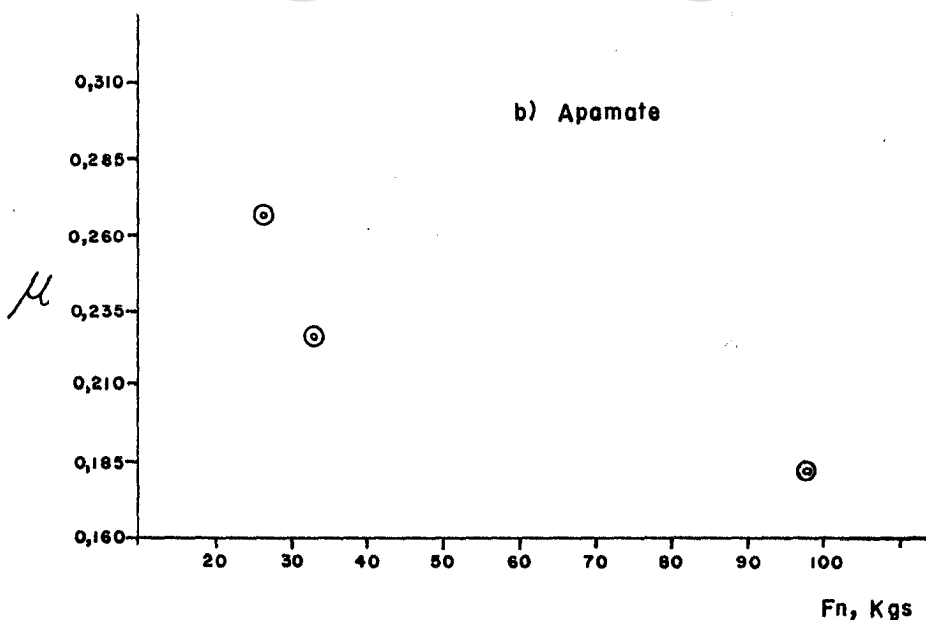
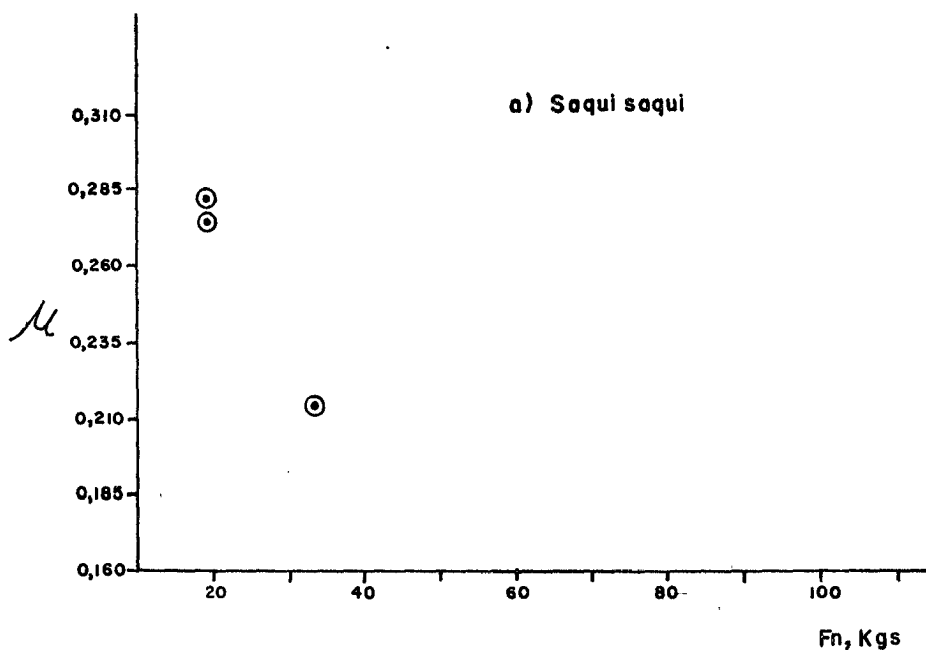
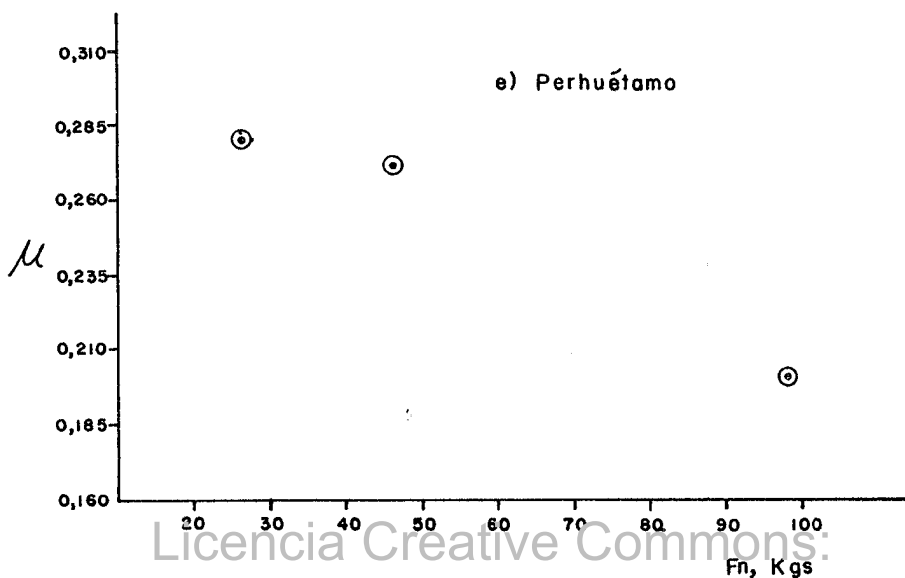
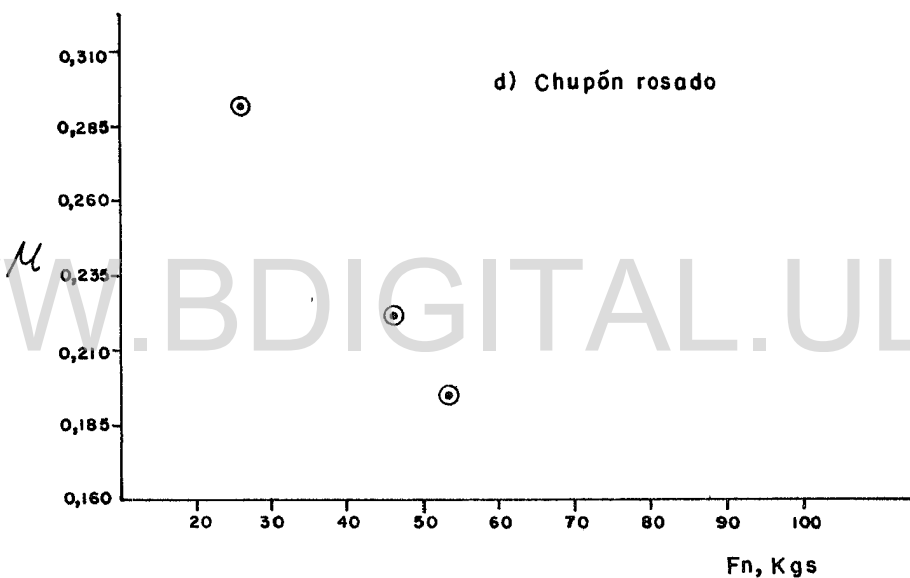
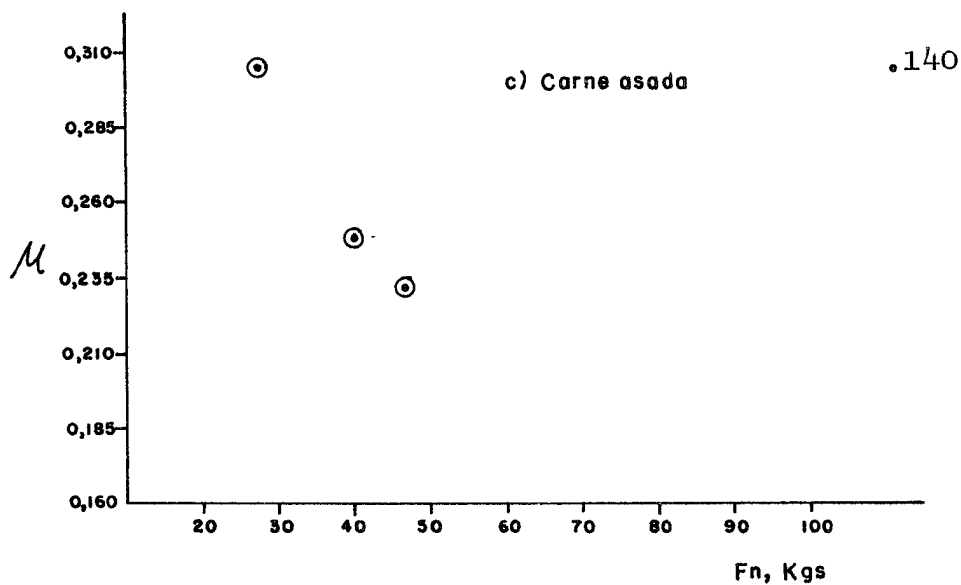


Fig. No. 12 Variación del coeficiente de fricción (μ) con la Fuerza normal (F_n) para los ensayos realizados en el torno



Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

templa las mismas condiciones básicas de trabajo de la metodología practicada por Lemoine, McMillin y - Manwiller (31). En el torno la fuerza de fricción se determina en una misma zona de la madera, que sufrió compactaciones y posibles transformaciones superficiales a causa de las temperaturas elevadas originadas durante los ensayos. En el sistema de trabajo de Lemoine y colaboradores se toman en cuenta superficies nuevas (o renovadas) de madera en cada ensayo de determinación de la fuerza de fricción a través de la máquina INSTRON.

De manera general, los resultados del coeficiente de fricción encontrados a través de las dos metodologías mencionadas anteriormente, son parecidos; de ser evidente esto, significaría que la compactación de la madera durante los ensayos de deslizamiento, y por tanto la rugosidad superficial de la madera tendrían poco efecto sobre el coeficiente de fricción. Los citados aspectos ameritan la realización de comprobaciones prácticas de determinación de μ por las dos metodologías, tomando en cuenta principalmente las variables: longitud recorrida en una pista de madera, diámetro del cilindro, temperatura de la interfaz, número de vueltas durante el giro y forma de presión a aplicar durante el deslizamiento.

4.5 IMPLICACIONES PRACTICAS DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el presente trabajo por sí solos no son suficientes para hacer recomendaciones prácticas precisas del uso de la madera en fricción; fundamentalmente se requieren otros estudios complementarios.

tarios para investigar algunos fenómenos vinculados al rozamiento como ser el desgaste o abrasión de la madera en sus tres planos de corte (radial, tangencial y transversal) y el desgaste de la superficie metálica ocasionada por la madera o por productos contenidos en ella. Por ello se mencionan sólo algunas implicaciones prácticas de los resultados del coeficiente de fricción determinados en el presente estudio.

En primer lugar, la igualdad de comportamiento del coeficiente de fricción en las caras radial, tangencial y transversal, y en sentido paralelo y perpendicular al grano sugiere la posibilidad de emplear en procesos de roce sin importar la orientación del corte de la madera. Esto puede constituir un aspecto favorable para la producción en gran escala de algunas piezas como por ejemplo cojinetes o asientos de ejes mencionados por Kollmann (27) y lanzaderas de madera.

El comportamiento de μ ante el peso normal aplicado sugiere la posibilidad del empleo de madera en condiciones donde sea importante evitar el desgaste prematuro del metal. Teniendo en cuenta que el desgaste de los metales puede ocurrir por adhesión, abrasión, corrosión y fatiga superficial (36), la excepción en esta forma de uso constituirían las maderas con contenidos silicosos y con exceso de extractivos corrosivos en su leño. Las maderas con sílice probablemente causen desgaste por abrasión, mientras que las maderas que contienen sustancias corrosivas en su leño pueden ocasionar un ataque químico a los metales (herramientas de corte) y un desgaste por corrosión (18).

En el Laboratorio Nacional de Productos Forestales se ha observado que luego de cortar un cierto número de rolas de Saqui-saqui, se produce un adelgazamiento en el cuerpo del diente (sierra ciente), en una zona comprendida entre la garganta y el filo del diente; el adelgazamiento o disminución del espesor de la lámina, es atribuido a un efecto de desgaste causado por los extractivos de la madera de Saqui-saqui (48).

La elevación de μ con la velocidad de deslizamiento, suponen que el empleo de la madera puede ser adecuada en algunos sistemas de frenos; pero, este aspecto requiere la consideración complementaria de otros factores que influyen en ese proceso de uso de la madera y el desarrollo de una metodología de estudio apropiada.

Mayor número de investigaciones sobre el coeficiente de fricción, especialmente con orientación hacia la aplicación práctica, evidentemente deberán aportar en el futuro un mayor nivel de utilización de la madera en función de sus propiedades o características de fricción.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Los valores del coeficiente de fricción (μ) determinados en el presente estudio, están dentro del rango de valores proporcionados por la bibliografía especializada.
- Según observaciones realizadas en madera de Hieronyma laxiflora (Tul.) Muell, Arg. (Carne Asada), la aplicación de 8 tratamientos en una misma probeta proporciona resultados similares de μ con los obtenidos aplicando 1 tratamiento por probeta.
- No se detectaron diferencias significativas en el coeficiente de fricción debidas a la variable plano de roce de la madera (radial y tangencial), ni a la interacción de esta variable con la velocidad de deslizamiento y la carga aplicada.
- Un aumento en la velocidad de deslizamiento y en la fuerza normal, ocasionaron respectivamente un aumento y una disminución de μ significativos al 1%. La interacción entre las variables velocidad y peso fue significativa (al 5%) solamente en muestras de Apamate (Tabebuia rosea Bertol.) DC.
- La relación entre el coeficiente de fricción y el peso específico básico (Peb.) de las seis especies, se

ajustó a una parábola de segundo grado. En el caso de la aplicación del peso 500 g., la tendencia de μ fue decreciente ante aumentos relativos del Peb. Para el peso 2000 g., la curva se tornó ligeramente creciente.

- El tratamiento de extracción de la madera con solventes orgánicos, disminuye de manera altamente significativa el coeficiente de fricción de las muestras de Aceite - Cabimo (Copaifera pubiflora Benth.):
- El plano de roce de la madera no afecta significativamente el μ de Aceite Cabimo.
- Algunas observaciones adicionales dieron evidencia de un aumento de μ deslizando la madera perpendicularmente a la orientación de las estrias del acero.

El sentido del grano no parece afectar el coeficiente de fricción.

- Los ensayos realizados a elevada velocidad de giro proporcionaron resultados de μ semejantes a los realizados a baja velocidad de deslizamiento horizontal. Se evidenció una tendencia decreciente de μ con el aumento de la carga normal aplicada a la muestra de ensayo.

5.2 RECOMENDACIONES

- Encarar estudios tendientes a cuantificar el daño que podría causar en la pared celular, la punta de zafiro

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

del palpador durante las mediciones de rugosidad superficial de la madera.

- Realizar trabajos de verificación de resultados de μ por las dos metodologías de estudio: velocidad de giro elevada (Mckenzie-Karpovich) y velocidad de deslizamiento horizontal baja (Lemoine McMillin-Manwiller). Fundamentalmente considerar los parámetros longitud recorrida en la madera, número de vueltas, temperatura de la interfaz, rugosidad de la madera y formas de aplicación de la presión durante el ensayo.
- Estudiar el fenómeno de deslizamiento intermitente o "stick-slip" con mayor profundidad, destacando el patrón de variación que podría caracterizar a las diferentes especies, según el perfil de variación de la fuerza de fricción durante el deslizamiento.
- Encarar estudios del coeficiente de fricción durante el corte de madera orientados, tanto hacia el mejor conocimiento de los factores que lo afectan, como también hacia la optimización del corte de maderas tropicales.
- Profundizar estudios acerca del efecto que pueden ocasionar la cantidad y tipo de extractivos de la madera en comportamiento friccional de ésta. Asimismo, considerar en futuros trabajos de ésta área, el efecto de otras variables no contempladas en la bibliografía tales como: tipo de grano (entrecruzado, ondulado, recto, etc), proporción de tejido parenquimático presente en los planos de roce y abrasividad de la madera.

- Investigar los fenómenos estrechamente vinculados al roce madera-acero como ser: el desgaste de la madera según sus planos de corte radial, tangencial y transversal, y el tipo de desgaste ocasionado en el acero por la madera. Sería de gran valor práctico analizar el efecto que podría causar la textura y la estructura anatómica de la madera en las superficies metálicas.
- Es necesario que en futuras investigaciones de fricción, se exploren nuevos campos de utilización de la madera en función de sus características de roce; actualmente los usos de la madera en fricción están restringidos principalmente a cojinetes o asientos de ejes, zapatas para frenos de automotores y lanzaderas de madera.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

BIBLIOGRAFIA

1. ALEXANDER J. M. AND R.C. BREWER; 1968. Manufacturing properties of materials, Vand Nostrand, London.
2. AMOS G.L.; 1952. Silica in timber. OSIRO, Bull. N° 267, Australia.
3. ANONIMO; 1969. Lubricants aids planing of oak blocks. Wood, 34 (5): 31.
4. ATACK D. AND D. TABOR; 1960. The friction of wood. For. Abst. N° 2304, vol. 21
5. AYMARD P.; (comunicación personal)
6. BODIG J.; 1968. Transverse mechanical properties of Douglas fir treated with organic liquids. Part I. Holzforschung, 22(2): 44-50.
7. _____; 1968. Transverse mechanical properties of Douglas fir treated with organic liquids. Part II. Holzforschung, 22 (3): 69-77.
8. BOWDEN F. P.; 1957. Adhesión y fricción. Endeavour, 16(61): 5-18.
9. _____; AND D. TABOR; 1954. The friction and lubrication of solids. The Clarendon Press, Oxford.
10. _____; AND _____; 1967. Friction and lubrication. Methuen, London.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

11. CAUBET J.J.; 1971. Teoría y práctica industrial del rozamiento. Ed. Urmo, Bilbao.
12. COROTHIE H.; 1967. Estructura anatómica de 47 maderas de la Guayana venezolana y clave para su identificación. L.N.P.F., Mérida.
13. CORPORACION NACIONAL FORESTAL; 1976. Chile Forestal, periódico mensual, N° 7, CONAF, Santiago.
14. ELMENDORF A. AND T.W. VAUGHAN; 1958. Survey of methods of measuring smoothness of wood. For. Prod. J. 13 (10); 275-282.
15. FOREST PRODUCTS LABORATORY; 1964. Wood handbook. Agriculture handbook N° 72. U.S. Department of Agriculture, Washington.
16. HANN R.A.; 1957. A method of quantitative topographic analysis of wood surfaces. For. Prod. J. 7 (12): 448-452.
17. HERRERA J.A., E. BARRERO Y A. HERRERA; 1976. Zapatas de maderas mexicanas para el sistema de frenos del "metro". En Ciencia Forestal, Inst. Nacional de Investigaciones Forestales. México, 1(1):30-41.
18. HILLIS W.E. AND W.M. MCKENZIE; 1964. Chemical factors in wear of woodworking cutters. For. Prod. J. 14(4): 166.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

19. HOHEISEL H.; 1968. Estipulaciones para los ensayos de propiedades físicas y mecánicas de la madera. Instituto Forestal Latinoamericano, Mérida.
20. JANOV V.; 1963. Investigations on the antifriction properties of machine parts made of wood wastes. For. Abst. N° 2838.
21. JUNEJA S.C.; 1975. Combustion of cellulosic materials and its retardance - status and trends, Part I. Wood Sci. 7(3): 201-208.
22. JURESIC A.; 1966. Basic principles of adhesion - A survey. TAPPI 49(7): 303-310.
23. KLAMECKI B.E.; 1976. Friction mechanism in wood cutting. Wood Scie. and Techn. 10(3): 209-214.
24. _____; 1977. Forces in the ortogonal cutting of rootwood and stemwood from a Ponderosa pine tree. For. Prod. J. 27(11): 26-27.
25. KNUDSON R. M. AND A.P. SCHNIEWIND; 1972. Effect of organic solvents on wood-steel friction. Wood Sci. 5(2):153-160.
26. KOCH P.; 1964. Wood machining processes. Ronald, New York.

27. KOLLMANN F.; 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Instituto Forestal de Investigaciones y Exp., Madrid.
28. _____ AND W.A. COTE; 1968. Principles of wood science and technology. Vol. I. Springer-Verlag, New York.
29. LABORATORIO NACIONAL DE PRODUCTOS FORESTALES; 1972. Estudio Tecnológico de 104 maderas de los Altos Llanos Occidentales, L.N.P.F., Mérida.
30. _____; Datos no publicados.
31. LEMOINE T.J., C.W. McMILLIN AND F.G. MANWILLER; 1970. Wood variables affecting the friction coefficient of Spruce pine on steel. Wood Sci. 2(3):145-148.
32. _____ AND P. KOCH; 1975. Coefficient of friction of dry Slash pine and Southern red oak on three tension-grip facings. Wood Sci. 7(3): 182-184.
33. MARIAN J. E. AND D.A. STUMBO; 1962. Adhesion in wood. Part. I Holzforschung, 16(5): 134-148.
34. _____ AND _____; 1962. Adhesion in wood. Part II. Holzforschung, 16 (6): 69-77.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

35. _____; 1966. Surface properties as physico-chemical phenomena. *Holzforschung*, 20(3): 91-101.
36. McCLINTOCK F.A. AND A.S. ARGON; 1966. Mechanical behaviour of materials. Addison-Wesley, Mass.
37. McKENZIE W.M. AND N. FRANZ; 1964. Basic aspects of inclined or oblique wood cutting. *For. Prod. J.* 14(12): 555-556.
38. _____; 1965. The effects of edge bluntness in the cutting of wood. Proceedings of IUFRO's meeting held at Division of Forest Products, CSIRO, Melbourne.
39. _____; 1965. Woods as a material to cut- the basic requirements of cutting devices. Proceedings of IUFRO's meeting held at División of Forest Products, CSIRO, Melbourne.
40. _____; 1967. Friction in wood cutting. *For Prod. J.* 17(11): 38-43.
41. _____ AND H. KARPOVICH; 1968. Frictional behaviour of wood. *Wood Sci. and Techn.* Vol. 2: 132-152.
42. _____ AND _____; 1975. Wear and blunting of the tool corner in cutting a wood-based material, *Wood Sci. and Techn.* 9(1): 59-73.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

43. McMILLIN C.W.; 1958. The relation of mechanical properties of wood and nosebar pressure in the production of veneer. For Prod. J. 8(1): 23-32.
44. _____, T.J. LEMOINE AND F.G. MANWILLER; 1970. Friccion coefficient of oven-dry Spruce pine on steel as related to temperature and wood properties. Wood and Fib. 2(1): 6-11.
45. _____. _____ AND _____; 1970. Friction coefficient of Spruce pine on steel. A. note on lubricants. Wood Sci. 3(2): 100-101.
46. MOLER K. AND G. MAIER; 1969. The coefficient of friction of spruce pine timber in view of the efficiency of timber-connections using frictional resistance. Holz a. Roh. u. Werkstoff 27(8): 303-307.
47. MOORE D.F.; 1972. The friction and lubrication of elastomers. Pergamon Press. Oxford.
48. NININ L.; (Comunicación personal).
49. OSTLE B.; 1968. Estadística aplicada. Limusa-Wiley, Mexico.
50. PANSHIN A. J. AND C. DE ZEEUW; 1970. Textbook of wood technology, Vol. I. McGraw-Hill. New York.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

51. PEREZ A.; 1974. Identificación macroscópica de algunas maderas de los Llanos Occidentales de Venezuela. Escuela de Ingeniería Forestal, Mérida.
52. PETERS C.C. AND J.D. CUMMING; 1970. Measuring wood smoothness: a review. For Prod. J. 20(21): 40-43.
53. RECORD S.J. AND R.W. HESS; 1949. Timbers of the new world. Yale University Press. New Haven.
54. RESNICK R. Y D. HALLIDAY; 1974. Física, Vol. I. Ed. CECSA. México.
55. SAVARD J., A. BESSON ET S. MORIZE; 1954. Analyse Chimique des bois tropicaux. C.T.F.T., Nogent-Sur-Marne-France.
56. SKAAR C.; 1972. Water in wood. Syracuse Wood Science Series 4, Syracuse University Press, New York.
57. STAMM A.J.; 1964. Wood and cellulose science. Ronald, New York.
58. STEWART H.A.; 1969. Effect of cutting direction with respect to grain angle on the quality of machined surface, tool force components and cutting friction coefficient. For. Prod. J. 19(3): 73-76.

59. _____; 1977. Optimun rake angle related to rake angle related to selected strength properties of wood. For. Prod. J. 27(1): 51-53.
60. STRANEO S.L. y R CONSORTI; 1965. El dibujo técnico mecánico. Ed. UTHEHA, Barcelona.
61. STUMBO D.A.; 1960. Surface texture measurements for quality and production control. For. Prod. J. 10(2): 122-124.
62. TABOR D.; 1975. Interacción between surfaces; adhesion and friction. In: Surface physics of materials. Vol II by J.M. Blakely (Ed.). Materials Science Series. Academic Press, New York.
63. VAN DER SLOOTEN H. J. y P. MARTINEZ; 1959. Descripción y propiedades de algunas maderas venezolanas. Instituto Forestal Latinoamericano, Mérida.
64. VISCARRA S.; 1979. Observaciones sobre algunas variables que afectan el coeficiente de fricción de la entrecara madera-acero. Trabajo Especial. Centro de Estudios Forestales de Postgrado, Mérida.
65. _____ Y M. PAREDES; 1979. Remoción de extractivos de la madera y su influencia en la adhesividad de dos tipos de cola. Trabajo Especial, Centro de Estudios Forestales de Postgrado, Mérida.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

A N E X O S

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ANEXO 1. RESUMEN DE LOS PROGRAMAS EMPLEADOS EN EL
PROCESAMIENTO DE DATOS

1. PROGRAMA PARA EL ANALISIS DE VARIANZA (EJ. SUN SUN).-

DATA SUN_SUN;

INPUT ESPECIE \$ ARBOL\$ CARA \$ PESO VELOCIDAD COEFRIC CH
PESOEESPE; CARDS;

.
.
.

PROC ANOVA; CLASS CARA PESO VELOCIDAD; MODEL COEFRIC=CARA
PESO VELOCIDAD CARA x PESO CARA x VELOCIDAD PESO x VELOCIDAD CARA x
PESO x VELOCIDAD;

TITLE ANALISIS DE VARIANZA PARA DATOS DEL COEFICIENTE DE
FRICCIÓN CORRESPONDIENTES A SUN SUN;

2. PROGRAMA PARA EL ANALISIS DE REGRESION Y CORRELACION;

DATA REGRES;

INPUT ESPECIE \$ ARBOL \$ X1-X8 CH PESOEESPE;

LABEL X1=TRATAMIENTO 1 X2=TRATAMIENTO 2 X3=TRATAMIENTO 3
X4=TRATAMIENTO 4 X5=TRATAMIENTO 5 X6=TRATAMIENTO 6 X7=TRA-
TAMIENTO 7 X8=TRATAMIENTO 8 PESOEESPE=PESO ESPECIFICO BASI-
CO;

CARDS;

.
.
.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

```
PROC GLM: MODEL X1=PESOEESPE . PESOEESPExPESOEESPE /P;  
TITLE ANALISIS DE REGRESION DE SEGUNDO GRADO ENTRE EL  
COEFICIENTE DE FRICCION Y EL PESO ESPECIFICO BASICO;
```

.
.
.

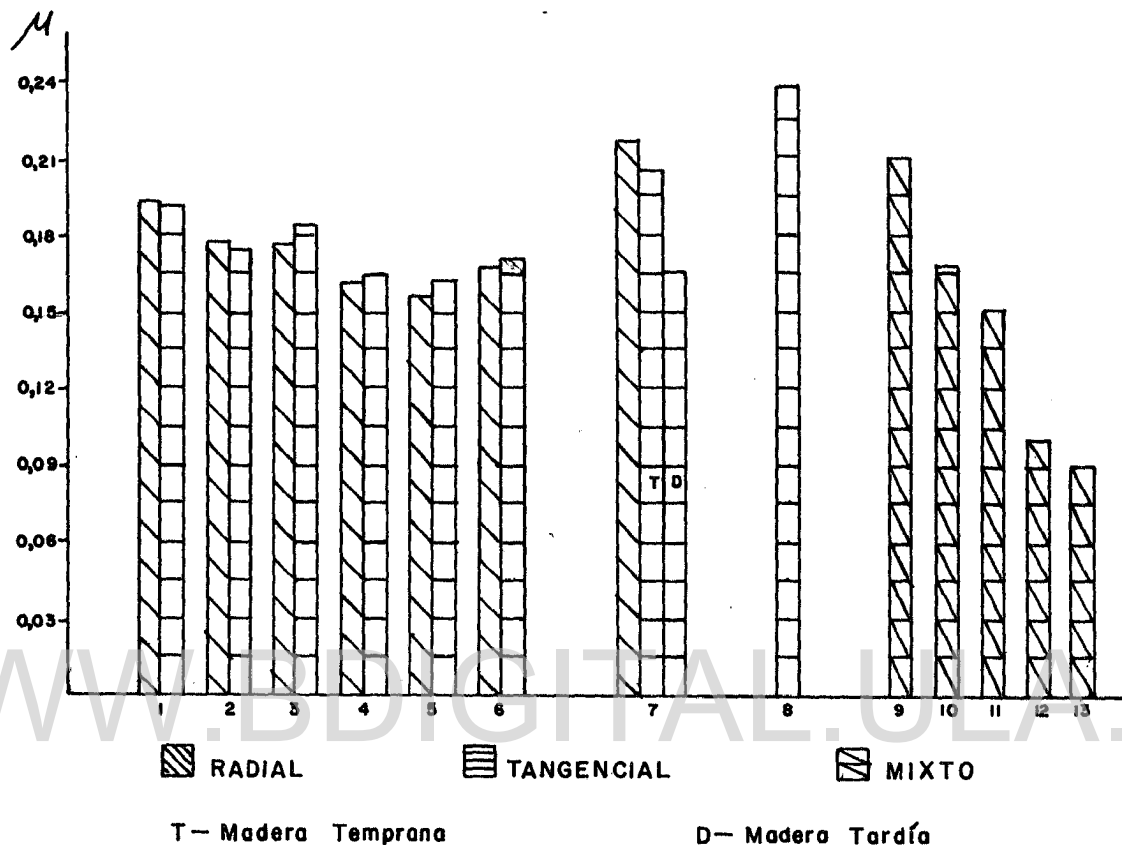
```
PROC GLM; MODEL x8=PESOEESPE ` PESOEESPExPESOEESPE/P;
```

```
PROC CORR; VARIABLES X1-X8; WITH CH;
```

```
TITLE ANALISIS DE CORRELACION LINEAL SIMPLE ENTRE LOS  
8 TRATAMIENTOS EN ESTUDIO Y EL CONTENIDO DE HUMEDAD;
```

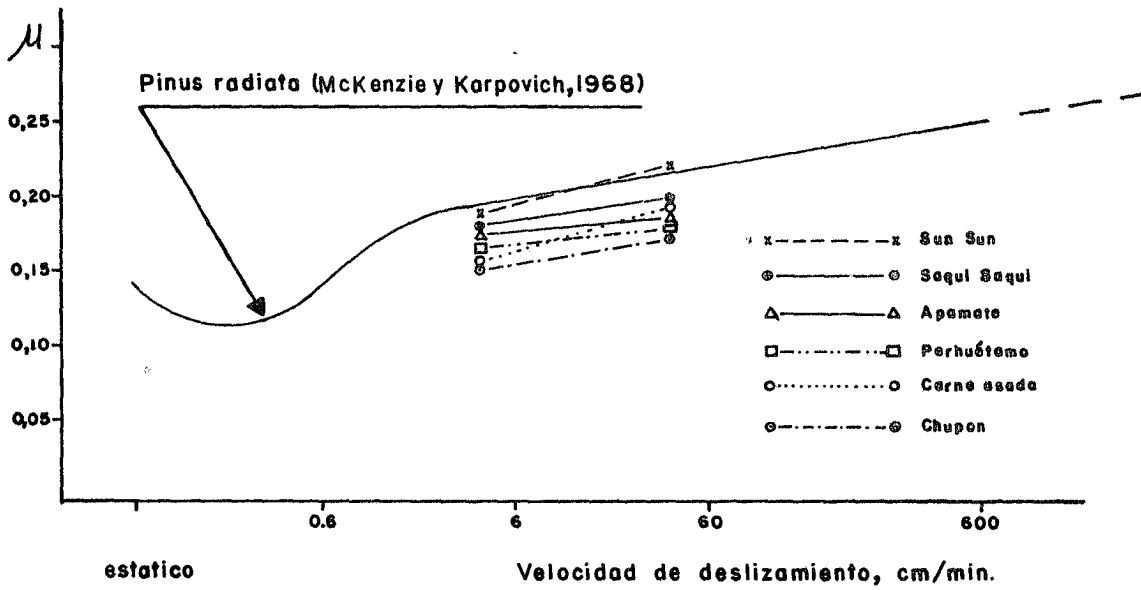
WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ANEXO 2. COMPARACION DE VALORES DE μ CON LOS MENCIONADOS POR LA BIBLIOGRAFIA



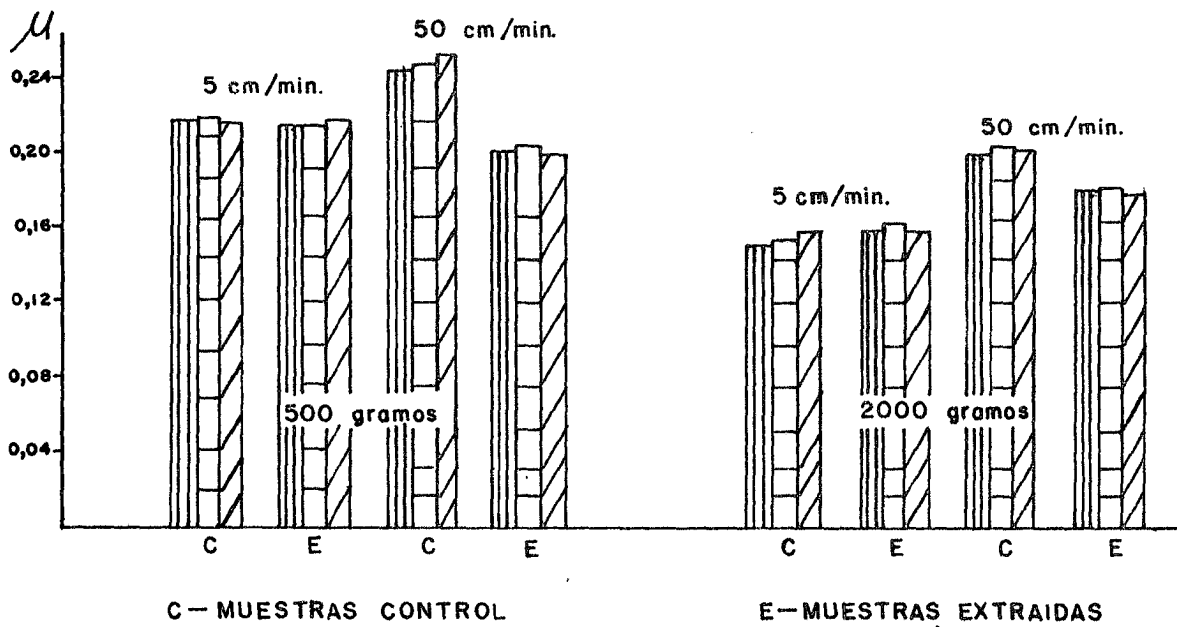
- 1- *Didymopanax morototoni*
- 2- *Bombacopsis quinata*
- 3- *Tabebuia rosea* PRESENTE TRABAJO
- 4- *Hieronyma laxiflora*
- 5- *Puteria anibifolia*
- 6- *Mouriri barinensis*
- 7- *Pinus glabra* — Lemoine, McMillin y ManWiller (1970)
- 8- *Pseudotsuga menziesii* — Knuson y SchnieWind (1972)
- 9- *Picea glauca*
- 10- *Eucalyptus obliqua*
- 11- *Eucalyptus maculata* McKenzie y Karpovich (1968)
- 12- *Eucalyptus microcorys*
- 13- *Guaiacum officinale*

ANEXO 3. RELACION μ - VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO



ANEXO 4. VALORES DE μ OBTENIDOS EN ACEITE CABIMO

▨ - RADIAL ▨ - TANGENCIAL ▨ - TRANSVERSAL

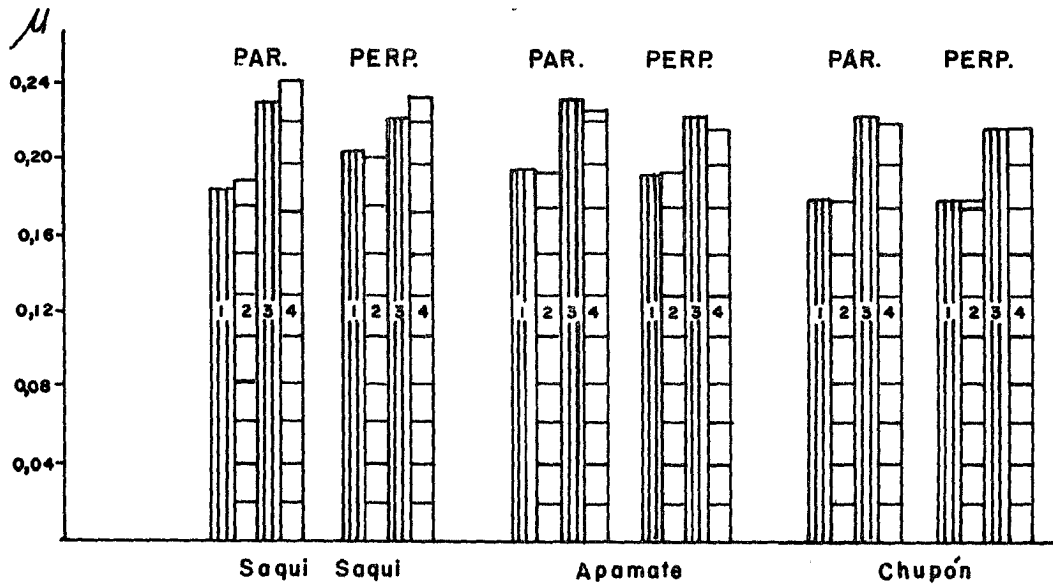


Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ANEXO 5. DESLIZAMIENTO PARALELO Y PERPENDICULAR AL GRANO DE LA MADERA

a) Peso: 500 g.

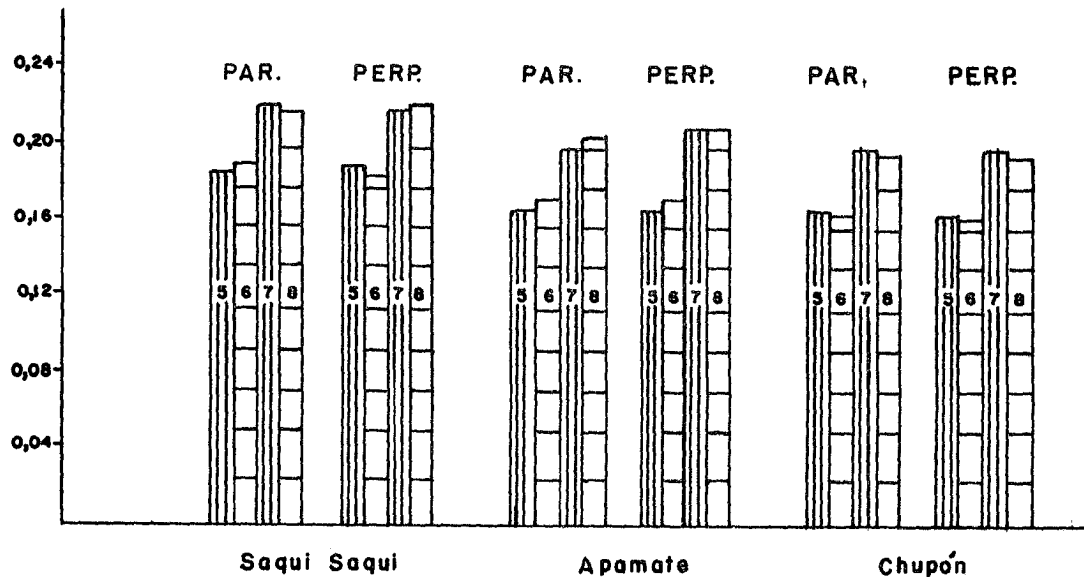


REFERENCIAS: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 - NUMERO DE TRATAMIENTO

▨ RADIAL

▨ TANGENCIAL

b) Peso: 2000 g.

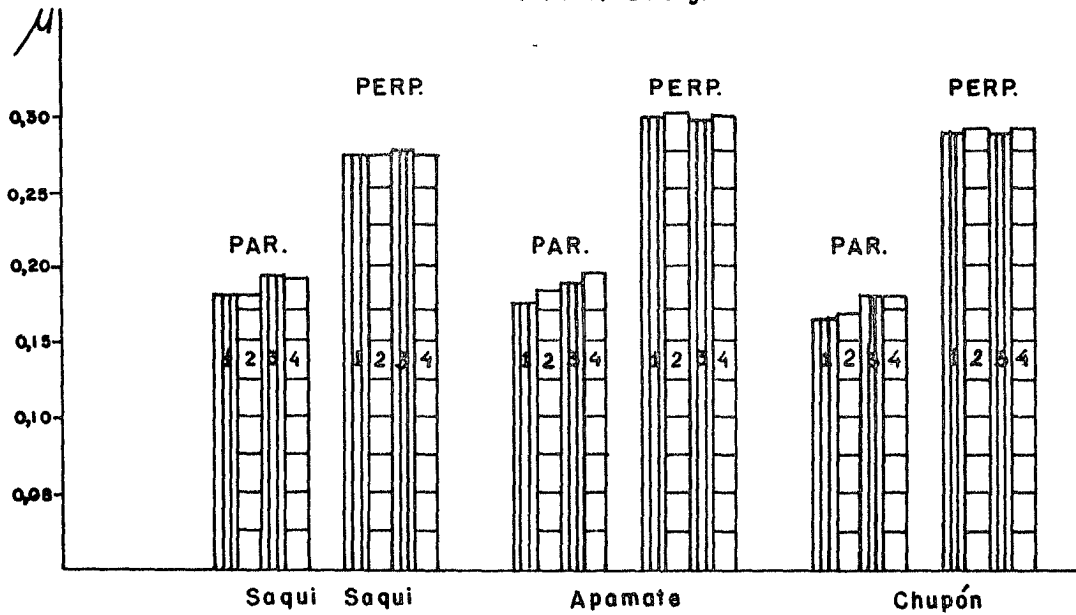


Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ANEXO 6. DESLIZAMIENTO PARALELO Y PERPENDICULAR A LAS ESTRIAS DEL ACERO

a) Peso: 500 g.

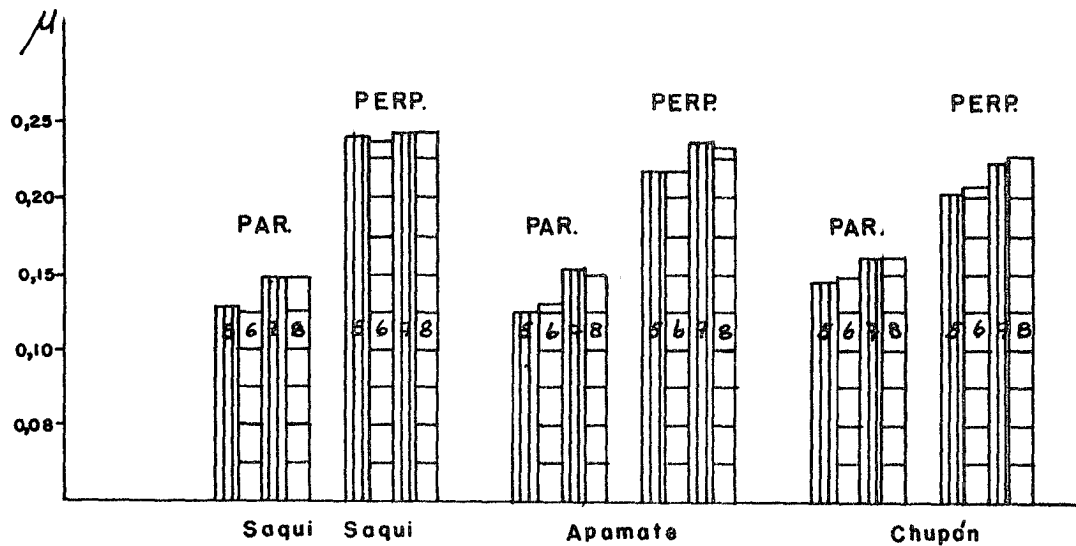


REFERENCIAS: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 - Número de tratamiento

▨ RADIAL

▨ TANGENCIAL

b) Peso: 2000 g.



Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

BIOGRAFIA DEL AUTOR

El autor nació el 19 de diciembre de 1949 en la ciudad de Tarija, República de Bolivia. Cursó estudios primarios y secundarios en el Colegio "Antoniano" de la misma ciudad. Realizó sus estudios profesionales (1969 - 1975) en la Universidad "Juan Misael Saracho" de Tarija donde obtuvo el título de Ingeniero Forestal. Encargado de Control de Proyectos del Servicio Nacional de Desarrollo de Comunidades (1975-1976). Investigador del Centro de Desarrollo Forestal de Bolivia, La Paz. Responsable de los estudios de Propiedades Físicas de la Madera en los Proyectos Andinos de Desarrollo Tecnológico en el área de los Recursos Forestales Tropicales (PADT-REFORT), entre 1976 y 1977. Ingresó al Centro de Estudios Forestales de Postgrado de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, en el Curso de Tecnología de Productos Forestales en Enero de 1978 y egresó en Junio de 1980.