
La ingeniería de materiales. Síntesis documental aplicada al procesamiento primario de la madera con énfasis en las sierras de cintas

The materials engineering. Documentary synthesis applied to primary wood processing with emphasis on the bandsaws

Jhonattan Trejo*; Ramón Tolosa**; Pablo Ninin***; Carlos Bloem****y Roberto Gil*****

Recibido: 29-05-2012

Aceptado: 26-05-2014

Resumen

Se realizó una síntesis documental sobre los diversos materiales empleados en la industria del aserrío, una reseña histórica de la evolución de los materiales comúnmente empleados en las herramientas de corte. Se realizaron descripciones y comparaciones de las exigencias a las cuales serán sometidos con especial énfasis sobre los tratamientos y técnicas ejercidas para incrementar sus prestaciones mecánicas y tribológicas, detallando sobre los diferentes fenómenos ocurridos en cada situación. Se desglosaron las principales aleaciones metálicas que conforman las sierras de cintas para el procesamiento primario de la madera, las aleaciones y carburos empleados como materiales de refuerzos sobre los dientes, los tratamientos superficiales y los tratamientos térmicos más usuales a los cuales pueden acceder los aserraderos para obtener beneficios adicionales en sus herramientas de corte.

Palabras clave: Herramientas de corte, aserrado, madera, ingeniería de materiales, tratamientos térmicos, desgaste.

*Ingeniero Forestal. M.Sc. Ingeniería Mecánica Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Profesor Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio Nacional de Productos Forestales (LNPF-ULA). Correo E.: tjhonattan@ula.ve

**Ingeniero Mecánico. M.Sc. Ciencia de los Materiales. Universidad Central de Venezuela. Profesor Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Grupo de Pulvimetalurgia (GPM). Correo E.: tolosa@ula.ve

***Ingeniero Forestal. M.Sc. Tecnología de Productos Forestales. Universidad de Los Andes. Profesor Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio Nacional de Productos Forestales (LNPF-ULA). Correo E.: ninin@ula.ve

****Ingeniero Mecánico. PhD. Universidad Politécnica de Valencia. Profesor Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Grupo de Diseño y Modelado de Maquinas (DIMMA). Correo E.: cbloem@ula.ve

*****Ingeniero Mecánico. PhD. Universidad de Nottingham. Profesor Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Grupo de Pulvimetalurgia (GPM). Correo E.: robertog@ula.ve

Abstract

A documentary synthesis was performed about diverse materials used in the sawmill industry, a historical overview in materials evolution commonly used in the cutting tools. A description and a comparison was made with the requirements which will be submitted with special emphasis on treatment and techniques to enhance their mechanical and tribological presentations, detailing the different phenomena that occur in each situation. A desegregation of the main metal alloys that make up the bandsaws for primary processing of wood was made, alloys and carbides used as reinforcement material on the teeth, superficial and thermic treatments most commonly used which can access sawmills to obtain additional benefits in cutting tools.

Key words: Cutting tools, sawing, wood, materials engineering, thermal treatment, wear.

Introducción

La industria del aserrío en Venezuela

Las empresas transformadoras primarias, como la industrial del aserrío, tienen gran importancia para la cadena de suministro, asumen la función de mecanizar la materia prima proveniente del bosque o las plantaciones, hasta transformarla en productos semi-elaborados que serán suministrados al resto del parque industrial transformador (procesamiento secundario) del país.

Según Ninin (1986) y Sarache (2000), el desgaste de las herramientas de corte es un proceso natural y progresivo producto del roce y la fricción que se ejerce entre la herramienta de corte y la materia prima, en este caso es la madera. En virtud de ello, empresas transformadoras de países con alta industrialización y desarrollo del sector de los productos forestales como Canadá, Estados Unidos, Alemania, Suecia, Dinamarca, Noruega, Finlandia, Italia, Brasil, Chile, entre otros, han adoptado medidas para mitigar los efectos del desgaste sobre las herramientas de corte en el procesamiento primario de la madera, principalmente siguiendo adecuadas técnicas

de afilado, selección correcta de los parámetros geométricos de las herramientas según el tipo de madera a procesar, ejecución de las operaciones de corte siguiendo adecuados parámetros inherentes al proceso y cada vez un mayor auge del uso de la Ingeniería de Materiales sobre las herramientas de corte (Trejo, Tolosa & Ninin, 2013).

En Venezuela, según el Directorio Nacional de Industrias Forestales publicado en mayo del 2012 por la Dirección General de Industrias Madereras del Ministerio del Poder Popular para Industrias (MPPI), existen registradas (formalmente establecidas) un total de 307 empresas transformadoras, entre Transformadoras Primarias (Aserraderos) y Transformadoras Secundarias (carpinterías). Según encuesta realizada en septiembre del 2012, se observa que, de las 307 empresas transformadoras existentes en Venezuela, menos del 2% de las empresas totales emplean materiales de refuerzo sobre las herramientas de corte en el aserrado de la madera y casi un 80% del total, conoce muy poco o desconoce totalmente los beneficios y metodologías para la aplicación de materiales de refuerzo a través de la ingeniería de superficies, sin incluir las empresas que aún no están registradas, ni las empresas que se encuentran en proyecto, las cuales integran la totalidad del parque industrial transformador de la madera de Venezuela (Trejo *et al.*, 2013).

Es importante resaltar que Venezuela cuenta con cerca de 500.000 hectáreas de plantaciones de Pino Caribe (*Pinus caribaea var. hondurensis*), de las cuales aproximadamente 350.000 hectáreas corresponden a plantaciones con 10 o más años de edad, es decir, árboles maduros y próximos a su aprovechamiento. En la actualidad la empresa estatal Maderas del Orinoco C.A., antiguamente CVG PROFORCA, abastece a la pequeña y mediana industria (PyMI) nacional con cerca de 750.000 m³ rollizos / anuales de pino caribe como materia prima para el sector transformador primario (aserraderos).

Actualmente el 80% de la disponibilidad de materia prima es por parte del sector público, pero tiene capacidad de aprovechar

y transportar sólo para el 24% y del 9% para aprovechamiento industrial (capacidad de aserrar madera) (Ministerio del Poder Popular para Industrias (MPPI), 2014). De igual manera el MPPI (2014), estima que para el año 2019 la producción de madera aserrada del sector público será del 54%, la de tableros del 39% y la de papel del 100%. Es importante destacar, que en los tres (3) rubros mencionados anteriormente se emplean herramientas de corte para la transformación de su materia prima (madera) a subproductos y productos terminados, los cuales experimentarán las acciones naturales y progresivas del desgaste de sus filos.

Según Ninin & Rosso, 2006, realizaron ensayos exploratorios sobre la abrasividad de ese mismo Pino Caribe en el canteado-cepillado tanto en la madera juvenil como en el leño maduro, realizando comparaciones experimentales con la abrasividad producto del procesamiento de la madera de Chupón (*Pouteria reticulata*) la cual es considerada como una madera altamente abrasiva por su dureza y su considerable cantidad de sílice. En los resultados obtenidos, se destaca un mayor desgaste de la herramienta que procesó la madera de chupón, luego la herramienta que procesó la madera madura de pino caribe ubicada en el tercio más cercano a la periferia de la rola y luego la herramienta que procesó la madera juvenil de Pino Caribe ubicada en el primer tercio hacia el centro de la rola. Es importante resaltar que en todos los casos, se utilizó herramientas sin recubrimientos de refuerzo, es decir, herramientas de aceros rápidos o HSS (*High Speed Steel*).

Al observar los resultados de dicha investigación (Ninin & Rosso, 2006), es necesario destacar que la madera madura de Pino Caribe de la Orinoquia resultó ser 1,47 veces más abrasiva que la madera juvenil del mismo árbol y resultó ser solamente un 34 % menos abrasiva que la madera de Chupón, la cual es considerada una madera de mucho cuidado para su procesamiento por su alta dureza y alta abrasividad que desgasta prematuramente las herramientas de corte.

Esta información evidencia la necesidad de reforzar y divulgar diversas investigaciones e información especializada que

consoliden la factibilidad técnica y económica de emplear distintos tratamientos que contribuyan a mitigar los efectos del desgaste al utilizar materiales de recubrimiento sobre las herramientas de corte en el procesamiento de la madera, tal es el caso del tradicional estelita (aleación cobalto - cromo - tungsteno), el cromo electrolítico, aleaciones de titanio, compuesto de níquel químico, entre otras.

En este mismo sentido, García & Moya (1998), investigaron experimentalmente la eficiencia de dos (2) herramientas de cortes (sierras de cintas), una con recubrimiento con estelita y otra sin ningún recubrimiento. Ambas sierras se emplearon en el aserrado de una especie presente en Costa Rica, la cual es considerada como una madera dura y altamente abrasiva por su contenido de sílice, obteniendo como resultado una notable disminución del desgaste por área y considerable reducción de la velocidad del desgaste de las herramientas recubiertas con estelita frente a las herramientas sin recubrimiento.

Contreras (2010), afirma que con los adelantos en investigaciones y desarrollos tribológicos gracias a la nanotecnología, en los últimos años se han realizados avances importantes en la implementación de materiales nanoestructurados y materiales con excelentes prestaciones tribológicas, con lo cual se han disminuido e incluso eliminado el uso de lubricantes, ofreciendo con esto un potencial ahorro económico sobre las industriales.

El ignorar los beneficios de la tribología, deriva en desgastes, calentamiento, pérdida de energía y potencia, lo cual redundaría en un costo elevado para el ambiente y en fuertes presiones sobre la economía de las empresas. Trejo *et al.*, (2007), demostraron experimentalmente que existe una estrecha relación entre el desgaste de los dientes de las sierras de cinta en el procesamiento primario de la madera y la rugosidad del metal que conforma los dientes, ya que al lograr disminuir la rugosidad del metal (coeficiente de fricción) presente en los dientes de las sierras de cinta (caras de corte y gargantas de los dientes), se logró una considerable reducción del desgaste de las herramientas de corte.

De igual manera, Trejo, Ninin & Rosso (2011), destacaron que mientras mayor sea el coeficiente de fricción entre la herramienta y la madera, el cual está representado por una alta rugosidad en las caras de corte y en los fondos de gargantas de las sierras, así como por la incidencia de filos poco precisos con aristas deterioradas, líneas de corte con poca agudeza y presencia de residuo metálico en forma de rebabas, mayor será la cantidad de productos o piezas aserradas que presentarán variaciones dimensionales tan considerables como para ser catalogados como productos defectuosos o no conformes dentro de los Límites de Tolerancia Natural establecidos por la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN) y la *Southern Pine Inspection Boreau* (SPIB).

Bien es sabido que para llevar a cabo el proceso de aserrado de la madera, es necesario emplear diversas herramientas de corte superpuestas o colocadas sobre maquinarias especializadas para el corte llamadas sierras, como mejor se aprecia en las figuras 1 y 2, las cuales deben estar adecuadas a las exigencias del proceso, puesto que el aserrado es una técnica bien compleja e implica vencer la resistencia de la madera por medio de los filos y las caras de los elementos cortantes, las cuales permiten arrancar el material en forma de viruta.



Figura 1. Aserrado de madera empleando una sierra de cinta doble vertical (izquierda) y sierra de cinta single (derecha).
(Fuente: El Autor.)

El procesamiento de la madera está influenciado por diversos factores, los cuales están asociados a tres (3) grandes grupos. Un primer grupo, por todos aquellos factores inherentes a la materia prima (especie, propiedades mecánicas, constitución química, contenido de humedad, temperatura), un segundo grupo por todos aquellos factores inherentes a las herramientas de corte (características geométricas de las herramientas, agudeza de los filos, fricción con la madera), y un tercer gran grupo por todos aquellos factores inherentes a las condiciones de corte (velocidad de la herramienta, velocidad de alimentación, espesores de viruta, alturas de corte, anchos de corte), pero es bien importante hacer más énfasis en el empleo de materiales de refuerzo y la ingeniería de superficies en el procesamiento de la madera.



Figura 2. Izquierda: Sierra de Cinta marca BRENTA (Italiana) del Laboratorio Nacional de Productos Forestales LNPF-ULA, Mérida – Venezuela. Derecha: Sierra de Cinta doble vertical marca MEM (Francesa) de la empresa estatal Maderas del Orinoco C.A. (antiguamente CVG PROFORCA) Puerto Ordaz -Venezuela. (Fuente: El Autor).

Las láminas de sierra de cintas, provienen de flejes comerciales, los cuales deben ser rectos, planos y libres de tensiones, para darle una buena preparación con relativa facilidad. De igual manera, el trabajo minucioso en la preparación de las herramientas de cortes como se aprecia en la figura 3, debe ser el principal factor a considerar en las empresas transformadoras para limitar las deformaciones, fallas o rupturas y cambios prematuros de las sierras durante el proceso (Muñoz, 1986). En este caso, no se hará énfasis

en las características geométricas de las sierras ni en las condiciones propias del procesamiento, por el contrario se van a considerar los aspectos relacionados con las características propias del material que conforman las sierras de cintas.



Figura 3. Diagnóstico y preparación de las sierras de cinta para su uso.
(Fuente: Cortesía de la empresa Forézienne).

Selección y descripción de los materiales empleados

Para cumplir los requisitos del proceso de aserrío en la forma más económica y racional posible, se necesita no sólo una máquina eficiente, sino también una lámina capaz de resistir las múltiples y variadas exigencias del corte, puesto que el rendimiento de las sierras va de la mano con las propiedades y características que presente el material que conforma su estructura, el cual deberá resistir los esfuerzos a que estará sometida durante el corte de la madera.

Por tal razón, las láminas u hojas que conforman las sierras de cintas, para cumplir satisfactoriamente las altas exigencias del proceso de mecanizado de la madera, deben ser manufacturadas de un material que reúna las siguientes características (Junta del Acuerdo de Cartagena, JUNAC, 1989):

- a. Alta dureza junto con maleabilidad para poder trabajar y preparar los dientes que conforman la cinta, además los dientes

deberán mantener el filo ante el proceso natural y progresivo de desgaste.

- b. Gran tenacidad frente a los impactos presentes en las operaciones del aserrío de la madera.
- c. Alta flexibilidad y resistencia a la fatiga.
- d. Elasticidad y homogeneidad estructural.

Si se analizan los usos desde el punto de vista real, todas las actividades requieren resistencia a la tracción y tenacidad, por lo tanto es muy extraño encontrar una situación en la cual una propiedad sea necesaria y la otra no, es por ello que el éxito en el diseño del material estará en saber seleccionar el balance más adecuado entre las dos propiedades.

El material que conforma las sierras de cintas para el corte de la madera, debe resistir los esfuerzos debido a la tensión de montaje (tracción) y los esfuerzos que intervienen durante el corte (ver figura 4 y 5). De igual manera se requiere alta resistencia a los impactos, sobre todo en el procesamiento de maderas duras y una alta resistencia al desgaste en el caso de maderas altamente abrasivas.



Figura 4. Izquierda: diente enfrentando el corte (altos impactos por la velocidad de la herramienta y la dureza de la madera). Derecha: dientes evacuando las virutas luego de realizar el corte (fricciones y temperatura producto de la mayor o menor abrasividad de la madera).
(Fuente: El Autor).

Es muy importante resaltar que la resistencia a la abrasión, es la habilidad que presenta un material de resistir el desgaste ocasionado por el rozamiento (González & Mesa, 2004). Como regla general, la resistencia a la abrasión se incrementa con la dureza del material.

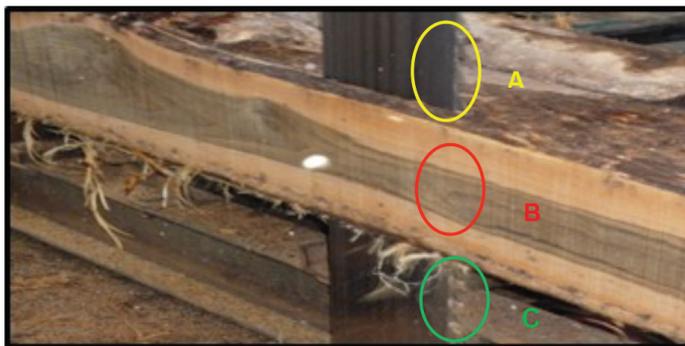


Figura 5. Zona A: mayor concentración de esfuerzos por compresión e impactos. Zona B: mayor participación de los esfuerzos de corte incidiendo en las fricciones. Zona C: mayor concentración de esfuerzos de tracción por la polea motriz.
(Fuente: El Autor)

En vista que la dureza también está relacionada con la resistencia a la tracción, puede deducirse que, cuando mayor sea ésta, mayor será la resistencia a la abrasión, sin embargo, debe recordarse que, a mayor resistencia a la tracción, menor será la tenacidad y puesto que, la mayoría de los usos requieren cierto grado de tenacidad, aumentar la resistencia a la tracción hasta el valor máximo no es necesariamente la solución.

El mantenimiento que se realiza para resolver los problemas que ocasiona el desgaste, debe tender de correctivo hacia preventivo y de ser posible predictivo. Para llevar a cabo estos modelos de mantenimiento, es necesario conocer cuáles son los tipos de desgaste que están ocasionado los problemas y cuál es su naturaleza para finalmente encontrar la manera de disminuirlo (Moreno, 2009).

Diversas sierras que trabajan a una velocidad de corte hasta los 3.300 m/min están sometidas a un esfuerzo de tracción que varía entre 350 y 650 kg/cm² (5.000 y 9.000 PSI o *Pounds-force per Square Inch*), además de ello, existen esfuerzos combinados causados por la

curvatura sobre los volantes, compresión de las partículas interiores de la hoja y tracción de las partículas exteriores de la misma (Ríos, 2005).

Históricamente las sierras de cintas han conservado la forma fundamental que le dio su inventor, la que ha continuado siendo la más efectiva para aserrar. Con el transcurso del tiempo se ha mejorado la calidad del acero y de las soldaduras, lo que ha permitido variar la forma de los dientes y aumentar la productividad.

Entre los principales materiales de corte disponibles actualmente, se tienen cinco grupos básicos (Sales, 1990):

- Aceros (comunes): Dureza Rockwell de 40 a 50
- Aceros rápidos: Dureza Rockwell de 60 a 65
- Estelitas: Dureza Rockwell de 50 a 60
- Carburos duros: Dureza Rockwell de 85 a 95
- Cerámicos: Dureza Rockwell de 90 a 95

Los aceros “comunes” son las distintas variedades de acero, cuyo contenido de Carbono está por el orden de 0,6 a 1,2%. El acero de las láminas de las sierras de cinta (0,6 a 0,8% de Carbono) entran en esta categoría, la dureza se encuentra en un rango de 45 a 50 Rockwell (Sales, 1990).

Los Aceros Rápidos

Dos estadounidenses Taylor y White (1898), fueron los creadores de la aleación conocida como Aceros de Alta Velocidad / HSS (*High Speed Steel*). Los primeros aceros de alta velocidad se obtuvieron adicionando como elemento de aleación al cromo y el tungsteno (Sture, Staffan & Mats, 2000). En esta última forma, la dureza es aumentada con el porcentaje adicionado de tungsteno, pero también la fragilidad de las herramientas. Con el cromo se facilita la solución de los carburos de tungsteno, promueve el endurecimiento y reduce la oxidación. Posteriormente fue añadido otro elemento como el vanadio, con la finalidad de mejorar su

dureza. Luego con la adición de cobalto (cerca de 1921) se mejora la aleación puesto que se incrementa significativamente el umbral de temperatura a la que los aceros rápidos comienzan a perder su dureza (Sture *et al*, 2000).

De esta manera, los aceros rápidos conservan su dureza a temperaturas de hasta unos 650 °C tal como se aprecia en el grafico 1. También se adicionó el molibdeno que mejora las propiedades mecánicas de los aceros rápidos y el titanio es empleado para desplazar al oxígeno, nitrógeno y el azufre en el desarrollo de la aleación, dando lugar a los carburos de titanio que tienen una dureza superior a los carburos de tungsteno (Sales, 1990).

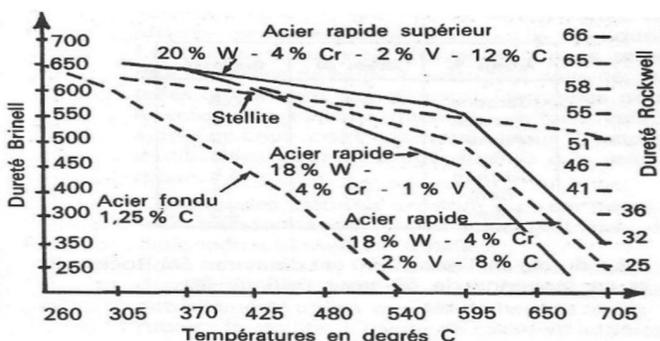


Grafico 1. Influencia de la temperatura sobre la dureza en diferentes materiales empleados en herramientas de corte.
(Fuente: Sales, 1990)

La composición varía de acuerdo a los fabricantes y es objeto de un estudio continuo (ver tabla 1). El problema no se limita sólo a la fabricación y composición, sino que se hace necesario que las ventajas obtenidas durante su elaboración sean perfectamente llevadas a la práctica industrial.

Tabla 1. Composición comúnmente empleada del acero de las sierras de cintas

Composición	Acero al Niquel (%)	Acero al Niquel – Cromo (%)
Carbono	0,67	0,8
Silicio	0,20	0,33
Manganeso	0,20	0,38
Niquel	2,20	0,50
Cromo	0,05	0,10
Vanadio	0,02	0,02

(Fuente: Muñoz, 1986)

Aspectos metalúrgicos de las láminas de las sierras de cintas

Una vez lograda la correcta composición del acero de acuerdo a los fines específicos de utilización, la banda es laminada en caliente, purificada y limpiada. Es importante acotar que en el laminado en frío el acero adquiere demasiada dureza por lo que el fleje deberá ser sometido a tratamientos térmicos que incluyen el **temple, recocido y revenido**, para proporcionarle las propiedades finales de resistencia, dureza, tenacidad, elasticidad, maleabilidad y ductilidad deseadas. En este laminado en frío el acero queda endurecido por deformación plástica, por lo cual su estructura granular queda formada por agujas dispersas, irregulares y denominadas Martensita (Trejo *et al*, 2013).

La Martensita se originó de una solución sólida cristalina y homogénea que contiene dos o más especies químicas llamadas **Austenita**, la cual se encuentra formada aproximadamente cuando el acero está a temperatura mayor a 800 °C. Al enfriarse rápidamente (temple), la austenita pasa a formar la martensita. Este enfriamiento brusco ocasiona que no se forme u organice la red simétrica para formar los granos definidos (Kreith & Goswami, 2005).

Si la austenita se deja enfriar en el horno durante un tiempo determinado, lo que se conoce como el proceso de **recocido**, se da tiempo a que se organice la red simétrica y forma los granos definidos con estructura homogénea. A mayor tiempo de recocido menor será la martensita formada, ya que la austenita pasa a formar directamente perlita (cementita + ferrita). **La cementita** (Fe_3C) o carburo de hierro, contiene 6,67% de carbono y es muy dura. **La ferrita** es una solución sólida de una pequeña cantidad de carbono disuelta en hierro, es muy suave (Kreith & Goswami, 2005).

Los aceros después del temple suelen quedar generalmente demasiado duros y frágiles para los usos a que van a ser destinados, es por ello que estos inconvenientes son corregidos por medio del **revenido**, que es un tratamiento térmico que consiste en calentar el acero a una temperatura más baja que su temperatura crítica inferior, enfriándola luego generalmente en aire y otras veces en aceite o

agua, según la composición. El objetivo del revenido no es eliminar los defectos del temple sino modificarlos, disminuyendo la dureza y resistencia, aumentando la tenacidad y eliminando también las tensiones internas que tienen siempre los aceros templados. En este sentido, la *National Aeronautics and Space Administration*, NASA (1970), afirma que es de hacer notar que los aceros aleados que poseen silicio, manganeso, níquel, cromo, vanadio, por ejemplo, requieren una temperatura superior de revenido que los aceros al carbono.

Tratamientos para mitigar el desgaste

En virtud que el desgaste es un proceso natural y progresivo que no se puede eliminar, sólo mitigar a través de técnicas adecuadas de preparación (características geométricas adecuadas) de las herramientas, adecuadas condiciones del procesamiento (espesores de viruta elevados), altos contenidos de humedad de la madera (refrigerante y lubricante) y cada vez un mayor auge del uso de materiales de refuerzo sobre los dientes. En este caso se describe lo concerniente al uso de materiales de refuerzo sobre los dientes de las sierras de cintas en el aserrado de la madera.

Generalmente, para minimizar los efectos del desgaste se emplean materiales que ofrecen cierta resistencia al desgaste, sobre todo en las aristas de los dientes. La solución consta de emplear un material diferente que aporte propiedades de dureza, la cual conserve sus propiedades y características a altas temperaturas, así como también ofrezca beneficios tribológicos al disminuir el coeficiente de fricción entre la madera y la herramienta (Trejo *et al.*, 2013).

Aleación Cobalto - Cromo - Tungsteno (Estelita)

La estelita es una aleación metálica que data de 1916, la cual fue formulada originalmente por Ellwood Haynes. Se compone principalmente de cobalto (45 a 60%), cromo (25 a 35%), tungsteno (9 a 18%), contiene muy poco hierro (por lo general menos del 5%), manganeso y silicio (menos del 1%), consideran impurezas normales (Prado & Facchini, 2009). Es importante resaltar que la estelita no

es notablemente más dura que el acero de las sierras, su beneficio radica principalmente que su dureza casi no varía con el incremento de la temperatura, tal como se aprecia en el gráfico 1.

Por otro lado, NASA (1970) y Castillo & Villa (2005), afirman que otra cualidad de la estelita que ha contribuido a su desarrollo es la facilidad de aplicación, puesto que presenta un bajo punto de fusión (1.300 °C), lo cual hace que se pueda alcanzar con un simple equipo de oxiacetiléno, aunque no es tan recomendado como las soldaduras TIG / *Tungsten Inert Gas* con la estelita como material de aporte (Trejo *et al*, 2013).

La estelita es de aleación ligera y se deposita en forma de gotas de líquido en las aristas de los dientes, que luego del enfriamiento y un consecuente endurecimiento, se realiza un rectificado con una piedra abrasiva para dar su forma y acabado final. La simplicidad de la técnica, sumada a las ventajas del material, es sin duda alguna el origen del gran éxito de la estelita como material de refuerzo en el aserrado de maderas. Al comienzo de la introducción de la estelita en el aserrado de la madera, había principalmente cuatro grados de estelita (grado 1, 6, 8 y 12). El grado 6 se funde a 1.310 °C y el grado 8 a 1.380 °C, lo que hace más difícil la técnica de recubrimiento. Los grados 1 y 12 se funden a 1.250 °C, los cuales se utilizan actualmente, tal como se observa en la tabla 2 (Sales, 1990). La dureza de la estelita grado 12 es aproximadamente de 50 Rockwel y el de grado 1 es de 65 Rockwell (Sales, 1990). Son un poco más suaves que los aceros rápidos (aleados), pero logran mantener la dureza a altas temperaturas, donde los aceros rápidos quedan inutilizables como mejor se aprecia en el gráfico 1.

Tabla 2. Composición de los principales grados de estelita

Nomenclatura Francesa	Grado 1	Grado 12
Nomenclatura Americana	Estelita 20	Estelita 12
Carbono	2,5%	1,8%
Cromo	33%	30%
Tungsteno	13%	9%
Cobalto	50%	58%
Otros	1,5%	1,2%

(Fuente: Sales, 1990)

Existe otra clase de aleaciones basadas en níquel (ver tabla 3), muy similar a las propiedades de las estelitas grado 1 y 12 y muy utilizadas en el Reino Unido en la industria del aserrío, las cuales se conocen como aleaciones de base níquel de grado 50 y grado 60 (Sales, 1990).

Tabla 3. Composición de otras aleaciones empleadas en base Níquel

Aleación	Grado 50	Grado 60
Carbono	0,4%	0,5%
Cromo	10%	15%
Níquel	77%	70%
Hierro	4%	4,5%
Silicio	4%	4,5%
Boro	1,5%	3%
Otros	3,1%	2,5%

(Fuente: Sales, 1990)

Estelitado Manual

Es una tarea de expertos y prácticamente artesanal. El tiempo y la dedicación requerida en cuanto a horas-hombre son muy superiores que los requeridos en un proceso empleando maquinarias y equipos automatizados, no sólo por la preparación de la sierra de cinta, sino por la forma precisa y casi perfecta que exige la operación (ver figura 6).

La aplicación de los recubrimientos con estelita mediante soldaduras con equipos de oxiacetileno, a pesar de ser una solución para los aserraderos poco automatizado y de mediana a baja producción, es una técnica de mucho cuidado puesto que requiere de una alta pericia y conocimientos metalúrgicos ya que es más complicado controlar las temperaturas, lo cual puede variar las especificaciones recomendadas de los materiales (recubrimiento y sustrato), así como posibles contaminantes de la aleación producto de la combustión del oxígeno y el acetileno, provocando fallas de fracturas del material durante el proceso de corte. Sin embargo, las prestaciones tribológicas adquiridas mediante estos recubrimientos con estelita, ameritan un esfuerzo en inversión o capacitación para una aplicación automatizada o manual, pero con técnicas adecuadas.



Figura 6. Aplicación de estelita manual con equipo de oxiacetileno
(Fuente: Junta del Acuerdo de Cartagena, JUNAC, 1989).

En el caso de una aplicación manual por medio de equipo oxiacetileno, se recomienda precalentar las varillas de estelita, luego con el soplete del oxiacetileno ir fundiendo gota a gota la varilla sobre cada diente y realizar un enfriamiento controlado con el soplete, alejándolo lentamente y asegurando que la temperatura del conjunto diente-estelita se va reduciendo paulatinamente. Al finalizar todo el proceso de estelitado, es necesario realizar un cuidadoso revenido sobre el metal de cada diente con el mismo soplete, empleando como apoyo el movimiento de avance de las afiladoras de sierras de cintas. Otra manera de realizar un estelitado manual de forma más adecuada, es mediante la utilización de un equipo para **soldaduras TIG** (*Tungsten Inert Gas*) o también conocida como GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) pero con material de aporte que en este caso será la estelita, en la cual mediante la incorporación del argón y/o helio se crea una atmósfera inerte que desplaza el oxígeno y el nitrógeno de la atmósfera que envuelve el baño de fusión y evita posibles oxidaciones e incorporación de impurezas en la aleación (Kalpakjia & Schmid,2002).

Estelitado por soldaduras con Resistencia Eléctrica

Viene dado por un proceso de soldaduras mediante resistencia eléctrica, donde se empieza por calentar el acero de la punta del diente y la varilla de la estelita, mediante la exposición a una

corriente eléctrica de alta intensidad (Amper) y baja tensión (V). Luego, se deja que ambos materiales empiecen a recocerse (alcanzar la temperatura óptima para su unión), y al alcanzar la temperatura necesaria se funden el uno contra el otro de manera homogénea (Trejo *et al*, 2013).

Estelitado por soldaduras por Plasma

En este proceso primero se calienta el acero de la hoja sierra, luego de un tiempo determinado, se calientan los metales mediante una elevada corriente eléctrica generada por el arco que como consecuencia, permite que la estelita se funda sobre la punta del diente del metal base o sustrato (la hoja de la sierra) como mejor se aprecia en la figura 7. Por este método se consiguen uniones más fuertes ya que el grosor de la estelita sobre el diente es mucho mayor, el calentamiento y enfriamiento es completamente controlado a través de gradientes de incrementos de temperatura y la misma maquinaria está equipada para realizar el revenido localizado y de forma controlada sobre los dientes de la sierra. Por esta razón, es el método más recomendado puesto que es la técnica mejorada producto de los avances tecnológicos, pero que lleva inmerso un elevado costo de inversión inicial.

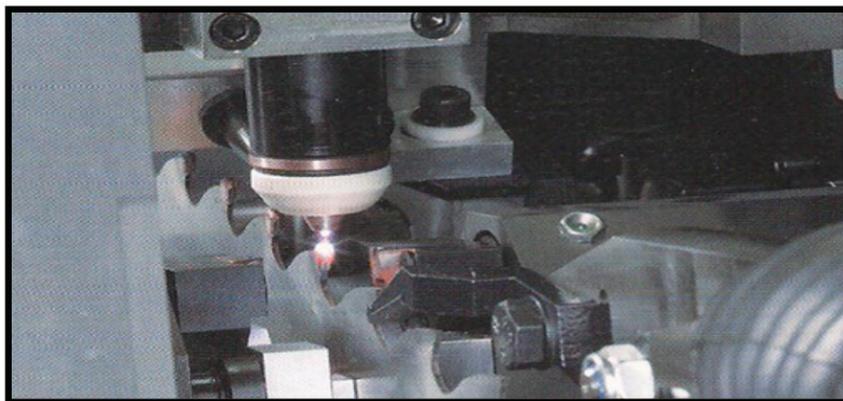


Figura 7. Equipo de Estelitado por soldaduras por Plasma
(Fuente: Cortesía de la empresa VOLLMER)

Los Carburos Metálicos

Su descubrimiento aplicado industrialmente se le atribuye a la famosa acería alemán Krupp Stahl AG, en la cual llegó a usar muy a menudo el término comercial de “Widia” como simplificación de su original *Metall Hard Wie Diamant* (Metal duro como el diamante), que todavía es ampliamente utilizado en muchos países para referirse a las herramientas de carburo (Callister, 2003).

En estas aplicaciones, las herramientas están protegidas mediante una aplicación tecnológica por pequeñas plaquetas de carburos (Widia). Estos carburos no son aleaciones sino aglomerados de diferentes materiales, los cuales se obtienen por sinterización y el principal compuesto es el carburo de tungsteno, el carburo de tantalio o carburo de titanio con una aglutinante de cobalto o níquel. En su registro original, se utilizó el carburo de tungsteno-cobalto (Sture *et al*, 2000).

El polvo de base obtenido mediante la mezcla de cobalto y el material resistente al desgaste (metal duro) se elabora, se comprime y luego a la temperatura de fusión del aglutinante se sinteriza en un proceso que se conoce con el nombre de **Pulvimetalurgia**. Luego del sinterizado y al enfriar, se obtiene el material cuya dureza y propiedades mecánicas varían con el tamaño de los carburos y su porcentaje de cobalto, como mejor se sintetiza en la tabla 4 (Contreras, 2010). Este material obtenido presenta una dureza impresionante, pero frágil, por tal razón, la elección de la adecuada composición requiere un estudio detallado (Sales, 1990).

Tabla 4. Composición de las principales variedades de carburo de tungsteno empleado

Carburo de tungsteno (%)	Cobalto (%)	Observaciones
97	3	Muy duro pero frágil
94	6	Menos duro pero frágil
88	12	Buena resistencia al impacto y dureza bien satisfactoria para el aserrado de la madera

(Fuente: Sales, 1990)

La superioridad de una herramienta con carburo de tungsteno en condiciones óptimas sobre una herramienta de acero de buena calidad está por el orden de 1 a 50, lo cual favorece el empleo de este material (Sales, 1990). Igualmente existen otros tipo de carburos de gran dureza, sobre todo los carburos de boro u otros compuestos derivados del boro, como el nitruro de boro, los cuales se utilizan generalmente como material para discos de corte para el mecanizado y está caracterizado por un nitruro de boro de estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC / *Face Centered Cubic*) (ver figura 8).

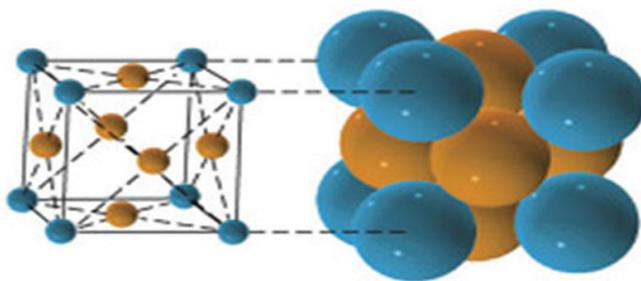


Figura 8. Arreglo atómico (estructura cristalina) Cúbica Centrada en las Caras (FCC – *Face Centered Cubic*).
(Fuente: Trejo *et al*, 2013).

Consideraciones generales

✓ Beneficios aportados

- a. Disminuye el coeficiente de fricción entre la madera y la sección de corte de la herramienta.
- b. La dureza es alta y se mantiene a altas temperaturas durante el mecanizado.

✓ Defectos de sus cualidades

- a. Son frágiles y presentan poco resistencia al impacto.
- b. La presencia de cuerpos extraños provenientes del bosque, es tan riesgoso de ocasionar daños irreversibles a las herramientas.

- c. El uso de los carburos se limita actualmente al procesamiento secundario (sierras circulares), salvo la condiciones del empleo de la estelita, el cual tiene un gran auge sobre el procesamiento primario empleado en sierras de cintas incluso sobre sierras de discos.

d. El Cromado duro

Es un proceso de galvanía, el cual consiste en deposiciones electrolíticas de cromo, esencialmente en pequeñas capas en forma de películas delgadas de varias decenas de micras de espesor (10 a 20 micras en promedio) (ver figura 9). Esta técnica se adapta bien a la mayoría de los aceros, incluyendo los aceros rápidos (Prado & Facchini, 2009).



Figura 9. Cromado duro por electrólisis sobre Sierras de Cintas para el aserrado de la madera.
(Fuente: Trejo *et al.*, 2013)

La constitución de la solución base es de ácido crómico (H_2CrO_4) diluido en alrededor de 250 g/l. La dureza de capa de cromo obtenida en estos depósitos es de 65 Rockwell, incluso puede alcanzar los 70 Rockwell dependiendo de la calidad del tratamiento (Prado & Facchini, 2009 y TECNOCROM INDUSTRIAL, 2011).

En el aserrado, el desgaste se concentra hacia la arista de los dientes, predominantemente hacia las caras de corte de los dientes, cara libre (dorso) y las aristas que conforman los extremos de los valores de traba (sobre ancho del diente). En tal razón, esta técnica es particularmente atractiva puesto que disminuye la fricción en el

corte, pero sigue siendo limitada, por las dimensiones de las láminas de las sierras de cintas (Trejo *et al*, 2013). Esta técnica es fácilmente aplicable a las sierras circulares y mayor aun a las sierras circulares con dientes extraíbles. Existen demostraciones con excelentes resultados obtenidos en investigaciones a partir del cromado duro de dientes en aceros rápidos de sierras circulares en el aserrado de maderas altamente abrasivas (Sales, 1990). Sin embargo, existe una carencia en información referente a investigaciones relacionadas con el cromado de sierras de cintas, debido a la dificultad de la aplicación y desarrollo de esta técnica. (Trejo *et al*, 2013).

Los Tratamientos Térmicos

La temperatura en los dientes de las herramientas de corte en servicio juega un papel determinante sobre la resistencia al desgaste. A temperatura ambiente todos los aceros experimentan una dureza satisfactoria o mejor aún, presentan un comportamiento extremadamente estable, sin embargo, todas sus prestaciones mecánicas disminuyen considerablemente a medida que su temperatura se va incrementando superior a los 250 °C (Sales, 1990).

En este caso, la pérdida de dureza se traduce en un rápido desgaste y deformaciones de las puntas de los dientes como efectos de las presiones excesivas entre la madera y la herramienta, originando una deformación (aplastamiento) de los bordes (aristas). Este incremento de la temperatura de los dientes depende principalmente de la especie procesada (materia prima) y las condiciones del procesamiento (condiciones de corte).

Un diente entrando en el corte, a temperatura ambiente en una madera densa y dura puede experimentar un notable incremento en la temperatura de la punta del diente, lo cual aumenta con el espesor de viruta y la altura de corte, pudiendo para el caso del mecanizado de maderas muy densas alcanzar los 400 °C (García & Moya, 1998). En tal sentido y aprovechando los fenómenos ocurridos y las variaciones de las propiedades de los aceros frente a los cambios de temperatura, se han obtenido grandes beneficios para las herramientas empleadas en el corte de la madera gracias a la aplicación de diversos **tratamientos térmicos**.

Esto se refiere a la posibilidad de conferirle a los dientes de las herramientas de corte una mayor dureza mediante la aplicación de un tratamiento con una moderada temperatura sobre la dentadura. Este tratamiento térmico se descompone en tres (3) fases:

- Calentamiento hasta la temperatura de austenización (según el diagrama de fases).
- Enfriamiento (temple controlado)
- Calentamiento (recocido) a una temperatura inferior que la de austenización, según el diagrama de fases correspondiente a la aleación (ver gráfico 2).

✓ Austenización

Este tratamiento endurece el acero pero de igual manera lo fragiliza. Estas temperaturas vienen dadas por el diagrama de fases hierro - carbono del gráfico 2. Para los aceros aleados, la presencia de cromo, silicio, tungsteno y/o molibdeno incrementan ligeramente la temperatura del tratamiento (Askeland & Phule, 2004).

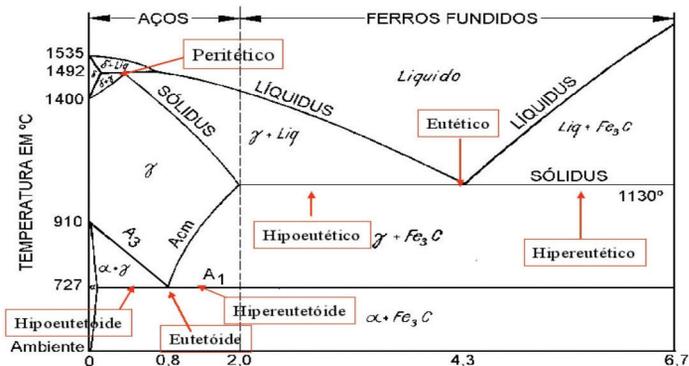


Gráfico 2. Diagrama de Fases Hierro – Carbono (Aceros)

(Fuente: Trejo et al, 2013).

La temperatura austenización promedio es de 850 a 900 °C para una sierra de acero convencional, en donde la dureza luego del enfriamiento alcanza los 45 a 65 Rockwell, con una resistencia a la tracción entre 1.100 a 1.500 MPa (Askeland & Phule, 2004).

✓ Temple y Revenido

El temple y el revenido se utilizan ampliamente para mejorar las propiedades de resistencia de los aceros y conferirles dureza y altas propiedades cortantes a los aceros de herramientas. Por temple se comprende la fijación de las estructuras a temperatura normal, que son propias de temperaturas altas, por tal razón, las estructuras templadas son inestables (físicamente metaestables) (Ashby, 1999). Si el acero se enfría rápidamente desde la zona de **austenita**, el carbono no puede desprenderse y como es imposible detener la transformación de hierro gamma a hierro alfa con capacidades de disolución de carbono muy diferentes, se produce una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa que se conoce como **martensita** (Kreith & Goswami, 2005).

La estructura de la martensita es inestable, con una gran dureza y fragilidad considerable. Esta dureza es tanto mayor cuanto más cantidad de carbono esté disuelto en esta, y se explica por el fenómeno de que su red cristalina está muy deformada por los átomos de carbono. Esto hace que el cristal elemental de la red cristalina de la martensita no sea cúbica (figura 8) sino tetragonal (figura 10), lo que a su vez dificulta su deformación plástica.

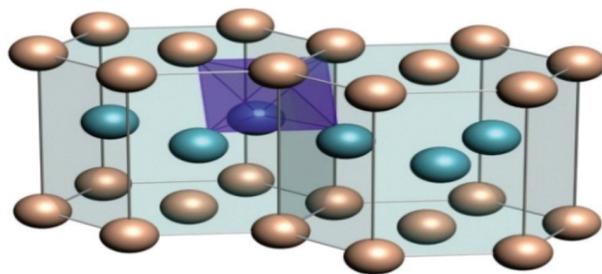


Figura 10. Arreglo atómico (estructura cristalina) Hexagonal Compacta o Tetragonal (HCP – *Hexagonal Close Packed*).
(Fuente: Trejo *et al*, 2013).

El acero tiene la capacidad de ser templado si contiene más del 0,3% de carbono (Askeland & Phule, 2004). El enfriamiento para el proceso de templado puede efectuarse a diferentes velocidades

de acuerdo a los fines perseguidos y del tipo de acero (cantidad de carbono y otros elementos aleantes), los más usados son:

- Agua
- Aceite
- Sales fundidas
- Soluciones salinas
- Y hasta el aire para ciertos aceros aleados

El proceso de enfriamiento posterior a la austenización, condiciona la resistencia mecánica del acero, el cual debe ser cuidadoso, puesto que si este se abusa, va a generar una fragilización y una pérdida de resistencia según lo mencionado anteriormente.

Askeland & Phule (2004), recomienda que la velocidad óptima de endurecimiento oscila entre 3 y 11 °C/s. La resistencia mecánica después del endurecimiento varía poco dentro de este rango, dejando una seguridad lo suficientemente grande para el propósito del tratamiento (Agüero, 2007).

✓ **Recocido**

El recocido está destinado a reducir la fragilidad del acero producto del temple, aunque con esto también se sacrifica dureza. Es por ello que se necesita encontrar el mejor balance entre tenacidad y dureza. La temperatura idónea para un recocido para un acero usualmente empleado está por el orden de los 500 °C (Askeland & Phule, 2004). Según Agüero (2007), el recocido tiene diferentes objetivos en el tratamiento térmico del acero y generalmente se aplica para eliminar tensiones residuales, acritud (endurecimiento por deformación plástica en frío como cuando se realiza el recalado de los dientes).

Conclusión

Los grandes avances tecnológicos logrados por la ciencia moderna han contribuido con el descubrimiento y desarrollo de materiales de ingeniería, ingeniería de superficies y mejoras en los

procesos de fabricación. Una adecuada selección de materiales y procesos, garantiza a los diseñadores de partes mecánicas y de herramientas de corte su correcto funcionamiento (*performance*) de los componentes diseñados.

La industria del aserrío y del mecanizado de diversos materiales requiere de continuos desarrollos tecnológicos en la búsqueda de materiales con altas prestaciones mecánicas, metalúrgicas, tribológicas, entre otras, con la finalidad de contribuir con las continuas dificultades presentadas en los procesos industriales rutinarios. En tal sentido, es necesario conocer a profundidad las necesidades y exigencias a las cuales estarán sometidas las herramientas, pues en virtud de tales requerimientos será necesario apoyarse en los desarrollos tecnológicos y avances de la ingeniería de los materiales para obtener y comprender los fenómenos ocurridos en el interior de las herramientas frente a los procesos de producción.

En el campo de la **Tecnología de los Productos Forestales**, la **Ingeniería de los Materiales** juega un papel primordial, puesto que en todos sus procesos hay esfuerzos, cortes, presiones, fricciones, temperaturas, desgastes, deformaciones y fallas o fracturas de materiales. Por esto y en virtud de los resultados obtenidos por Ninin & Rosso (2006), respecto a los ensayos exploratorios realizados sobre la abrasividad del Pino Caribe venezolano, la cual es considerada una madera de obra, englobada dentro de las maderas blandas, con mayor auge nacional, y por lo visto con cierto grado de abrasividad (mayor en la madera adulta respecto a la madera juvenil), sumado al desconocimiento y desuso de los materiales de refuerzos sobre las herramientas de corte, justifican la atención hacia una mayor y más eficaz asistencia técnica de las industrias del país en el área descrita en el manuscrito, para así abordar el atraso tecnológico presente en la industria de la madera venezolana.

Si se consideran los beneficios aportados por la ingeniería de materiales sobre la tecnología de la madera y se hace mayores esfuerzos en adaptar prácticas tradicionales por técnicas novedosas, se logra no sólo mejorar la rentabilidad de las industrias madereras,

sino que también se amplía el abanico de oportunidades al lograr aprovechar eficientemente otras especies maderables poco consideradas o relegadas por su dificultad de aserrío, sin poner en peligro algunas especies por su aprovechamiento selectivo como históricamente ha ocurrido en Venezuela.

Recomendaciones

1. En virtud de la actual necesidad de adecuación tecnológica que presenta el sector industrial transformador de la madera en Venezuela y las nuevas industrias en construcción, se recomienda hacer mayores esfuerzos en lo que a mantenimiento de herramientas de corte se refiere, considerando las diversas alternativas disponibles para proteger y reforzar los filos, con lo cual se obtienen los productos (madera aserrada), puesto que se ha demostrado en diversas investigaciones que hasta el Pino Caribe venezolano (madera blanda y de amplia utilidad en todo el país) ocasiona un considerable desgaste en las herramientas de corte.
2. Desarrollar y ejecutar una campaña de promoción y capacitación de alto nivel académico en lo relativo al mantenimiento y adecuación de las herramientas de corte ante las recientes metodologías empleadas para maximizar las prestaciones tribológicas, que apoye y asista a la Pequeña y Mediana Industria (PyMI) del procesamiento de la madera en Venezuela así como a empresas de alto impacto nacional como la empresa estatal Maderas del Orinoco, y ahora PDVSA Industrial con su incursión en el área del aserrío de la madera.
3. Ampliar investigaciones comparativas relacionadas con procesos de endurecimientos y recubrimientos superficiales como el caso de la nitruración, cromado duro, níquel químico, proyección térmica sobre diversas herramientas de corte en el procesamiento de diversas maderas.
4. Desarrollar investigaciones bajo la modalidad de proyectos factibles para identificar diversos materiales que se puedan

emplear en la promoción de la sustitución o reducción de las importaciones de los tradicionales materiales de refuerzos empleados en la industria de la madera como la estelita y la widia, bien sea a través de fundiciones, soldaduras o pulvimetalurgia.

Agradecimientos

A los Profesores del Grupo de Pulvimetalurgia (GPM) así como a los Profesores del Grupo de Diseño y Modelado de Maquinas (DIMMA) de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes, a la Revista Forestal Latinoamericana del Instituto Forestal Latinoamericano (IFLA) por la publicación de este trabajo.

Referencias Bibliográficas

- AGÜERO, A. (2007). Ingeniería de superficies y su impacto medioambiental. **Revista de Metalurgia**, 43: 63-75.
- ASHBY, M. (1999). **Materials selection in mechanical design**. Tercera Edición. Inglaterra. Elsevier.
- ASKELAND, D. & PHULE, P. (2004). **Ciencia e Ingeniería de los Materiales**. Cuarta Edición. México, Thomson.
- CALLISTER, W. (2003). **Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales**. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería. Universidad de Utah, EEUU.
- CASTILLO, M. & VILLA G. (2005). Estudio del comportamiento mecánico – metalúrgico de aleaciones Inconel 600 y Estelita. **Revista Científica** Vol. 9 (1):13-22.
- CONTRERAS, A. (2010). **Materiales nanoestructurados: Comportamientos tribológicos**. (Consultado: 27 de septiembre de 2011). Disponible en: <http://ingenieriademateriales.wordpress.com/2010/02/24/materiales-nanoestructurados-comportamiento-tribologico/>.

- GARCÍA, R. & MOYA R. (1998). ***El aserrío de Dialium guianense (Aubl) Sandwith en Costa Rica***. Centro de investigación en integración Bosque Industria. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- GONZÁLEZ, H. & MESA D. (2004). La importancia del método en la selección de materiales. ***Scientia et Technica***. [En línea], Universidad Tecnológica de Pereira. [Consultado: 24 de enero de 2012]. Disponible:http://clasev.net/v2/pluginfile.php/16192/mod_resource/content/0/Contenido_del_Curso.pdf.
- JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. JUNAC. (1989). ***Manual del Grupo Andino para el aserrío y afilado de sierras de cintas y sierras circulares***. Lima – Perú.
- KALPAKJIA, S. & SCHMID, S. (2002). ***Manufactura. Ingeniería y Tecnología***. Cuarta Edición. México. Prentice Hall.
- KREITH, F. & GOSWAMI, Y. (2005). ***The CRC Handbook of Mechanical Engineering***. Segunda Edición. EEUU. CRC Press.
- MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA INDUSTRIAS. MPPI. (2012). ***Directorio Nacional de Industrias Forestales. Empresas inscritas en el registro nacional de industrias forestales***. Venezuela.
- MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA INDUSTRIAS. MPPI. (2014). ***Plan estratégico del sector industrial venezolano***. Venezuela.
- MORENO, M. (2009). ***Estudio experimental de propiedades mecánicas y tribológicas de recubrimientos de CrN sobre aceros AISI 316 y H-13 obtenidos por la técnica de erosión catódica reactiva magnetrón (spruttering)***. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México.
- MUÑOZ, A. (1986). ***Técnica de preparación y reparación de herramientas cortantes***. Universidad de Los Andes. Venezuela.

- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. (NASA). 1970. ***Elevated temperature instability of Stellite 6B.*** [En línea], [Consultado: 16 de Mayo de 2012] Disponible en: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19700016385_1970016385.pdf
- NININ, L. (1986). ***Manual de aserrado y afilado.*** Universidad de Los Andes. Venezuela.
- NININ, P. & ROSSO, F. (2006). ***Efecto de reaserrado con la conicidad y curvatura sobre el rendimiento de material prima, calidad de piezas aserradas y la trabajabilidad del Pino Caribe (Pinus caribaea, var. hondurensis) de la Orinoquia Venezolana.*** (Trabajo de Maestría) Universidad de Los Andes, Venezuela.
- PRADO, R. & FACCHINI, D. (2009). *Electrodeposition of nanocrystalline cobalt alloy coatings as a hard chrome alternative.* Navar, Public Release 09-776. Canadá.
- RIOS, M. (2005). ***Manual de buenas prácticas de manufactura para la Industria de Aserrío.*** [En línea]. Programa de Desarrollo de Políticas de Comercio Exterior. Perú. [Consultado: 10 de febrero de 2011] Disponible en: http://www.mincetur.gob.pe/comercio/Otros/Penx/estudios/Dimensionamiento_Clasificacion_Visual/Inf_Final_MBP.pdf
- SARACHE, L. (2000). ***Procesos de conformado con arranque de viruta.*** Publicaciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes, Venezuela.
- SALES, C. (1990). ***La scie à ruban. Théorie et pratique du sciage des bois en grumes.*** Center Technique Forestier Tropical, France.
- STURE, H., STAFFAN, J. & MATS, L. (2000). ***Design and evaluation of tribological coatings.*** The Angstrom Laboratory, Tribomaterials Group. Uppsala University. Sweden.
- TREJO, J., NININ, P., ROSSO, F., & NININ, F. (2007). Disminución del desgaste de herramientas cortantes y ahorro energético como efecto de la calidad del filo de Sierras de Cintas. ***Revista***

Forestal Latinoamericana, 22 (41): 37-56.

TREJO, J., NININ, P., & ROSSO, F. (2011). Variación de la calidad de los productos en el aserrado de maderas como efecto de la calidad del filo de sierras de cintas. **Revista Universidad, Ciencia y Tecnología**, 15 (61): 232-241.

TREJO, J., TOLOSA, R., & NININ, P. (2013). **Estudio de las propiedades mecánicas asociadas a capas delgadas de la aleación Cobalto-Cromo (Estelita) y Cromo Duro Electrolítico empleados como recubrimientos metálicos de refuerzo sobre sierras de cintas en el aserrado de la madera.** (Anteproyecto de Maestría). Universidad de Los Andes, Venezuela.

TECNOCROM INDUSTRIAL, S.A. (2011). **Cromo Duro. Níquel Químico. Especificaciones técnicas.** [En línea]. [Consultado: 26 de septiembre del 2011]. Disponible en: http://www.tecnocrom.es/pdf/Especif_TECNOCROM.p.

