

Facultad de Ingeniería Mecánica

# *Trabajo de Diploma*

*Título: Evaluación de la fractura por fatiga  
de las cuchillas picadoras de caña  
del CAI " Ciudad Caracas "*

*Autor: Rodríguez Roger Hyacinth  
Tutores: Dr. Rafael Goytisoló Espinosa  
M.Sc. Juan Gabriel Noa Aguila*

*" Año de la Revolución Energética en Cuba "*

*2005 - 2006*

# DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

“Carlos Rafael Rodríguez”

Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez como parte de la culminación de los estudios de la especialidad de Ingeniería Mecánica; autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estimen convenientes, tanto de forma parcial como total, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

---

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de este envergadura, referido a la temática señalada.

---

Información Científico Técnico.

Nombre y Apellidos. Firma.

---

Computación.

Nombre y Apellidos. Firma.

---

Firma de los tutores

---

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellidos. Firma.

*“Todo nuestro pueblo, todo  
los trabajadores, todos nuestro jóvenes,  
nuestros estudiantes. Incluso, nuestros  
pioneros tienen que tomar conciencia  
de la energía, de sus perspectivas futuras.*

*..... mientras no seamos un pueblo realmente  
ahorrativo, que sepamos emplear con sabiduría y  
con responsabilidad cada recurso,  
no nos podremos llamar un pueblo enteramente  
revolucionario”*

**Cmdte. En Jefe Fidel Castro Ruz  
Clausura 1 Forum Nacional de Energía  
Diciembre de 1984.**

## **Agradecimientos**

A Dios porque sin el nada es posible.

Al Comandante en Jefe Fidel Castro Rúz y la Revolución Cubana.

A mis tutores Dr. Rafael Goytisolo Espinosa y M.Sc. Juan G. Noa Águila tuvieron confianza en mí para llevar a cabo esta tarea.

A mis amigos y compañeros del aula que me han ayudado en todo momento.

A todos aquellas personas que de una forma u otra han tenido que ver y se han preocupado por mi trabajo de diploma.

A todo muchas gracias.

## **Dedicatoria**

A mi madre Magdalena Browne y mi abuela Theresa Joseph que han sido mis primeros profesores y mis guías desde que nací y que contribuyen tanto en mi formación tanto vocacional como profesional.

A mi hermano Jeremiah Hyacinth y hermana Lucy Goodman que sin su gran apoyo no será capaz de llegar a ser profesional.

A mi novia Shekia Smith que con amor y cariño me ha apoyado en todo momento.

De forma especial a la memoria de mi amigo Pedro Torrencía que desgraciadamente ya no se encuentra entre nosotros y su mayor anhelo era convertirse en un profesional.

## Índice

Resume	
Índice	
Introducción.....	1
Capítulo I Descripción del proceso de recepción y preparación de caña para la fabricación de azúcar. ....	
1.1 Equipos involucrados en la recepción y preparación de la caña.....	3
1.2 Las cuchillas picadoras de caña en la fabricación de azúcar de caña.....	7
1.2.1 Generalidades.....	7
1.2.2 Ventajas y desventajas de las cuchillas picadoras de caña.....	9
1.2.3 Descripción y clasificación de las cuchillas picadoras de caña.....	11
1.3 Parámetros fundamentales de operación de las cuchillas picadoras de caña.....	13
1.3.1 Parámetros que diferencian los juegos de cuchillas en su geometría.....	13
1.3.2 Velocidad y sentido de rotación de las cuchillas picadoras de caña.....	14
1.3.3 Ajuste.....	14
1.3.4 Proporción de caña no cortada.....	15
1.3.5 Material de las hojas.....	16
1.3.6 Balanceo de las cuchillas picadoras de caña.....	16
1.4 Particularidades constructivas y de explotación de las cuchillas picadoras de caña de la Empresa Azucarera Ciudad Caracas.....	17
1.4.1 Particularidades Constructivas.....	17
1.4.2 Particularidades de explotación .....	18
Capítulo II Evaluación de la resistencia a la fatiga del CAI "Ciudad Caracas".....	
2.1 Forma y sujeción de las cuchillas picadoras de caña del CAI "Ciudad Caracas" así como ubicación, forma y dimensiones de las grietas de fatiga..	20
2.2 Evaluación de la resistencia a la fatiga para el Primer Juego de Cuchillas.....	23
2.2.1 Torque en el eje.....	23
2.2.2 Fuerza provocado para el torque en condiciones de carga estática.....	24
2.2.3 Fuerza provocado sobre la cuchilla en condiciones de carga dinámica....	24
2.2.4 Fuerza de inercia.....	25
2.2.5 Cálculo de las fuerzas internas en la sección de falla.....	26
2.2.6 Cálculo de las tensiones en el borde del orificio donde se inició la fisura en condiciones de carga dinámica.....	28
2.2.7 Cálculo del factor de seguridad a la fatiga.....	29
2.3 Evaluación a la resistencia a la fatiga para el Segundo Juego de Cuchillas...	32
2.4 Evaluación del factor de seguridad a la fatiga con otros aceros.....	32
Capítulo III Aplicación de la Mecánica de la Fractura en la evaluación del tamaño crítico de las grietas y en la vida residual.....	
3.1 Fuerzas internas en la sección de fallo.....	33
3.2 Tensiones en la sección de fallo.....	33
3.3 Curva de Resistencia Residual y Tamaño Crítico de la Grieta.....	33
3.4 Evaluación del crecimiento subcrítico de la grieta.....	40
Conclusiones.....	44
Referencias bibliográficas.....	46
Bibliografía.....	48
Anexos	

## Resumen

En el Trabajo se caracterizan en primer lugar las particularidades de diseño y construcción de los dos juegos de cuchillas picadoras de caña del CAI "Ciudad Caracas", se investigó en la literatura especializada las cualidades que deben poseer los materiales empleados en su fabricación, se analizaron las características de la fractura, la cual consiste en una grieta semielíptica superficial que se desarrolla en la zona de sujeción de las cuchillas donde se ubica el primer orificio de los tornillos de sujeción, sección esta donde se desarrollan las mayores tensiones de trabajo.

En la investigación se elaboró un esquema de análisis que contempla las tensiones provocadas por la fuerza de inercia en dicha sección y las tensiones en la misma contempladas por la carga de operación, considerando también el efecto dinámico de estas últimas. El cálculo de las tensiones y la evaluación de la resistencia a la fatiga en dicha sección confirman que para el material empleado actualmente en su fabricación las cuchillas presentan una deficiente resistencia a la fatiga. El factor de seguridad a la fatiga en dicha sección da inferior a la unidad lo que implica que la falla por fatiga es inevitable.

La causa de la avería radica en que en la literatura se recomienda el empleo de acero al cromo – tungsteno – vanadio de resistencia a la tracción del orden de  $\sigma_u = 2\ 100$  MPa, tratado térmicamente, con dureza en el filo de 57 a 58 HRC y en la actualidad, tratando de reducir los costos de reparación se utiliza en las mismas acero de bajo carbono con resistencia máxima a la tracción del orden de  $\sigma_u = 380$  MPa, y se busca la dureza del filo rellenando el mismo con electrodos de alta resistencia y dureza, resolviendo el problema de su resistencia superficial, pero descuidando la resistencia volumétrica, lo que provoca las averías. La aplicación de la Mecánica de la Fractura confirma los resultados del Análisis Clásico de Fatiga al demostrarse que con acero CT – 3 la vida no excede de 2 a 3 zafras, mientras que con aceros de bajo o medio carbono aleados de mayor resistencia se puede esperar una vida del orden de más de 5 zafras.

## Introducción

Las cuchillas picadoras tienen como objeto picar la caña para así facilitar el trabajo de la desmenuzadora, con la caña entera, no es posible alimentar regularmente a la misma. El trabajo de las cuchillas convierte a las cañas enteras en pequeños trozos los cuales forman una masa compacta que cae fácilmente en la tolva de alimentación y que la desmenuzadora tomará sin dificultad absorbiéndola de una manera continua. La potencia consumida en los juegos de cuchillas realmente no se consume totalmente pues una parte se recupera en parte en los molinos, en los cuales en presencia de las cuchillas se demandará menos potencia que sin ellas. Habiéndose roto la corteza y los nudos, la compresión de la caña es más fácil y se eleva la extracción. Por otro lado, las cuchillas son un aparato poco costoso y fácil de instalar. Si se cuenta con molinos, más fuertes que lo necesario, o capaces de absorber más cañas que las que pueda manejar la evaporación, no es necesario instalarlas. Pero si la fábrica está bien equilibrada y si se desea aprovechar al máximo los molinos, las cuchillas son convenientes: mejoraran del 10 al 15% la capacidad de ellos y harán posible un ligero aumento en la extracción.

Puede considerarse que la diferencia entre las cañas enteras y las cañas pasadas por las cuchillas es la misma que existe entre un puñado de palillos y un puñado de aserrín. La diferencia entre los dos estados del mismo material se puede ver fácilmente y se muestra en sus respectivas densidades:

Caña entera más o menos mezclada: 125 a 150 kg/m<sup>3</sup>

Caña pasada por las cuchillas: 250 a 300 kg/m<sup>3</sup>

Las cuchillas picadoras, entonces, ejecutan dos funciones y tienen dos ventajas:

- a) Favorecen la capacidad de los molinos transformando la caña en una masa compacta y homogénea.
- b) Mejoran la extracción de los molinos rompiendo la corteza de la caña y facilitando así su desintegración y la extracción del jugo.

Para que las cuchillas picadoras puedan cumplir satisfactoriamente sus funciones deben estar hechas de un acero resistente al desgaste y con buena resistencia mecánica. Según Hugot [7], las hojas deben construirse de acero especial al cromo – tungsteno - vanadio con una resistencia máxima a la tracción  $\sigma_u = 210 \text{ kgf/mm}^2$  y una dureza Rockwell en el filo de 57-58 HRC, en la actualidad, tratando de reducir los costos de reparación se utiliza en las mismas acero de bajo carbono con resistencia máxima a la tracción del orden de  $\sigma_u = 380 \text{ MPa}$ , y se busca la dureza del filo rellenando el mismo con electrodos de alta resistencia y dureza, resolviendo el problema de su resistencia superficial, pero descuidando la resistencia volumétrica, la hipótesis planteada es que las cuchillas actuales las están fabricando de un acero de baja resistencia volumétrica lo que provoca que la vida útil de las mismas es muy pequeña provocando un considerable tiempo perdido durante la zafra y enormes gastos de reparación.

Los objetivos del presente trabajo son:

- Profundizar en la literatura acerca de los requerimientos específicos de los aceros empleados en las cuchillas picadoras de caña.
- Evaluar la resistencia a la fatiga de las cuchillas instaladas en el CAI “Ciudad Caracas”.
- Aplicar la novedosa tecnología de la Mecánica de la Fractura para pronosticar su vida remanente con el acero empleado en la actualidad y con otros aceros de mayor resistencia y tenacidad, con vistas a demostrar la necesidad de reanalizar el empleo de un nuevo material para su fabricación reduciendo de esta manera el tiempo perdido en zafra por roturas imprevistas y los gastos en reposición de estas cuchillas.

## Capítulo I Descripción del proceso de recepción y preparación de caña para la fabricación de azúcar.

### **1.1 Equipos involucrados en la recepción y preparación de la caña.**

El proceso de recepción y preparación de la caña tiene diferentes equipos: basculador, repartidor de caña o primera estera, rompe bulto, conductor de caña o segunda estera, nivelador de caña o gallegos, cuchillas picadoras [4,5,13].

**Basculadores:** En los basculadores hay que distinguir dos tipos características, hay un tipo que se vira de cabeza y otro que se vira de costado, ambos tipos para virar carros de ferrocarril y accionados por medio de presión hidráulica. Consisten en una plataforma paralela y al costado, o en la cabeza del conductor, cuando es para virar o descargar por la cabeza, cuya plataforma esta provista de carriles para dar entrada y salida a los carros. Como es natural, cuando se usa el basculador para virar o descargar la caña de cabeza, no hay posibilidad de dar salida al carro por otro lado que no sea por el mismo lado de la entrada, por lo cual este inconveniente de los basculadores de virar de cabeza ha sido motivo de que su uso vaya declinando y al mismo tiempo se vayan empleando con frecuencia los de virar por un costado, además el basculador de virar de cabeza tiene el inconveniente de que los carros tienen que ser cerrados por lados con tabloncillos de madera, cosa esta que encarece la manipulación y el equipo, lo que no sucede con los carros para basculador de un costado porque los carros llevan las paredes normales, ya sean de jaula, de hierro o de madera, y cuando entran al basculador pueden salir continuamente empujados por el siguiente carro a descarga, y tiene la ventaja, además de que pueden entrar el basculador de cualquier lado porque ambos están preparados en la misma forma para descarga.

Estos basculadores son accionados por medio de presión hidráulica, debajo de la plataforma que vira el carro hay dos o tres cilindros de hierro con pistones salientes acoplados a dos o tres palancas articuladas a la plataforma, distribuidos

simétricamente. Estos cilindros son accionados por presión hidráulica que hace que el pistón de los mismos ascienda o descienda inclinando la plataforma ya que virar el carro o para volverlo a su lugar inicial. El equipo hidráulico consta de un tanque de conveniente capacidad para depósito de emulsión una bomba centrífuga accionada por electromotor, y las tuberías de ida y de retorno del líquido hidráulico que están debajo de la plataforma.

También hay basculadores para camiones los cuales descansan en los mismos principios estudiados para carros de ferrocarril y que no se diferencian nada más en que estos no llevan, como es natural, los raíles, constando de una plataforma para virar el camión por la parte trasera del mismo.

**Repartidor de caña.** Generalmente el basculador descarga la caña en la forma dicha, a un conductor repartidor de caña que va dejando caer esta al conductor general que lleva la caña a la desmenuzadora.

El repartidor pueden estar instalado en línea recta con el conductor general, en este caso, el repartidor va echando la caña al conductor por el extremo de este para lo cual el repartidor gira en un plano superior al del conductor. También puede estar instalado perpendicular al conductor, entonces el repartidor descarga o echa la caña al conductor por un lado al extremo de este, girando también en un plano superior al del conductor.

El motivo de que el basculador no descargue la caña directamente al conductor general haciéndolo al repartidor, es debido a que la caña sale de los carros o camiones, al ser estos descargados por el basculador en montones más o menos abultados que de ir así hasta los molinos causarían graves perjuicios y atoros en los mismos, por lo cual el repartidor es un conductor con gobierno independiente que va echando la caña gradualmente al conductor general.

**Rompe bulto.** El rompe bulto consta de un eje apoyado en dos pedestales y esta a lo largo del repartidor en su extremo más próximo al conductor y lleva unos brazos fijos que entran en contacto con la caña dejándola caer en el conductor un poco más suelta que como cae inicialmente desde el carro o camión. Estos giran entre 20 y 40 r.p.m.

**Conductor de caña.** El conductor de caña, al igual que el repartidor consta de una estera de tabillas generalmente de hierro, o de acero, acopladas a cadenas especiales de rolletes, la estera consta dos, tres o cuatro cadenas, cualquiera que sea el número de cadenas que lleve estas van espaciadas proporcionalmente al ancho del conductor. El conductor de caña toma su origen por debajo del conductor repartidor del basculador, para recibir la caña del repartidor del basculador, formando un plano inclinado hasta llegar a la desmenuzadora. La estructura puede ser de hierro o de madera, pero es preferible el primero; consta de los hileras de columnas de vigas de hierro formando el ancho del conductor sobre las que se montan las ruedas motoras para cadenas, que son ruedas dentadas con el mismo paso de la cadena, y ruedas auxiliares o guías en número, en cada eje, igual al número de cadenas del conductor, para que por estas ruedas vayan deslizándose las cadenas en su movimiento de giro. Por debajo de la parte superior de la estera, que es la que lleva la carga de la caña, se suelen poner unos angulares bien rectos y uniformes para que las cadenas se apoyen a arrastre por los mismos, para lo cual los rolletes y los angulares indicados deben estar perfectamente engrasados para disminuir en lo posible el rozamiento. El conductor lleva en ambos lados unas guarderas para evitar que la caña se salga del conductor por los lados, las mismas pueden ser de planchas de hierro o de madera, pero es preferible las primeras.

Tanto los basculadores como los conductores deben ir cubiertos para evitar el deterioro que ocasiona la intemperie y para evitar que por las lluvias resbale la caña en los conductores.

**Nivelador o gallegos.** A pesar de que la caña se echa con mucho cuidado del repartidor al conductor esta siempre se escapa en montones desiguales que es necesario emparejar, lo que se hace con los gallegos. Consta de un eje montado sobre el conductor a poca distancia del repartidor provisto de piezas de hierro parecidas a las cuchillas picadores pero desde luego sin filo, giran a poca velocidad, alrededor de 75 r.p.m y su función es emparejar la caña en el conductor a fin de que lleve una altura uniforme para facilitar así el trabajo de las cuchillas rotativas que recibiendo en un colchón uniforme son más eficientes. Generalmente los gallegos son movidos por medio de una transmisión por cadena con un motor eléctrico, aunque dicha transmisión puede ser también accionada por medio de maquina de vapor.

**Cuchillas picadores.** Las cuchillas picadores tienen por objeto picar la caña para así facilitar el trabajo de la desmenuzadora. Constan de un eje horizontal montado sobre el conductor de caña sobre dos cojinetes, el cual se movido generalmente por un motor eléctrico acoplado directamente o por cadena silenciosa o por correa, según los casos aunque las más frecuente es el motor acoplado directamente el aje.

Las cuchillas van montadas en dicho eje en un soporte de hierro fundido al cual se fija el cuerpo de las cuchillas y la parte que entra en contacto con la caña, que en ocasiones tiene fijo y en otras no, se rellena con soldadura especial a fin de hacerlas más resistentes. Más adelante se tratara de la descripción y clasificación de las cuchillas picadoras de caña.

Las cuchillas deben ir a una altura del conductor previamente fijada. Hasta ahora no hay una regla fija para determinar la altura que deben tener estas sobre las tabillas del conductor. En algunos ingenios se montan las cuchillas a 6 pulgadas de distancia del conductor en otros a 2 pulgadas y hasta  $1\frac{1}{3}$  pulgada; pero es indudable que mientras más bajas se monten las cuchillas la eficiencia

ha de ser mejor, de 2 a 3 pulgadas es una altura prudencial, y en algunas casos distancia menor ha dado muy buenos resultados.

## **1.2 Las cuchillas picadoras de caña en la fabricación de azúcar de caña.**

### **1.2.1 Generalidades.**

Las cuchillas no son equipo indispensable en la fábrica de azúcar. Algunas no las tienen y desarrollan un trabajo bastante bueno sin ellas. Las cuchillas, sin embargo, son una parte muy útil del equipo y se pagan a si mismas muy rápidamente.

Con la caña entera, no es posible alimentar regularmente a la desmenuzadora. Con la instalación de un nivelador, sobre el conductor, puede obtenerse un colchón que llegara a la desmenuzadora en paquetes sucesivos, y su baja densidad hará difícil el trabajo de la desmenuzadora, que consiste brevemente, en absorber la mayor cantidad de caña posible en un tiempo dado.

Por otro lado, la superficie metálica de los cilindros de la desmenuzadora, resbala frecuentemente en la corteza tersa, cerosa y pulida de la caña, lo que ocasiona atascamientos e interrupciones en la alimentación. El trabajo de las cuchillas convierte a las cañas enteras chocan unas contra otras y al arquearse dejan espacios vacíos entre ellas, los pequeños trozos formados por las cuchillas forman una masa compacta que cae fácilmente en la tolva de alimentación y que la desmenuzadora tomara sin dificultad absorbiéndola de una manera continua.

Puede considerarse que la diferencia entre las cañas enteras y las cañas pasadas por las cuchillas es la misma que existe entre un puñado de palillos y un puñado de aserrín. La diferencia entre los dos estados del mismo material se puede ver fácilmente y se muestra en sus respectivas densidades:

Caña entera más o menos mezclada: 125 a 150 kg/m<sup>3</sup>

Caña pasada por las cuchillas: 250 a 300 kg/m<sup>3</sup>

Las cuchillas cañeras, entonces, ejecutan dos funciones y tienen dos ventajas:

c) Favorecen la capacidad de los molinos transformando la caña en una masa compacta y homogénea.

d) Mejoran la extracción de los molinos rompiendo la corteza de la caña y facilitando así su desintegración y la extracción del jugo.

Desde el punto de vista de su resistencia a la presión, la caña puede, en efecto, compararse con un largo cilindro reforzado por paredes transversal, divisorias (los nudos). De esta manera, presenta al molino una resistencia similar a la de un tallo de bambú, cuyos entrenudos están llenos de un pulpa saturada de azúcar (la caña es pariente cercano del bambú y las dos plantas se han cruzado con éxito para obtener híbridos). La pulpa en el interior de estos cilindros, que los ocupa por completo, se extraerá mas rápidamente al abrirlos y romper las paredes divisorias (Fig. 1.1)



**Fig. 1.1 Estructura de la caña**

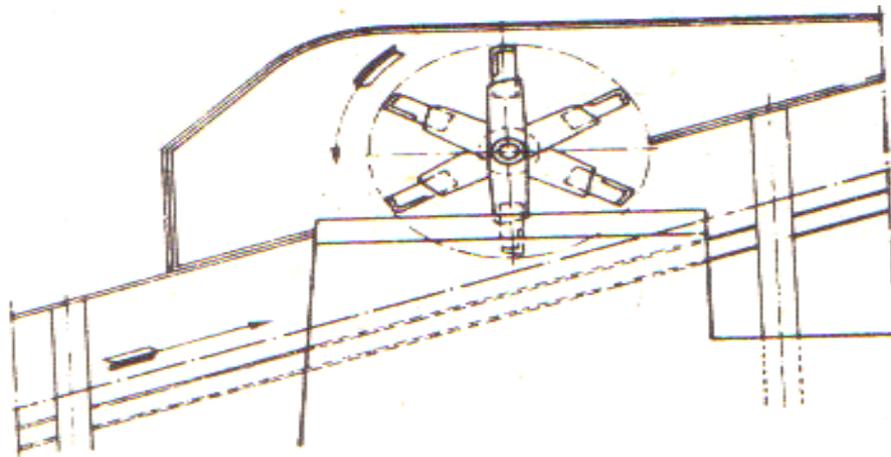
Sin embargo, el valor de las cuchillas en el desarrollo de las dos funciones descritas, no es equivalente:

a) En cuanto al aumento de capacidad que favorecen, son irremplazables. Si no hay cuchillas la desmenuzadora tomara solo las cañas que pueda absorber del paquete de canas enteras que se le presenta.

b) En cuanto a la extracción, por el contrario, la desmenuzadora y los molinos nos tienen precisamente el objeto de romper la caña y desmenuzar la corteza y los nudos. Puede entonces un molino llevar a efecto las funciones de las cuchillas mediante un buen trabajo de la desmenuzadora y de los molinos. En particular, puede considerarse que el aumento obtenido en la extracción con el aumento de un juego de

cuchillas es apreciablemente inferior al que se obtendría con la adición de un molino más.

Es entonces, principalmente para aumentar la capacidad de los molinos, por lo que se instalan las cuchillas.



**Fig.1.2 Esquema de montaje de las cuchillas**

### **1.2.2 Ventajas y desventajas de las cuchillas picadoras de caña.**

La potencia consumida por las cuchillas no se pierde enteramente, pues se recupera en parte en los molinos. Habiéndose rota la corteza y los nudos, la compresión de la caña es más fácil.

Por otro lado, las cuchillas son un aparato poco costoso y fácil de instalar. Si se cuenta con un molino, más fuerte que lo necesario, o capaz de absorber más cañas que las que pueda manejar la evaporación, no es necesario instalarlas. Pero si la fábrica está bien equilibrada y si se desea aprovechar el máximo los molinos, las cuchillas son convenientes: mejoraran del 10 al 15% la capacidad de ellos y harán posible un ligero aumento en la extracción.

Además su costo es bastante menor que el 15% del valor de una batería. Su conveniencia es, entonces, evidente desde el punto de vista económico: mejor hacer un trabajo dado en T.C.H., con un cierto molino y un juego de cuchillas, que con un molino 15% más grande y sin cuchillas. Se ahorrará así,

en el costo de la primera instalación tanto como en el consumo de vapor total en los motores y en el precio del azúcar.

Las opiniones son bastante diversas en cuanto al incremento de la capacidad.

Tromp considera del 25 al 30%, pero en otra parte (ISJ, 1937) habla de un máximo de 25%.

Salinas, en Cuba (FAS, abril 1940) da el 10%.

Macbeth, para Natal (ISJ, 1936) de del 3 a 7%.

De la experiencia del autor, en diversas fábricas, el incremento por esperarse depende de la regularidad en la alimentación de la desmenuzadora. Si la alimentación es defectuosa, el incremento será notable, si la alimentación es buena, será menor. En condiciones normales, puede esperarse un incremento del 10 a 15%.

¿Si un juego de cuchillas es necesario, también lo son 2? ¿Si ya existe un juego de cuchillas, es conveniente instalar el segundo?

Ambas preguntas son discutibles. La caña que pasa por 2 juegos de cuchillas, evidentemente ha experimentado una preparación mas completa. Sin embargo, parece ser que las ventajas que obtienen no compensan el gasto:

- (1) Desde el punto de vista de la extracción, de acuerdo con muchas experiencias, el incremento aportado por el segundo juego en bien poco.
- (2) Desde el punto de vista de la capacidad, el incremento que aporta es aun menor que el del primer juego. Se puede indicar, aproximadamente:

**Tabla 1.1 Efectividad relativa de los juegos de cuchillas.**

	Sin Cuchillas	Con 1 juego	Con 2 juego
Capacidades relativa	1	1.15	1.20

El segundo juego solo es conveniente en dos casos:

- (1) Cuando no se puede llegar a un ajuste suficientemente bajo en el primer juego y este deja una gran proporción de cañas no cortadas.
- (2) Cuando la cana queda mal preparada y la batería de molinos es corta. En este caso es conveniente llevar a los molinos pedazos de caña lo más divididos que sea posible de manera que pueda extraer el máximo desde los primeros molinos.

El segundo juego de cuchillas es entonces poco conveniente a la cabeza de una batería de numerosos molinos. Es a partir de una batería de 5 molinos (15 cilindros), que Maxwell, lo desaconseja; por el contrario, su opinión es que para 4 molinos o menos (12 cilindros), hacia abajo, puede prestar utilidad. Maxwell piensa también que el segundo juego de cuchillas hace casi inútil a la desmenuzadora, ya que no es posible desmenuzar una caña ya convertida en pequeños fragmentos. Esta opinión es valedera, sobre todo en la krajewski, cuyo efecto de seccionamiento no tendría ningún interés. Maxwell no aconseja la instalación de un segundo juego de cuchillas cuando la batería cuenta con una desmenuzadora.

La opinión del autor es que aun cuando el segundo juego de cuchillas proporción un aumento en la capacidad, mucho menos espectacular y atractivo que el primero es conveniente instalarlo en cualquier batería cargada a su máximo, o sobrecarga, y partidamente con molienda de más de 60 T.C.H.

### **1.2.3 Descripción y clasificación de las cuchillas picadoras de caña.**

El tipo clásico se muestra en la Fig. 1.2 Este consiste en un eje pesado de sección cuadrada, hexagonal u octagonal montado en rodamiento de bolas y en cual están fijos varios brazos cada uno de los cuales lleva dos hojas colocadas simétricamente con relación el eje.

Si el eje es hexagonal, el segundo brazo estará desviado  $60^\circ$  con relación al primero; el tercero,  $60^\circ$  con relación al segundo y así sucesivamente. De esta manera, si el eje tiene 24 brazos, habrán 48 hojas distribuidas en filas de 8 en 6

diferentes planos axiales. Para reducir el paso y aumentar el número de planos cortantes, los brazos que llevan a las cuchillas se fabrican de tal manera que las dos hojas de cada brazo giran en dos planos diferentes separados por la mitad del paso. De esta manera se duplica el número de planos cortantes. Otra manera eficiente de colocar las cuchillas picadoras de caña es rotando en los ejes de sección circular los soportes consecutivamente  $30^\circ$  y se logra una distribución que asegura que un número menor de cuchillas estén en contacto con la caña y hace menos intermitentes los contactos de estas con el colchón.

Vistas de frente, las 48 hojas giran entonces en 48 planos perpendiculares al eje, llamados planos de corte y que constituyen el mismo número de círculos de rotación.

El término paso de las cuchillas se aplica a la distancia media, medida paralelamente al eje, que separa dos círculos de rotación sucesivos.

Las hojas de las cuchillas son removibles de manera que pueden reemplazarse fácilmente. Las cuchillas se instalan sobre el conductor de caña, de manera que la extremidad de sus hojas quede separada de las tablillas a una distancia denominada ajuste.

**Diversos diseños.** Ciertos constructores han introducido a partir del tipo clásico, modificaciones de detalle que tienen como objeto principal:

- 1) Aumentar el trabajo de las hojas disminuyendo su desgaste.
- 2) Producir el auto-afilado de las hojas sobre lado opuesto al de ataque haciéndolas reversibles.
- 3) Evitar que el desgaste disminuya el largo de las hojas. La casa Mirrlees-Watson obtuvo este resultado construyendo hojas de punta doblada; de esta manera el desgaste no disminuye el radio de corte y se obtiene al mismo tiempo un efecto de corte transversal que se une al corte longitudinal de la parte recta de la hoja.
- 4) Disminuir las consecuencias de los choques montando la cuchilla sobre charnelas, lo que permite obtener pequeños desplazamientos en la línea de corte.

En la Fig 1.3 se muestran los diseños más comunes o más interesantes.

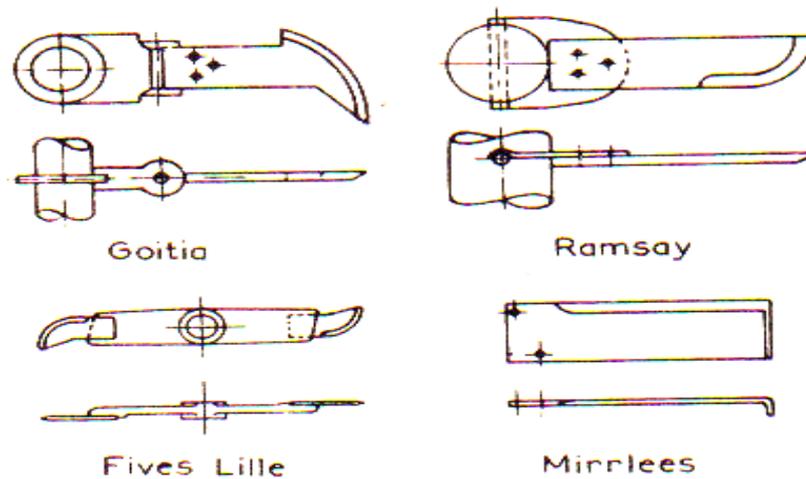


Fig. 1.3 Tipos de cuchillas

### 1.3 Parámetros fundamentales de operación de las cuchillas picadoras de caña.

#### 1.3.1 Parámetros que diferencian los juegos de cuchillas en su geometría.

Existen diferentes parámetros que describen los juegos de cuchillas picadoras de caña:

#### Paso

Se ha visto ya, que el paso de las cuchillas es el intervalo que separa los círculos de rotación, uno de otro, o los planos de corte de 2 hojas sucesivas.

El paso mas frecuente es; 50mm.

Cuando se trabaja con cañas duras, como ocurre en Sud- África, y sobre todo, si se presentan paralelas al conductor, se emplea un paso de 22 mm.

#### Número de Hojas.

El paso da el número de las hojas. Si cada hoja en un plano distinto, se tendrán:

$$N = \frac{L}{p} - 1 \quad (1)$$

N= numero de hojas.

L= ancho del conductor de caña, en mm.

P= paso de las cuchillas, en mm.

Cuando la Formula 1 da un número N impar, se adopta siempre el número par inmediatamente inferior: en este caso, el intervalo entre las hojas extremas y los flancos del conductor, será superior al paso.

### **1.3.2 Velocidad y sentido de rotación de las cuchillas picadoras de caña.**

La velocidad de las cuchillas debe ser de 400 a 600 r.p.m. La velocidad adoptada universalmente es de 500 r.p.m. En Sud África va de 500 a 700 r.p.m con una media de 600 r.p.m (ISJ, 1948.) .Sin embargo, en Mauricio existen cuchillas que giran a 250 0 300 r.p.m, con resultados medianos. Inversamente, en algunos países, la velocidad se ha llevado hasta 1200 r.p.m. Puede pensarse que con estas velocidades se obtendrían pedazos de caña muy pequeños; sin embargo, a tales velocidades el desgaste de las hojas debe ser muy rápido y la potencia consumida, considerable.

### **1.3.3 Ajuste**

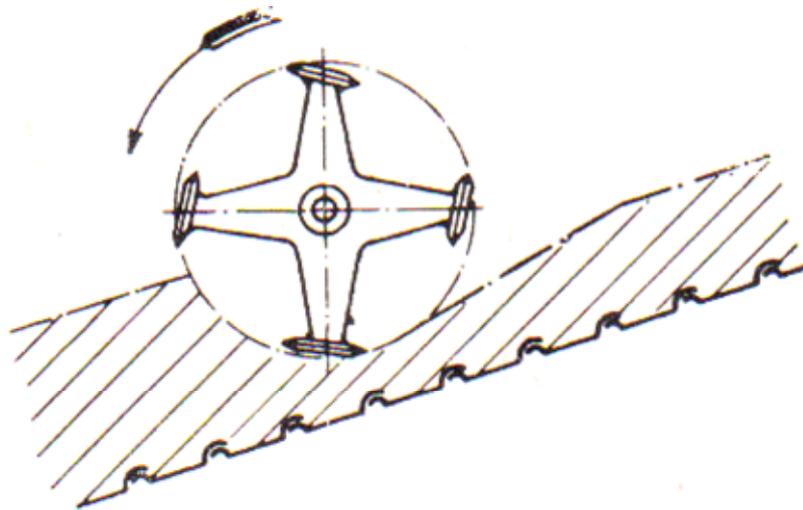
El ajuste de las cuchillas es el intervalo que queda entre el círculo descrito por la extremidad de las cuchillas y las partes más salientes de las tablillas del conductor (Fig. 1.4). No es conveniente bajar a las cuchillas hasta una posición muy próxima al conductor, lo que corresponde a una ajuste de 25 a 30mm. Esto se debe a que cañas no cortadas que quedan en el fondo del conductor juegan en papel importante en la alimentación de la desmenuzadora: estas cañas enteras arman a la masa de pedazos de caña y contribuyen a meterlas entre los cilindros. Al suprimirse esta armadura, pueden ocurrir atascamientos en la desmenuzadora.

Un buen ajuste medio, para las cuchillas, variara entre 8 y 15 cm, en promedio de 10 a 12 cm. No es conveniente disminuir el ajuste debajo de 5cm.

El ajuste es un factor importante en el trabajo de las cuchillas. De este depende la proporción de cañas cortados y por consecuencia, en cierta medida, la eficacia de ellas.

Cuando se instalan 2 juegos de cuchillas:

- (1) El primero puede dotarse de pocas hojas. En general se calcula un numero de  $\frac{2}{3}$  a  $\frac{3}{4}$  partes del numero de hojas del segundo juego.
- (2) Deberá instalarse en primera lugar al que gira más lentamente.
- (3) El ajuste al primer juego debería ser alrededor de  $\frac{1}{3}$  de la altura del colchón de caña. Por el contrario, el segundo tendría un ajuste mas cerrado. Por ejemplo, para un colchón de 75cm, se ajustara el primer juego a 25cm y el segundo a 5cm del conductor.



**Fig. 1.4 Cuchillas con hojas horizontales.**

#### **1.3.4 Proporción de caña no cortada.**

Se obtiene inmediatamente con la formula:

$$i = \frac{r}{h} \times 100 \quad (2)$$

$i$  = peso de las cañas no cortadas, % peso trabajado

$r$  = ajuste de las cuchillas, en mm.

$h$  = altura del colchón de cana, en mm

Recuérdese que  $h$  esta dada en mm en la igualdad.

$$h = \frac{1000C}{60vLd}$$

$C$  = trabajo de los molinos en T.C.H.

$v$  = velocidad del conductor de cañas en m/min.

$L$  = ancho del conductor, en m

$d$  = peso del  $m^3$  de canas, antes de las cuchillas, en  $kg/m^3$

$d = 125kg/m^3$  (cañas mezcladas)

$d = 150kg/m^3$  (cañas paralelas)

La proporción de las cañas cortadas es, evidentemente:

$$k = \frac{100 - i}{100} \quad (3)$$

### 1.3.5 Material de las hojas.

Las hojas deben construirse de acero especial. Five- Lille las construye de acero al cromo tungsteno-vanadio con una  $\sigma_u = 210 \text{ kgm/mm}^2$  en el filo o una dureza Rockwell de 57-58 HRC.

Otra manera de construcción de las hojas es hacerlas de acero de construcción y rellenándolas con un electrodo que proporcione los valores de dureza y resistencia al desgaste requeridos.

### 1.3.6 Balanceo de las cuchillas picadoras de caña.

Las cuchillas deben estar bien equilibradas. Para evitar un desequilibrio, al montarse antes de la zafra, o después de afilarse las hojas debe pesarse y repartirse de 2 en 2 a fin de montar en cada brazo 2 hojas opuestas de peso semejante. Asimismo, si se cambia una hoja, debe quitarse la opuesta y

reemplazarse ambas por dos nuevas a usadas, pero del mismo peso. El eje se hace girar varias veces comprobando que se detenga en lugares siempre diferentes y en caso que siempre se detenga en la misma posición se sueldan contrapesos hasta evitar este problema.

## **1.4 Particularidades constructivas y de explotación de las cuchillas picadoras de caña de la Empresa Azucarera Ciudad Caracas**

### **1.4.1 Particularidades Constructivas**

En la empresa azucarera Ciudad Caracas están instalados dos juegos de cuchillas, acopladas ambas directamente al motor, con una distancia entre apoyos de 2950 mm. Se utilizan rodamientos 22244B según catálogo SKF.

En la tabla 1.1 se muestran datos generales de los juegos de cuchilla que se utilizan en el proceso de fabricación de azúcar de la Empresa Azucarera Ciudad Caracas.

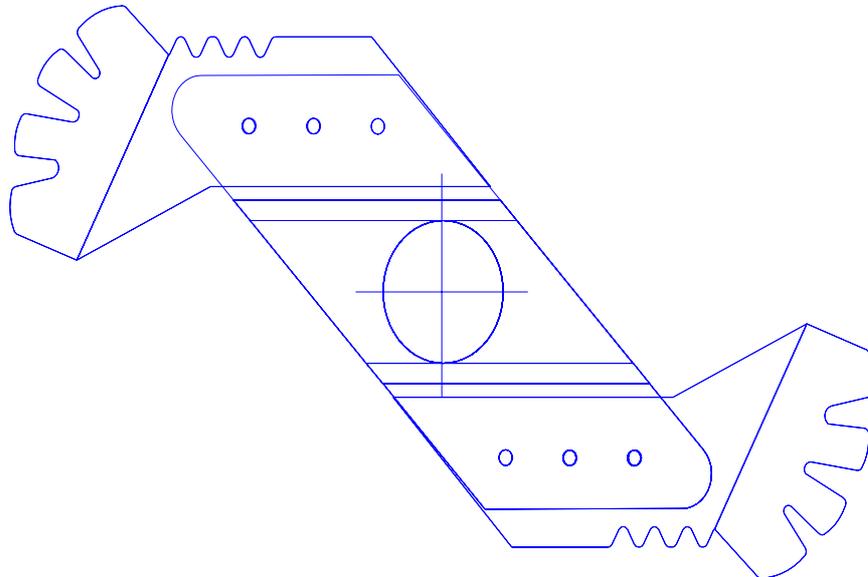
**Tabla 1.2 Datos generales de los juegos de cuchillas utilizados.**

Juego de cuchillas	Paso (mm)	Número de hojas	Ajuste (mm)	Velocidad de giro (r.p.m.)	Potencia Nominal. (kW)
Primer Juego	25	52	50.8	590	400
Segundo Juego	25	52	38.1	590	630

Las cuchillas están construidas de Acero CT3 y se rellenan en la superficie que entra en contacto con la caña con electrodos duros que garanticen una elevada resistencia al desgaste, los más usados en la industria azucarera actual son el DURMATIC-H10, HF-600, UTP-711, UT-640.

Las cuchillas del primer juego están montadas sobre soportes dobles mediante tres tornillos, estos soportes están distribuidos a 120° unos de otros,

el peso promedio de las cuchillas oscilan por los 35 kg cada una y se colocan dos cuchillas en cada soporte como se muestra en la Fig. 1.5



**Fig. 1.5 Colocación de dos cuchillas en cada soporte**

Para la puesta en marcha del juego de cuchillas durante la molienda se utiliza un variador de velocidad que garantiza que el motor no arranque a su velocidad máxima, sino que va aumentando gradualmente, evitando sobrecargas en las cuchillas y el motor para ir venciendo la carga.

#### **1.4.2 Particularidades de explotación**

Las roturas de las cuchillas son una falla común en los Centrales Azucareros, es de gran importancia evitar dicha rotura debido a que se paraliza el proceso de molienda de la caña, o en casos que se omite hace menos eficiente el proceso de extracción de jugo por las funciones que estas desempeñan.

En la tabla 1.3 se muestran las principales fallas por años y el tiempo de parada por dicho concepto.

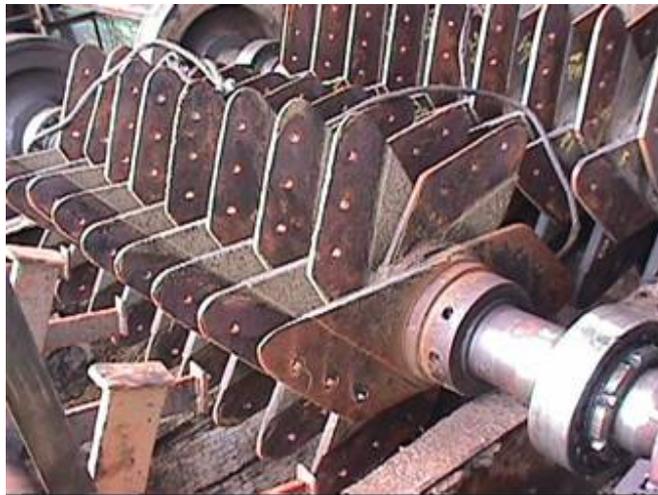
**Tabla 1.3 Interrupciones y causas de roturas**

<b>Año</b>	<b>Tiempo de interrupción y causa.</b>
<b>2000</b>	La Empresa no paró por fallas o interrupciones operativas en ninguno de los juegos de cuchillas.
<b>2001</b>	La Empresa no paró por fallas o interrupciones operativas en ninguno de los juegos de cuchillas.
<b>2002</b>	La Empresa estuvo detenida 7,5 horas por averías de cuchillas
<b>2003</b>	La Empresa Azucarera Ciudad Caracas no molió.
<b>2004</b>	En este año la Empresa Azucarera estuvo detenida por fracturas de las cuchillas en 8 ocasiones de la siguiente manera, 8h y 45min; 1h y 55min; 3h y 20min; 1h y 30min; 1h y 40min; 15min.
<b>2005</b>	En este año la Empresa Azucarera estuvo detenida por fallas en los juegos de cuchillas 7 ocasiones de la siguiente manera, 58min; 4h; 4h y 19min; 4h y 25min; 5h y 25min; 2h y 15min; 4h y 11min.
<b>2006</b>	Hasta el momento se ha producido una falla de dos juegos de cuchillas provocando una parada de 4 h y 12 min.

## Capítulo II Evaluación de la resistencia a la fatiga del CAI "Ciudad Caracas".

### **2.1 Forma y sujeción de las cuchillas picadoras de caña del CAI "Ciudad Caracas" así como ubicación, forma y dimensiones de las grietas de fatiga.**

En la Fig. 2.1 se muestra el árbol de las cuchillas picadoras con los soportes de sujeción montados.



**Fig. 2.1 Árbol de las cuchillas del CAI "Ciudad Caracas" con los soportes de sujeción.**

En la Fig. 2.2 se muestra una de las cuchillas picadoras, con los cordones de soldadura que se utilizan como refuerzos del filo para prevenir el desgaste frontal y lateral. Como referencia para evaluar el tamaño se colocó en la foto un Pie de Rey de 150 mm.

En la Fig. 2.3 se muestra una vista ampliada del relleno del filo.

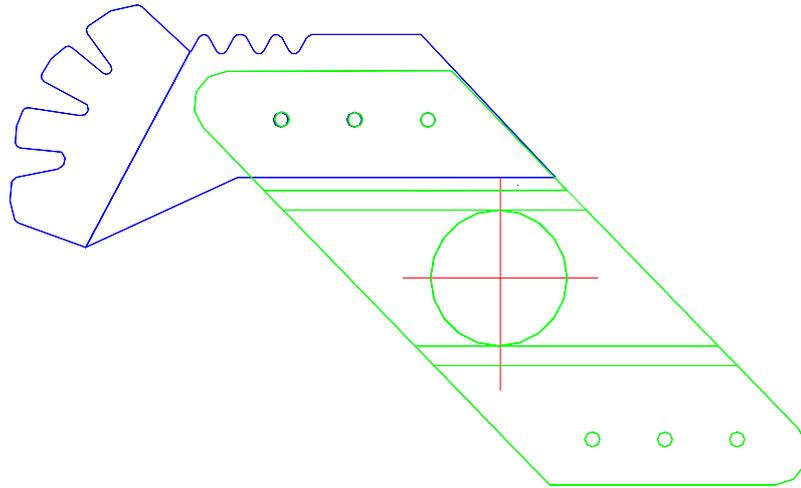


**Fig. 2.2 Forma de las cuchillas picadoras del CAI “Ciudad Caracas”.**



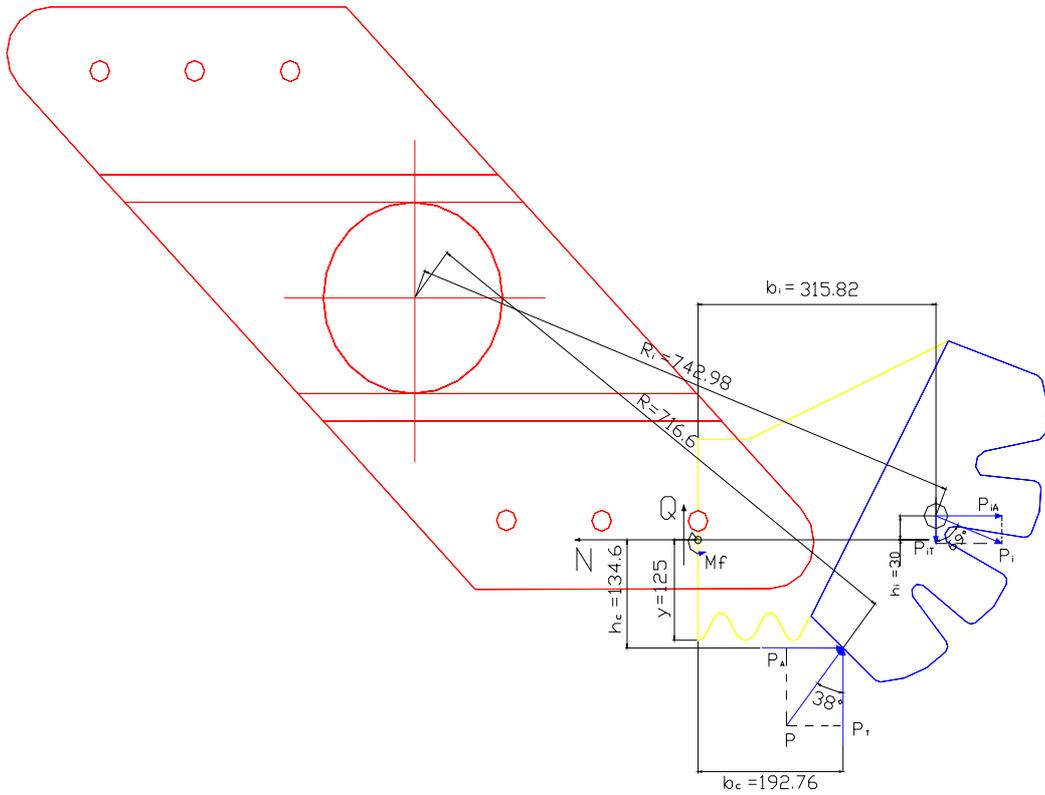
**Fig. 2.3 Vista ampliada del relleno del filo.**

En la Fig. 2.4 se muestra un esquema de la forma de las cuchillas picadoras de caña del CAI “Ciudad Caracas” y de su forma de sujeción con relación al núcleo central soporte.



**Fig. 2.4 Forma de las Cuchillas del CAI “Ciudad Caracas” y de su fijación al soporte central.**

En la Fig. 2.5 se muestran las cargas que actúan sobre las cuchillas que son la fuerza de inercia  $P_i$  y la fuerza de corte  $P_T$ , y se señala la sección de falla, ubicada en la posición del primer tornillo de sujeción de la misma, así como la fuerza normal, la de cortante y el momento flector en dicha sección.



**Fig. 2.5 Cargas sobre la cuchilla y fuerzas internas en la sección de falla por fatiga en la cuchilla.**

En la Fig. 2.6 se muestra la forma de la grieta de fatiga y su ubicación alrededor del primer orificio para los tornillos de sujeción. La grieta es del tipo semiéptica superficial y se extiende casi a través de todo el espesor antes de convertirse en crítica y producir la fractura de la cuchilla.





Fig. 2.6 Forma y proporciones de la grieta por fatiga en el momento de la fractura.

## 2.2 Evaluación de la resistencia a la fatiga para el Primer Juego de Cuchillas.

### 2.2.1 Torque en el eje

El primer juego de cuchillas consume una potencia de 400 kW y giran a una velocidad de 590 r.p.m. el torque en el eje será [15,16]:

$$Mt = 955 * \frac{N(Kw)}{n(rpm)}$$

Donde: Mt- Torque a transmitir (kN-cm)

N- Potencia demandada = 400 (kw)

n- Velocidad de giro de las cuchillas = 590 (rpm)

$$Mt = 955 * \frac{400(kw)}{590(rpm)}$$

$$\boxed{Mt = 647.5} \text{ kN-cm}$$

### 2.2.2 Fuerza provocado para el torque en condiciones de carga estática[6]:

$$P_{est} = \frac{Mt}{R * Z}$$

Donde: P- Fuerza de corte

R- Distancia del centro del rotor al punto de aplicación de la fuerza  
=71.66 cm

Z= 9 (numero de cuchillas que corta)

$$\text{Entonces: } P_{est} = \frac{647.5}{71.66 * 9}$$

$$P_{est} = 1.0 \text{ kN}$$

La fuerza sobre la cuchilla se multiplicará por un coeficiente de carga dinamica teniendo en cuenta el impacto de esta sobre la caña.

### 2.2.3 Fuerza provocado sobre la cuchilla en condiciones de carga dinámica.

$$P_{din} = P_{est} \cdot k_{din}$$

Donde:

$P_{est}$  – Fuerza en condiciones de carga estática.

$k_{din}$  – Coeficiente de carga dinámica.

Para poder determinar la carga de trabajo real sobre las cuchillas es preciso poder estimar o calcular las cargas dinámicas que se generan en el caso de una cuchilla picadora que trabaje en las condiciones de las cuchillas del CAI “Cuidad Caracas”. Según Reshetov [20] para el caso de acoplamiento con grandes masas rotatorias y cargas de choque como son: molinos, laminadores, etc.

$$k_{din} = 2.5 \text{ a } 3 \text{ y más}$$

Según datos de AFBMA (Anti-friction Bearing Manufacturers Association), [21] para el cálculo de los cojinetes de rotores en máquinas con choques moderados.

$$k_{din} = 1.5 \text{ a } 3$$

Según Pisarenko [18], el coeficiente de carga dinámica durante el impacto torsional se puede obtener por la expresión:

$$k_{din} = 1 + \sqrt{1 + \frac{T}{U} \cdot \frac{1}{1 + k_m \cdot \frac{m_0}{m}}}$$

Donde:

T - Energía cinética del cuerpo que golpea en el instante del impacto (Joules).

U - Energía potencial elástica de deformación del cuerpo golpeado bajo la acción estática del cuerpo que golpea (Joules).

$m_o$  – masa del cuerpo golpeado.

$m$  – masa del cuerpo que golpea

$k_m$  – coeficiente de reducción de la masa del cuerpo golpeado en el punto de impacto.

Si la masa del cuerpo golpeada  $m_o \ll m$ , que es el caso de las cuchillas picadoras de caña analizadas, según [17], se puede utilizar la ecuación:

$$k_{din} = \sqrt{1 + \frac{T}{U}}$$

En el trabajo [11] se utiliza esta última expresión de forma aproximada para calcular el coeficiente de carga dinámica de un molino triturador de plástica, obteniéndose un valor medio de  $k_{din} \cong 5,5$ .

Basados en todas estas referencias asumiremos un valor del coeficiente de carga dinámicas.

$$k_{din} \cong 5$$

$$P_{din} = P_{est} \cdot k_{din} = 1 \cdot 5 = 5 \text{ kN}$$

#### 2.2.4 Fuerza de inercia

La fuerza de inercia sobre la sección analizada se determinó por la expresión

$$P_i = m \cdot a_n \text{ (kN)}$$

Donde:  $P_i$  – fuerza de inercia

$$a_n = w^2 \cdot R_i \text{ – aceleración normal en } (m/s^2)$$

$m$  – masa del tramo de cuchilla analizado en (kg)

$$P_i = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot R_i}{1000} \text{ kN}$$

Donde:  $m = \gamma \cdot V$  - masa de la cuchilla (kg)

$\gamma$  – densidad  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$V$  - volumen de la cuchilla en  $\text{m}^3$

$\gamma = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$\text{Volumen} = 3063 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m = 23.89 \text{ kg}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 590}{60}$$

$$\omega = 61.78 \text{ rad/s}$$

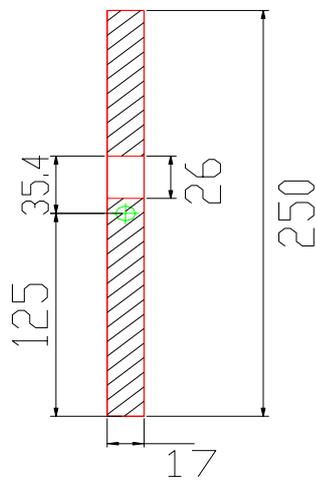
$$R_i = 0.743 \text{ m}$$

$$\text{Entonces } P_i = \frac{23.89 \text{ kg} \cdot 61.78^2 \text{ rad/s} \cdot 0.743 \text{ m}}{1000}$$

$$P_i = 67.75 \text{ kN}$$

### 2.2.5 Cálculo de las fuerzas internas en la sección de falla.

En la Fig. 2.4 se muestran las dimensiones de la sección transversal donde se produce la fractura por fatiga y se ubica la posición del centroide de la misma.



**Fig. 2.7 Dimensiones y posición del centroide de la sección transversal donde se produce la avería.**

Para calcular las fuerzas internas se aplicó el Método de las Secciones y se aplicaron las ecuaciones de equilibrio a la parte separada (Ver Fig. 2.4)

Suma de las Fuerza en un punto determinada N

$$\sum F_N = N - P_{i_A} - P_A = 0$$

$$N = P_A + P_{i_A} = P * \text{sen} \alpha + P_i * \text{sen} \beta$$

$$N = 5.0 * \text{sen} 38^\circ + 67.75 * \text{sen} 69^\circ$$

$$\boxed{N = 66.3} \text{ kN}$$

Suma de Las Fuerza en un punto determinada Q

$$\sum F_t = Q + P_T - P_{i_r} = 0$$

$$Q = P_{i_r} - P_T = P_i * \cos \beta - P * \cos \alpha$$

$$Q = 67.75 * \cos 69^\circ - 5 * \cos 38^\circ$$

$$\boxed{Q = 20.3} \text{ kN}$$

$$\sum M_C = Mf + P_T * bc + P_A * hc - P_{i_A} * hi - P_{i_T} * bi = 0$$

Despejando para  $Mf$  :

$$Mf = +P_{i_T} * bi + P_{i_A} * hi - P_T * bc - P_A * hc$$

$$Mf = 24.28 * 31.58 + 63.25 * 3 - 3.9 * 19.28 - 3.08 * 13.46$$

$$\boxed{Mf = 839.9} \text{ kN-cm}$$

### 2.2.6 Cálculo de las tensiones en el borde del orificio donde se inició la fisura en condiciones de carga dinámica.

$$\sigma_N = \frac{N}{A} * Kd$$

Donde:  $A = 42.5 \text{ cm}^2$

$$Kd = 5$$

$$\sigma_N = \frac{66.3kN}{42.5cm^2} * 5$$

$$\boxed{\sigma_N = 7.8} \text{ kN/cm}^2$$

En la altura de la sección, según una parábola cuadrática. La tensión máxima ocurre cuando  $y = 0$ , Entonces

(Según el Feodosiev [8], Pág. 146)

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} * \frac{Q}{A} * Kd$$

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} * \frac{20.3}{42.5} * 5$$

$$\boxed{\tau_{\max} = 3.58} \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{Mf} = \frac{Mf * Y_0}{I_x} * Kd$$

Donde:  $Y_0 = 3.54 \text{ cm}$

$$I_x = \frac{bh^3}{12} = 2213.5 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_{Mf} = \frac{839.9kN - cm * 3.54cm}{2213.5cm^4} * 5$$

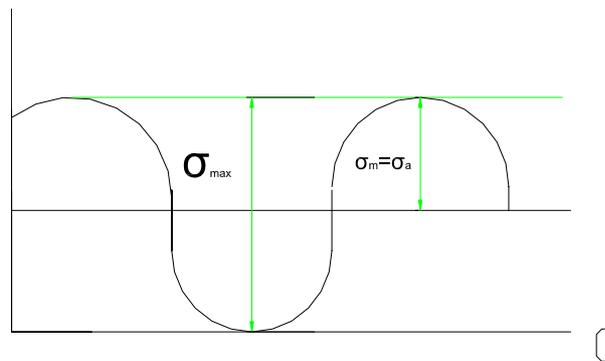
$$\sigma_{Mf} = 6.72 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_{Mf} + \sigma_N$$

$$\sigma_{\max} = 6.72 + 7.8 = 14.52 \text{ kN/cm}^2$$

## 2.2.7 Cálculo del factor de seguridad a la fatiga.

El ciclo es intermitente, pues las cuchillas cortan una vez por revolución. El factor de seguridad a las tensiones normales se calcula por la expresión [3,9].



**Fig. 2.8 Características del ciclo intermitente**

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_\sigma * \sigma_a}{\epsilon * \beta} + \left\langle \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \right\rangle * \sigma_m} \quad (1)$$

Donde:

Para el acero CT – 3,  $\sigma_u = 38 \text{ kN/cm}^2$  [19]

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2} = 7.26 \text{ kN/cm}^2$$

Los límites de fatiga  $\sigma_{-1}$  y  $\sigma_0$  se puede estimar, para el caso de fatiga por tracción – compresión, por las relaciones [24]:

$$\sigma_{-1} = 0.36\sigma_u = 0.36 * 38$$

$$\sigma_{-1} = 13.68 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_0 = 0.5\sigma_u = 0.5 * 38$$

$$\sigma_0 = 19 \text{ kN/cm}^2$$

Según Feodosiev [8], para  $d = 200 \text{ mm}$  y curva 2 (para aceros al carbono con concentración de tensiones).

$$\varepsilon \approx 0.4$$

Según Gilda Fernández [9], con  $\sigma_u = 38 \text{ kN/cm}^2$  y curva # 6 (Rugosidad de laminación):

$$\beta \approx 0.76$$

Según Pisarenko [18], para placa con orificio y  $\sigma_u = 38 \text{ kN/cm}^2$  se puede

tomar:

$$k_\sigma = k_\tau = 1.4$$

$$\text{Entonces: } n_\sigma = \frac{13.68}{\frac{1.4 * 7.26}{0.4 * 0.76} + \left\langle \frac{2 * 13.68 - 19}{19} \right\rangle * 7.26}$$

$$\boxed{n_\sigma = 0.38}$$

De forma similar el factor de seguridad a las tensiones tangenciales se halla por la expresión [9]:

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\frac{k_{\tau} * \tau_a}{\varepsilon * \beta} + \left( \frac{2\tau_{-1} - \tau_0}{\tau_0} \right) * \tau_m} \quad (2)$$

Donde:  $\tau_a = \tau_m = \frac{\tau_{\max}}{2} = 1.79 \text{ kN/cm}^2$

Los límites de fatiga  $\tau_{-1}$  y  $\tau_0$  se estimaron por las conocidas relaciones [24]:

$$\tau_{-1} = 0,22\sigma_u = 0.22 * 38$$

$$\tau_{-1} = 8.36 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_0 = 0.3\sigma_u$$

$$\tau_0 = 11.4 \text{ kN/cm}^2$$

Sustituyendo en la ecuación (2), se obtiene:

$$n_{\tau} = \frac{8.36}{\frac{1.4 * 1.79}{0.4 * 0.76} + \left( \frac{2 * 8.36 - 11.4}{11.4} \right) * 1.79}$$

$$\boxed{n_{\tau} = 0.92}$$

El factor de seguridad resultante será:

$$n_r = \frac{n_{\sigma} * n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}$$

$$n_r = \frac{0.38 * 0.92}{\sqrt{0.38^2 + 0.92^2}}$$

$$\boxed{n_r = 0.35}$$

### 2.3 Evaluación a la resistencia a la fatiga para el Segundo Juego de Cuchillas

De igual forma se evaluó la resistencia a la fatiga del segundo juego de cuchillas. La diferencia radica en que el segundo juego demanda mayor potencia  $N = 630 \text{ kW}$  y por lo tanto el torque es mayor, o sea,  $M_t = 1\,019,7 \text{ kN} - \text{cm}$ . Los factores de seguridad calculados dan:

$$n_\sigma = 0.39 \quad ; \quad n_\tau = 1.03 \quad \text{y} \quad n_r = 0.37$$

### 2.4 Evaluación del factor de seguridad a la fatiga con otros aceros.

Se evaluó de igual manera el factor de seguridad a la fatiga tanto del primer juego de cuchillas como del segundo juego de cuchillas con tres aceros diferentes de medio o bajo carbono con algún elemento de aleación. Los resultados obtenidos fuera:

**Tabla 2.1 Factor de Seguridad a la fatiga con otros aceros**

		Material		
		30G	20X	30XM
<b>Primer Juego de Cuchillas</b>	$n_\sigma$	0,49	0,61	0,65
	$n_\tau$	1,20	1,51	1,62
	$n_r$	0,45	0,56	0,60
<b>Segundo Juego de Cuchillas</b>	$n_\sigma$	0,49	0,63	0,67
	$n_\tau$	1,35	1,68	1,80
	$n_r$	0,46	0,59	0,63

Lo que permite afirmar que otros aceros de medio o bajo contenido de carbono con algún elemento de aleación permite elevar la resistencia volumétrica y conservar la capacidad de endurecer el filo con recargue por soldadura, aunque esto no quiere decir que se eliminará la posibilidad de fallo por fatiga debido a que los factores de seguridad dan por debajo de la unidad, pero si se incrementará la vida de las cuchillas considerablemente.

## Capítulo III Aplicación de la Mecánica de la Fractura en la evaluación del tamaño crítico de las grietas y en la vida residual.

### 3.1 Fuerzas internas en la sección de fallo.

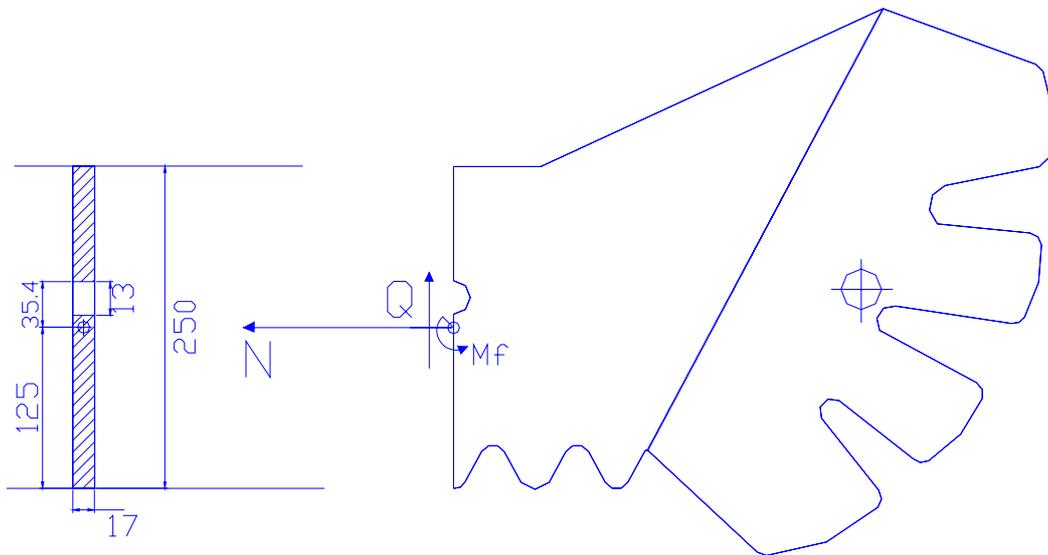


Fig. 3.1 Fuerzas internas en la sección de falla por fatiga en la cuchilla

### 3.2 Tensiones en la sección de fallo [22].

$$\sigma_N = \frac{N}{(bh - bd)} ; \quad \sigma_{M_f} = \frac{M_f}{w}$$

$$\Delta\sigma = \left( \sigma_N + \sigma_{M_f} \right)$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S_x}{b \cdot I_x}$$

### 3.3 Curva de Resistencia Residual y Tamaño Crítico de la Grieta.

La sección de falla por fatiga está sometida a un estado tensional plano con presencia de tensiones normales y tangenciales simultáneamente, desde el punto de vista de la Mecánica de la Fractura esto se corresponde con los

Modos de Carga I y III [7,14] simultáneamente, o sea, es necesario hallar  $K_{eq}$  por la expresión correspondiente y la condición de fractura será aquella cuando el Factor de Intensidad de Tensiones equivalente se iguale a la Tenacidad a la Fractura del material empleado, o sea:

$$K_{eq} = \sqrt{(K_I)^2 + \frac{(K_{III})^2}{1-\mu}} = K_{Ic}$$

La Tenacidad a la Fractura del material empleado en la fabricación de las cuchillas se halló por la correlación Rolfe – Barsom [1,2]:

$$K_{Ic} = \sigma_f \cdot \sqrt{0.6478 \cdot \left( \frac{CVN}{\sigma_f} - 0.0098 \right)}$$

Para Acero CT3;

$$\sigma_f = 21 \frac{kgf}{mm^2} \cdot 9.81 = 206 \text{ MPa}$$

$$CVN = a_K \cdot 9.81 \cdot A$$

$$\text{donde: } a_K = 7 \frac{Kgf \cdot m}{cm^2}$$

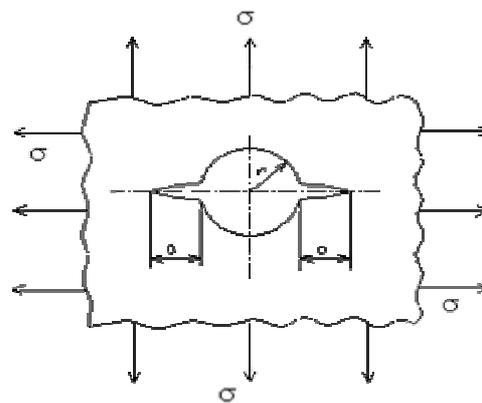
$$CVN = 7 \cdot 9.81 \cdot 0.8 = 55 \text{ J}$$

$$K_{Ic} = 206 \sqrt{0.6478 \cdot \left( \frac{55}{206} - 0.0098 \right)}$$

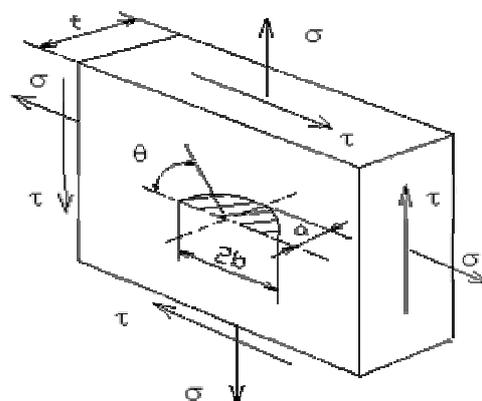
$$K_{Ic} = 84 \text{ MPa} \sqrt{m}$$

El Factor de Intensidad de Tensiones se obtuvo aplicando el Método de la Composición [10,12] ya que en la zona de la grieta semielíptica superficial hay

un orificio y se trata de una placa plana de dimensiones finitas y se hace necesario combinar todas estas influencias. La influencia del orificio se incorporará como el Caso 11 de la referencia Goytisoló [12] correspondiente a un orificio en placa plana infinita con dos grietas en los bordes, tal como se muestra en la Fig. 6, la influencia de la forma de la grieta y de las dimensiones finitas de la placa se incorporarán según lo planteado en el Caso 11 de la referencia Goytisoló [12] correspondiente a una placa plana de dimensiones finitas, con una grieta semielíptica superficial bajo un estado tensional plano de tracción y cortante, tal como se muestra en la Fig. 3.2



**Fig. 3.2 Orificio en placa plana infinita con dos grietas en los bordes bajo estado tensional uniaxial de tracción**



**Fig. 3.3 Grieta semielíptica superficial en placa plana finita bajo estado tensional plano de tracción y cortante.**

Para este último caso, de acuerdo a las proporciones observadas en varias cuchillas fracturadas se tiene que:

$$\frac{a}{2b} = \frac{17}{170} = 0.1 \quad ; \quad \frac{a}{b} = 0.2$$

$$\frac{b^2 - a^2}{b^2} \cong 1; \quad \frac{85^2 - 17^2}{85^2} = 0.96$$

$$\text{Para } \theta = \frac{\pi}{2}; \quad \phi_0 \cong 1$$

$$K_I = \left[ 1 + 0.12 \cdot \left( 1 - \frac{a}{b} \right) \right] \cdot \frac{\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{\phi_0} \cdot \sqrt{\left( \frac{2 \cdot t}{\pi \cdot a} \cdot \tan \frac{\pi \cdot a}{2 \cdot t} \right) \cdot \frac{1}{1000}}$$

$$K_I = [1 + 0.12 \cdot (1 - 0.2)] \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \sqrt{\left( \frac{2 \cdot 15}{\pi \cdot a} \cdot \tan \frac{\pi \cdot a}{2 \cdot 15} \right) \cdot \frac{1}{1000}}$$

$$K_I = 1.096 \cdot \sigma \cdot 5.47 \sqrt{\left( \tan \frac{\pi \cdot a}{2 \cdot 15} \right) \cdot \frac{1}{1000}}$$

$$K_I = 0.19 \cdot \sigma \sqrt{\left( \tan \frac{\pi \cdot a}{30} \right)}$$

$$K_{II} = 0$$

$$K_{III} = \tau \cdot \frac{\sqrt{\pi \cdot a}}{\phi_0} \cdot \sqrt{\left( \frac{2 \cdot t}{\sqrt{\pi \cdot a}} \cdot \tan \frac{\pi \cdot a}{2 \cdot t} \right) \cdot \frac{1}{1000}}$$

$$K_{III} = \tau \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \sqrt{\left( \frac{2 \cdot 15}{\sqrt{\pi \cdot a}} \cdot \tan \frac{\pi \cdot a}{2 \cdot 15} \right) \cdot \frac{1}{1000}}$$

$$K_{III} = 0.17\tau \cdot \sqrt{\left(\tan \frac{\pi \cdot a}{30}\right)}$$

$$K_{eq} = \sqrt{\left(0.19 \cdot \sigma \sqrt{\left(\tan \frac{\pi \cdot a}{30}\right)}\right)^2 + \frac{\left(0.17 \cdot \tau \sqrt{\left(\tan \frac{\pi \cdot a}{30}\right)}\right)^2}{1-0.3}}$$

$$K_{eq} = \sqrt{\tan \frac{\pi \cdot a}{30} \cdot \sqrt{0.036\sigma^2 + 0.041\tau^2}}$$

$$K_{eq} = 0.19 \sqrt{\tan \frac{\pi \cdot a}{30} \cdot \sqrt{\sigma^2 + 1.14\tau^2}} \leq K_{Ic}$$

Donde: Q= 20.3 kN; N= 66.3 kN= 3.27 Q

$$Q = \frac{1}{3.27} N$$

$$Q = 0.31 N$$

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M$$

$$\sigma = \frac{N}{1.7 \cdot 25 - 1.7 \cdot 2.6} + \frac{9.9N \cdot y}{I_x}$$

$$\sigma = \frac{N}{38.1} + \frac{9.9N \cdot 3.54}{2213.5} = 0.042N$$

$$S_x = (12.5 - 3.54) \cdot 1.7 \cdot \left(12.5 - \frac{12.5 - 3.54}{2}\right)$$

$$S_x = 122.16 \text{ cm}^3$$

$$\tau = \frac{0.31N \cdot 122.16}{1.7 \cdot 2213.5}$$

$$\tau = 0.01N$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \frac{0.01N}{0.042N} = 0.24$$

$$\tau = 0.24\sigma$$

$$K_{eq} = 0.19 \sqrt{\tan \frac{\pi \cdot a}{30}} \cdot \sqrt{\sigma^2 + 1.14 \cdot (0.24)^2 \cdot \sigma^2} \leq K_{Ic}$$

$$K_{eq} = 0.196 \cdot \sigma \sqrt{\tan \frac{\pi \cdot a}{30}} \leq K_{Ic}$$

$$\sigma = \frac{K_{Ic}}{0.196 \cdot \sqrt{\tan \frac{\pi \cdot a}{30}}}$$

$$\sigma = \frac{5.1 \cdot K_{Ic}}{\sqrt{\tan \frac{\pi \cdot a}{30}}}$$

Para la grieta (caso 21)

$$K_{eq} = 0.196 \cdot \sigma \sqrt{\tan \frac{\pi \cdot a}{30}}$$

$$\beta_{grieta} = 0.196 \cdot \sqrt{\tan \frac{\pi \cdot a}{30}}$$

Para el orificio (caso 30)

Para incorporar ahora la influencia del orificio es necesario hallar el  $\beta_{\text{orificio}}$  para lo cual fue necesario hallar una ecuación de correlación, como se muestra en el anexo I, para el caso de dos grietas en estado uniaxial. La correlación obtenida fue:

$$\beta_{\text{orificio}} = \left( \frac{0.943 \cdot a}{a - 1.569} \right)$$

La expresión final de  $K_{eq}$  será:

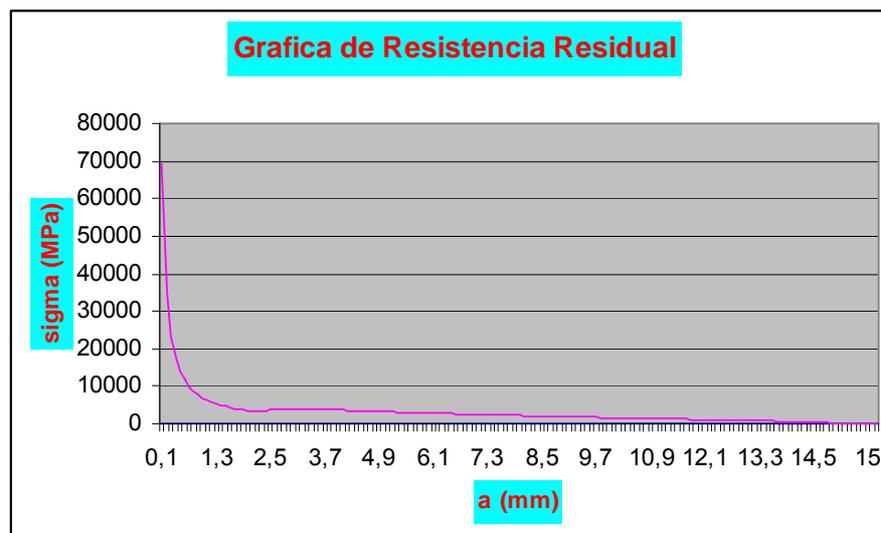
$$K_{eq} = \beta_{\text{grieta}} \cdot \beta_{\text{orificio}} \cdot \sigma = K_{Ic}$$

$$K_{eq} = 0.195 \cdot \sigma \sqrt{\tan\left(\frac{\pi \cdot a}{30}\right)} \cdot \left(\frac{0.943 \cdot a}{a - 1.569}\right) \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{1000}} \cdot \sigma = K_{Ic}$$

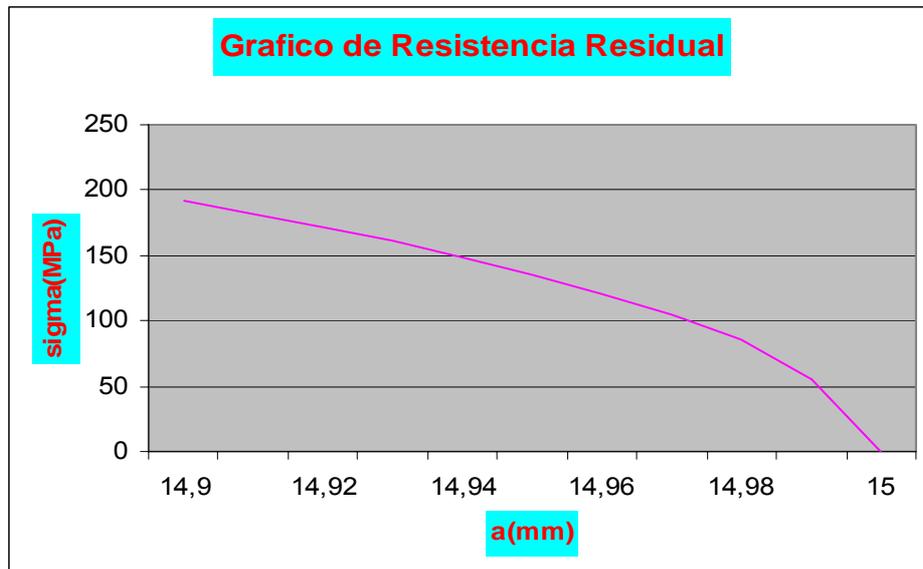
$$K_{eq} = \frac{0.195}{31.62} \cdot \sigma \sqrt{\tan\left(\frac{\pi \cdot a}{30}\right)} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \left(\frac{0.943 \cdot a}{a - 1.569}\right) = K_{Ic}$$

Despejando la tensión normal  $\sigma$  y hallando de esta última expresión el valor de la tensión que provoca la fractura para cada tamaño crítico de grieta:  $a$ , se construye el gráfico de Resistencia Residual mostrado en la Fig. 3.4.

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic} \cdot 161.2}{\sqrt{\tan\left(\frac{\pi \cdot a}{30}\right)} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \left(\frac{0.943 \cdot a}{a - 1.569}\right)}$$



a) Gráfica de Resistencia Residual para el Modelo de Grieta empleado.



b) Gráfica de Resistencia Residual ampliado para la zona final del mismo.

Fig. 3.4 Gráfica de Resistencia Residual

De estos gráficos se puede obtener que para una tensión normal máxima de:  $\sigma_{\max} = 6.72 + 7.8 = 14.52$  kN/cm<sup>2</sup> = 145.2 MPa, el tamaño crítico de la grieta da:  $a_c = 14.7$  cm, lo que da cerradamente coincidente con la realidad. O sea que, un pequeño micro defecto de la estructura cristalina del metal tendrá que crecer por crecimiento subcrítico por fatiga hasta alcanzar el tamaño de la grieta crítica calculada para que la cuchilla se fracture. Un resultado similar se obtiene para el segundo juego de cuchillas.

### 3.4 Evaluación del crecimiento subcrítico de la grieta.

La grieta crece desde un micro defecto cualquiera que este presente en la estructura cristalina del metal en la zona de la superficie de los orificios, o a partir de una huella del proceso de maquinado de los mismos o simplemente a partir de una huella del desgaste de estos mediante un proceso de incubación y de fisuración progresiva posterior hasta que alcanza el tamaño crítico ya determinado, momento en el cual se produce la fractura frágil. Para la evaluación del crecimiento subcrítico se utilizó la razón de crecimiento de Paris [7,12,23]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n \quad \text{m/ciclo}$$

Donde, para el caso de ciclo intermitente:  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ ;  $K_{\min} = 0$

De donde se tiene que:

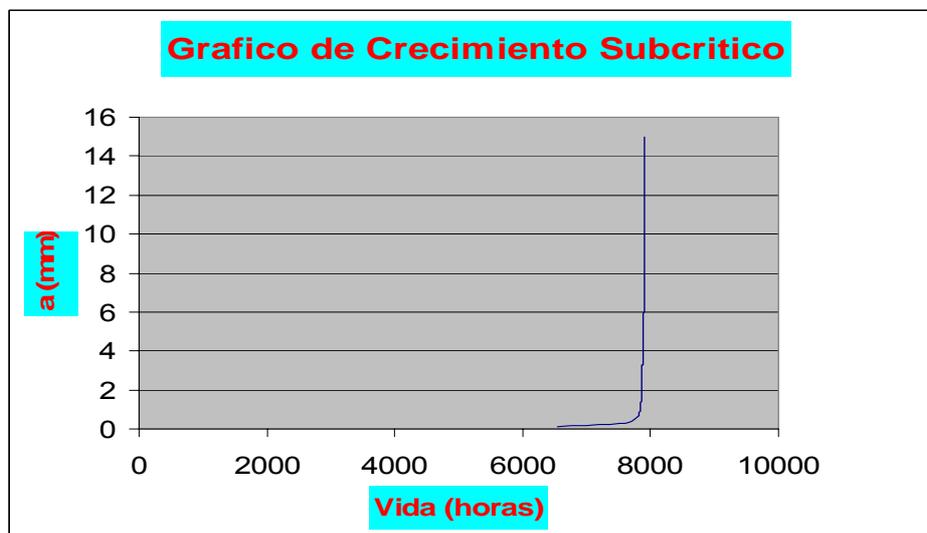
$$\Delta K = 0.195 \cdot \sigma \sqrt{\tan\left(\frac{\pi \cdot a}{30}\right)} \cdot \left(\frac{0.943 \cdot a}{a - 1.569}\right) \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{1000}} \cdot \Delta\sigma$$

y  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} = 145.4 \text{ MPa}$

Las constantes C y n de la razón de crecimiento de Paris para aceros ferrítico – perlíticos son según Shigley – Mischke [21]:

$C = 6.9 \times 10^{-12}$  y  $n = 3$

En la Fig. 3.5 se muestra el Gráfico de Crecimiento Subcrítico obtenido:



**Fig. 3.5 Gráfico de Crecimiento Subcrítico.**

Del gráfico se observa que para que un pequeño microdefecto crezca hasta su tamaño crítico tienen que transcurrir 7972 horas, o sea, 332 días, vida equivalente a 2,77 zafras de 120 días, lo que se corresponde en muy buena medida con lo que está ocurriendo en la actualidad.

En la Tabla 1 se muestran diferentes aceros de bajo carbono soldables, que pueden ser empleados en lugar del CT – 3 para fabricar las cuchillas picadoras de caña.

Tabla 3.1 Propiedades mecánicas y fractomecánicas de diferentes aceros para cuchillas			
Acero	Límite de fluencia $\sigma_f$ MPa	Resiliencia $a_k$ J/cm <sup>2</sup>	Tenacidad a la fractura $K_{Ic}$ MPa· $\sqrt{m}$
30 G	320	78,5	111,2
20 X	400	68,7	115,0
30 XM	540	58,9	120,8

Si se realiza el mismo análisis con aceros de mayor resistencia, como son los aceros dados en la Tabla 3.1: 20X, 30G o 30XM [19], que como se aprecia tienen ligeramente mayor Tenacidad a la Fractura que el acero CT – 3, dada anteriormente, se demuestra que al construir el gráfico de resistencia residual con el mismo modelo de grieta anterior, para que la grieta se haga crítica después de haber crecido hasta una magnitud de 14,94 mm, profundidad para la cual la grieta se hace crítica con el acero CT – 3, sería necesaria una tensión muy superior tal como se aprecia en la Tabla 3.2 y en la Fig. 3.6. Empleando el acero al manganeso 30G, la tensión crítica sería:  $\sigma_c = 196,8$  MPa, con el acero de bajo carbono al cromo 20 X, la tensión crítica sería:  $\sigma_c = 203,5$  MPa y con el acero al cromo molibdeno 30 XM la tensión crítica crecería hasta un valor de  $\sigma_c = 214,0$  MPa. Esto significa que la grieta tendría que convertirse en pasante y continuar creciendo aun más para que se produzca la fractura.

Tabla 2 Tensiones críticas para aceros de mayor resistencia que el acero CT-3

	Acero CT3	Acero 30G	Acero 20X	Acero 30XM
a(mm)	Tensión MPa	Tensión MPa	Tensión MPa	Tensión MPa
14	623,526678	825,07976	853,112291	897,1958202
14,1	589,749833	780,384654	806,898644	848,5941397
14,2	554,375822	733,576102	758,499747	797,6942888
14,3	517,061428	684,199946	707,446008	744,0024113
14,4	477,335393	631,632592	653,092651	686,8404107
14,5	434,519134	574,976109	594,511233	625,2318703
14,6	387,570522	512,851503	530,27591	557,6772653
14,7	334,733447	442,935004	457,983961	481,6497187
14,8	272,5788	360,68906	372,943665	392,2150707
14,9	192,236783	254,376733	263,01932	276,6105199
14,91	182,324416	241,260223	249,457169	262,347562
14,92	171,852503	227,403297	235,129447	247,2794717
14,93	160,711661	212,661211	219,886491	231,2488551
14,94	148,75162	196,835123	203,522703	214,0394886

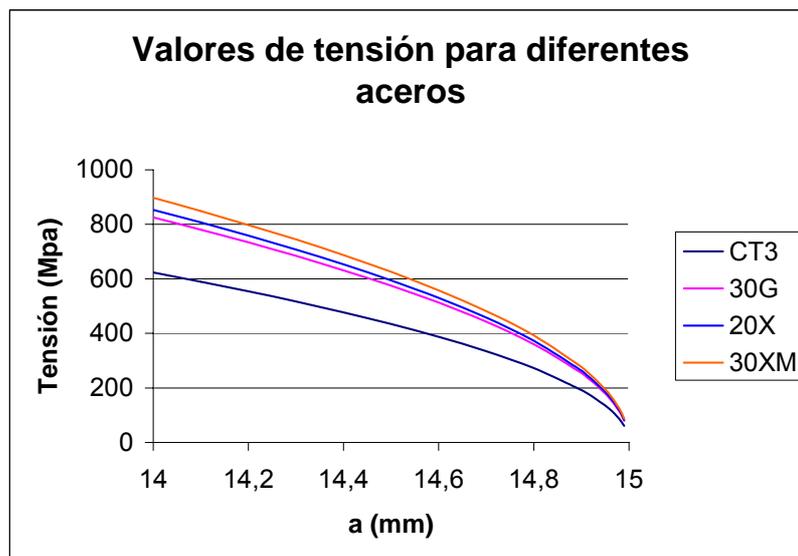


Fig. 3.6 Gráfica de Resistencia Residual para diferentes aceros.

En estas condiciones, aunque no se pudo evaluar este crecimiento con el modelo empleado, se puede inferir que la vida al menos se duplicará.

## Conclusiones

1. La investigación de las interrupciones en zafra arraja que el tiempo perdida en zafra por averías de las cuchillas es considerable. Es significativo que en las zafras 2000 y 2001 no se produjeras averías.
2. En la literatura se recomienda el empleo de acero al cromo – tungsteno – vanadio de resistencia a la tracción del orden de  $\sigma_u = 2\ 100$  MPa, tratado térmicamente, con dureza en el filo de 57 a 58 HRC para poder lograr la adecuada combinación de resistencia volumétrica y superficial de las cuchillas.
3. La causa de las reiteradas averías radica en que en la actualidad, tratando de reducir los costos se utiliza en las mismas acero de bajo contenido de carbono con resistencia máxima a la tracción del orden de  $\sigma_u = 380$  MPa, y se busca la dureza del filo rellenando el mismo con electrodos de alta resistencia y dureza, resolviendo el problema de su resistencia superficial, pero descuidando la resistencia volumétrica, lo que provoca las averías.
4. La evaluación de la resistencia a la fatiga con el acero CT-3 empleado en la actualidad, arrojó que:
  - Para el primer juego de cuchillas el factor de seguridad a la fatiga es  $n_r = 0,35$
  - Para el segundo juego de cuchillas:  $n_r = 0,37$Estos resultados confirmaron que para las pesadas condiciones de trabajo de las cuchillas picadoras de caña con grandes cargas de impacto, el acero CT-3 no garantiza la resistencia volumétrica, incluso con un coeficiente de carga dinámica de valor igual a la tercera parte del considerado en el presente trabajo.
5. La evaluación para los dos juegos de cuchillas de este factor de seguridad utilizando diferentes aceros arrojó que:
  - Primer juego de cuchillas, para acero 30G  $n_r = 0,45$ ; para acero 20X  $n_r = 0.56$ ; para acero 30XM  $n_r = 0.60$

- Segundo juego de cuchillas, para acero 30G  $n_r = 0,46$ ; para acero 20X  $n_r = 0.59$ ; para acero 30XM  $n_r = 0.63$

Lo que permite afirmar que otros aceros de medio o bajo contenido de carbono con algún elemento de aleación permite elevar la resistencia volumétrica y conservar la capacidad de endurecer el filo con recargue por soldadura, aunque esto no significa que deje de existir el fallo por fatiga de las cuchillas, pero si el incremento de la vida de las mismas.

6. La aplicación de la Tecnología de la Mecánica de la Fractura confirma que el tamaño crítico de la grieta con el acero CT-3 es  $a_c = 14.7$  mm, lo que coincide cerradamente con los resultados reales y la Vida Residual es del orden de 2,77 zafras, que es mas o menos lo que está ocurriendo en la actualidad.
7. Empleando aceros de bajo o medio de carbono aleados, soldables, no tan costosos como el acero al cromo – tungsteno – vanadio recomendado en la literatura, se puede lograr un incremento de la tenacidad tal que la vida de las cuchillas al menos se duplique y se puede mantener la práctica actual de rellenar el filo con soldadura para lograr una buena resistencia al desgaste que no poseen estos aceros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- Barsom, J. M. Fracture and Fatigue Control in Structures.-- Upper Saddle River: N.J. Prentice Hall, 1998.—208 p.
- 2- \_\_\_\_\_ Correlations between  $K_{Ic}$  and Charpy V-Notch test results in the transition-temperature range, Impact Testing of Metals, ASTM STP 466, American Society for Testing and Materials /.-- [s.l]: [s.n], 1987.— 302 p.
- 3- Birger J.A., Schneiderovich R.M. Cálculo de la Resistencia de Piezas de Máquinas.—Moscú: Editorial Mashinostroenie, 1966. - - 616 p.
- 4- Bubnikzet A. Sugar Technologists Manual.—Berlin: Edit. Luckhoff, 1995.-- 417 p.
- 5- Chen , C. Cane Sugar Handbooks. --[s.l]: [s.n]; 1993.-- [s.p]
- 6- Dobrovolski V. Elementos de Máquinas.-- Moscú: Editorial MIR, 1970.--692 p.
- 7- Dowling, N. E. Mechanical behaviour of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue.-- Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall, cop, 1999.—550 p.
- 8- Fedosiev V.I. Resistencia de Materiales.-- Moscú: Editorial MIR, 1985.-- 583 p.
- 9- Fernández levy, Gilda. S. Resistencia de Materiales.-- La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983.-- 511 p. 2T.
- 10- Fong, J. T. Fatigue Mechanisms.-- Philadelphia, Pa, American Society for Testing and Materials. 1979.—220 p.
- 11- Goytisoló ,R. Análisis y solución de la Avería del molino de Planta de Plástico Mixto de Cienfuegos. Revista Ingeniería Mecánica: (Cienfuegos) 8 (3): 51- 58, 2005.

- 12- \_\_\_\_\_ Mecánica de la Fractura. Curso impartido en la Maestría en Mecánica Aplicada, Universidad de Cienfuegos. 2001.--98p
- 13- Hugot, E. Manual para Ingenieros Azucareros.-- México: Editorial Continental, 1974.-- 784 p.
- 14- Hurd, N. J., Factors influencing propagation of mode III fatigue cracks under torsional loading.-- West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1982.--233 p.
- 15- Ivanov, M.N. Elementos de Máquinas.-- Moscú: Editorial Vischaya Schkola, 1991.--383 p.
- 16- Iusilievich G.B. Elementos de Máquinas.-- Moscú: Editorial Mashinostroenie, 1988. -- 367 p.
- 17- Miroljubov I. Problemas de Resistencia de Materiales.-- Moscú: Editorial MIR, 1985.--500p.
- 18- Pisarenko, G.S. Manual de Resistencia de Materiales.-- Moscú: Editorial MIR, 1979.-- 695 p.
- 19- Promsyrioimport. Rusia. Metallurgist's Handbook. Part I, 1970. (Catálogo industrial)
- 20- Reshetov, D. Elementos de Máquinas.-- La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1985.-- 830 p.
- 21- Shigley, J.E, Diseño en Ingeniería Mecánica.-- México: Editorial McGraw Hill Interamericana. 2001.-- 943 p.
- 22- Stiopin, P.A. Resistencia de Materiales.-- Moscú: Editorial MIR, 1985.-- 376 p.
- 23- Tada, H. Paris, The stress analysis of cracks handbook.-- St. Louis (MO): Del Research Corporation, 1973.—620 p.
- 24- Troshenko, V.I. Resistencia a la fatiga de los metales y aleaciones./.-- Kiev: Editorial Naukova Dumka, 1987.-- 505 p.

## BIBLIOGRAFIA

- Barsom, J. M. Fracture and Fatigue Control in Structures. / J.M Barsom; S.T. Rolfe.-- Upper Saddle River: N.J. Prentice Hall, 1998.—208 p.
- \_\_\_\_\_ Correlations between K<sub>Ic</sub> and Charpy V-Notch test results in the transition-temperature range, Impact Testing of Metals, ASTM STP 466, American Society for Testing and Materials / J.M Barsom, S.T Rolfe.-- [s.l]: [s.n], 1987.—302 p.
- Birger J.A., Schneiderovich R.M. Cálculo de la Resistencia de Piezas de Máquinas.--Moscú: Editorial Mashinostroenie, 1966. - - 616 p.
- Bubnikzet A. Sugar Technologists Manual/ A. Bubnikzet.--Berlin: Edit. Luckhoff. 1995.-- 417 p.
- Chen.C., Cane Sugar Handbooks. --[s.l]: [s.n]; 1993.-- [s.p]
- Dobrovolski V. Elementos de Máquinas.-- Moscú: Editorial MIR, 1970.--692 p.
- Dowling, N. E. Mechanical behaviour of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue / N.E Dowling.-- Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall, cop, 1999.—550 p.
- Fedosiev V.I. Resistencia de Materiales / V.I Fedosiev.-- Moscú: Editorial MIR, 1985.-- 583 p.
- Fernández levy, Gilda. S. Resistencia de Materiales/ Gilda S. Fernández Levy.-- La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983.-- 511 p. 2T.
- Fong, J. T. Fatigue Mechanisms.—Philadelphia: Pa, American Society for Testing and Materials. 1979.—220 p.
- Goytisoló ,R. Análisis y solución de la Avería del molino de Planta de Plástico Mixto de Cienfuegos. Revista Ingeniería Mecánica: (Cienfuegos) 8 (3): 51- 58, 2005.
- \_\_\_\_\_ Mecánica de la Fractura. Curso impartido en la Maestría en Mecánica Aplicada, Universidad de Cienfuegos, 2001.--98p.

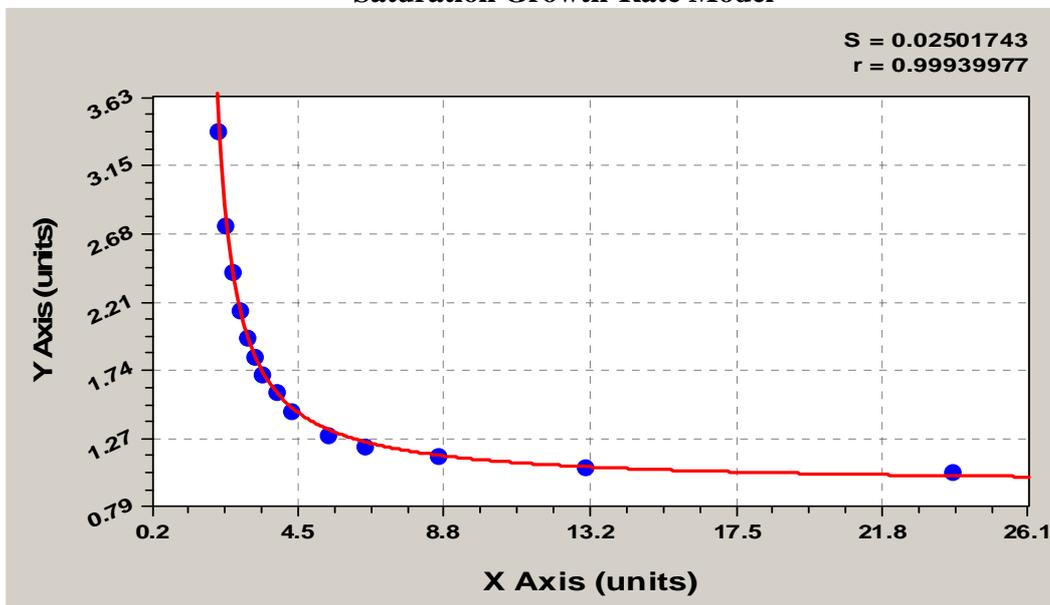
- Hugot, E. Manual para Ingenieros Azucareros/ E. Hugot.-- México: Editorial Continental, 1974.-- 784 p.
- Hurd, N. J., Factors influencing propagation of mode III fatigue cracks under torsional loading / N. J. Hurd; E.P Irwing.-- West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1982.--233 p.
- Ivanov, M.N. Elementos de Máquinas/ M.N Ivanov.-- Moscú: Editorial Vischaya Schkola, 1991.--383 p.
- Iusilievich G.B. Elementos de Máquinas/ G.B. Iusilievich.-- Moscú: Editorial Mashinostroenie, 1988. -- 367 p.
- Miroliubov I. Problemas de Resistencia de Materiales / I. Miroliubov.-- Moscú: Editorial MIR, 1985.--500p.
- Pisarenko, G.S. Manual de Resistencia de Materiales/ G.S. Pisarenko, A.P., Yakovlev, V:V Matvéev.-- Moscú: Editorial MIR, 1979.-- 695 p.
- Promsyrimport. Rusia. Metallurgist's Handbook. Part I, 1970. (Catálogo industrial).
- Reshetov, D. Elementos de Máquinas/ D. Reshetov.-- La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1985.-- 830 p.
- Shigley, J.E, Diseño en Ingeniería Mecánica/ J.E Shigley, C Mischkie.-- México: Editorial McGraw Hill Interamericana. 2001.—943 p.
- Stiopin, P.A. Resistencia de Materiales./ P.A Stiopin -- Moscú: Editorial MIR, 1985.-- 376 p.
- Tada, H. The stress analysis of cracks handbook / H Tada; C.P Paris;G.R Irwin.- - St. Louis (MO): Del Research Corporation, 1973.--620 p.
- Troshenko, V.I. Resistencia a la fatiga de los metales y aleaciones./ V.I. Troshenko, L.A. Sosnovskij.-- Kiev: Editorial Naukova Dumka, 1987.-- 505 p.

## Anexos

ANEXO I Grafico de correlación para la determinación del  $\beta_{\text{orificio}}$  para el caso de dos grietas en estado uniaxial

0.46a- $1=(a/r) \rightarrow a=((a/r)+1)/0.46$		
a/r	a	$\beta$
0	2,17	3,39
0,1	2,39	2,73
0,2	2,61	2,41
0,3	2,83	2,15
0,4	3,04	1,96
0,5	3,26	1,83
0,6	3,48	1,71
0,8	3,91	1,58
1,0	4,35	1,45
1,5	5,43	1,29
2,0	6,52	1,21
3,0	8,70	1,14
5,0	13,04	1,07
10,0	23,91	1,03

### Saturation Growth-Rate Model



Saturation Growth-Rate Model:  $y=ax/(b+x)$

Coefficiente Data:

a = 0.94267118

b = -1.5695652

## ANEXO 2



[Nueva búsqueda](#) |  [Ver carpeta](#) | [Preferencias](#) | [Ayuda](#) | [Salir](#)

**Búsqueda básica** | **Búsqueda avanzada** | **Búsqueda visual** | **Bases de datos**

**Entrar en Mi EBSCOhost** | **Palabra clave** | **Publicaciones** | **CUBA** | Language

**Resultados de:** **Grieta**  [Añadir esta búsqueda a la carpeta](#) |  [Mostrar vínculo a esta búsqueda](#)

<http://search.epnet.com/login.aspx?direct=true&bQuery=Grieta&db=zbh>

**Buscar:**    

**en:**   [La carpeta está vacía..](#)

**Para almacenar elementos añadidos en la carpeta para una sesión posterior, [Entrar en Mi EBSCOhost](#)**

**1 - 7 de 7 Páginas: 1** | **Ordenar por :**  |  [Añadir \(1-7\)](#)

<b>Resultados específicos por tema:</b> <a href="#">SEXUAL behavior in animals</a> <a href="#">CUBA</a> <a href="#">SUGARCANE</a> <a href="#">LIZARDS -- Reproduction</a> <a href="#">BEARINGS (Machinery)</a> <a href="#">SUGAR plants</a> <a href="#">DRAINAGE</a>	<b>1.</b> <a href="#">FIELD POPULATION BIOLOGY OF Anolis aquaticus, Sauria: Polychridae IN COSTA RICA. (English)</a> By: Márquez, Cruz; Mora, José Manuel; Bolaños, Federico; Rea, Solanda. Ecologia Aplicada, 2005, Vol. 4 Issue 1/2, p59-69, 11p; Language: Spanish; (AN 20056546)  <a href="#">Texto completo en PDF</a> (826K)	 <a href="#">Añadir</a>
	<b>2.</b> <a href="#">Producción sin Grietas.</a> Industria Alimenticia, ago2005, Vol. 16 Issue 8, p32-36, 3p; (AN 18430766)  <a href="#">Texto completo en PDF</a> (1.6MB)	 <a href="#">Añadir</a>
	<b>3.</b> <a href="#">Determinación de la vida remanente de los árboles de los molinos de caña de azúcar con grieta semielíptica superficial.</a> Ingeniería Mecanica, 2003 Issue 2, p43-52, 10p; (AN 15694997)  <a href="#">Texto completo en PDF</a> (104K)	 <a href="#">Añadir</a>

<a href="#">EGGS -- Incubation</a> <a href="#">CLAY soils</a> <a href="#">FINITE element method</a>	<p>4. <a href="#">Structural particularities and determination of principal stress from profile information in the western part of Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. (English)</a> By: Cofiño Arada, Carlos E.; Govea, Dámaso Cáceres. Minería y Geología, 2003, Vol. 19 Issue 1/2, p51-58, 8p, 9 diagrams; Language: Spanish; (AN 18416745)   <a href="#">Texto completo en PDF</a> (242K)</p>	 <a href="#">Añadir</a>
	<p>5. <a href="#">Análisis del estado tensional de las chumaceras superiores de los molinos de caña. (Spanish)</a> By: Pérez, Francisco Lafargue; Junco, Eduardo Juliá; Martínez, Rodríguez. Centro Azúcar, jul-sep2001, Vol. 28 Issue 3, p76-81, 6p; Language: Spanish; (AN 18419317)   <a href="#">Texto completo en PDF</a> (237K)</p>	 <a href="#">Añadir</a>
	<p>6. <a href="#">Tus lindes: grietas que me develan. (Spanish)</a> By: Bracho, Coral. Debate Feminista, abr2001, Vol. 23 Issue 12, p269-271, 3p; Language: Spanish; (AN 17847084)   <a href="#">Texto completo en PDF</a> (73K)</p>	 <a href="#">Añadir</a>
	<p>7. <a href="#">Tecnología integral de drenaje soterrado y mejoramiento para suelos pesados cultivados con caña de azúcar. (Spanish)</a> Centro Azúcar, abr-jun2001, Vol. 28 Issue 2, p49-55, 7p; Language: Spanish; (AN 18419328)   <a href="#">Texto completo en PDF</a> (229K)</p>	 <a href="#">Añadir</a>
<p>1 - 7 de 7 Páginas: 1</p>	 <a href="#">Añadir (1-7)</a>	

[Inicio de página](#)

[Cláusula de confidencialidad](#) - [Condiciones de uso](#) - [Copyright](#)

© 2006 EBSCO Publishing.

ANEXO 3



Research Databases

[Nueva búsqueda](#) | [Ver carpeta](#) | [Preferencias](#) | [Ayuda](#) | [Salir](#)

Búsqueda básica | Búsqueda avanzada | Búsqueda visual | Bases de datos

Entrar en Mi EBSCOhost

Palabra clave Publicaciones

CUBA

Language

Resultados de: **aceros** [Añadir esta búsqueda a la carpeta](#) | [Mostrar vínculo a esta búsqueda](#)

<http://search.epnet.com/login.aspx?direct=true&bQuery=aceros&db=zbh>

Busca r:    

en   [La carpeta contiene elementos..](#)

Para almacenar elementos añadidos en la carpeta para una sesión posterior, [Entrar en Mi EBSCOhost](#)

1 - 7 de 7 Páginas: 1

Ordenar por :   [Añadir \(1-7\)](#)

<p>Resultados específicos por tema:</p> <p><a href="#">STEEL</a></p> <p><a href="#">THERMODYNAMICS</a></p> <p><a href="#">SUGAR trade</a></p> <p><a href="#">UNIVERSITIES &amp; colleges</a></p> <p><a href="#">COATINGS</a></p> <p><a href="#">MOMENTUM transfer</a></p> <p><a href="#">CHROMIUM carbide</a></p> <p><a href="#">ABACUS</a></p> <p><a href="#">MASS transfer</a></p> <p><a href="#">STEEL -- Heat</a></p>	<p>1. <a href="#">Tratamiento Térmico de Aceros de Bajo Carbono en Horno de Atmósfera Controlada. (Spanish)</a> By: Franco, Fernando; Harrinson Paz, José. Ingeniería y Competitividad, Dec2004, Vol. 6 Issue 2, p56-63, 8p; Language: Spanish; (AN 20417531)</p> <p> <a href="#">Texto completo en PDF</a> (2.1MB)</p>	<p> <a href="#">Añadir</a></p>
	<p>2. <a href="#">Evaluación del empleo de aceros de bajo contenido de carbono en la fabricación del cuerpo de cilindros oleohidráulicos.</a> Ingeniería Mecánica, 2003 Issue 2, p7-11, 5p; (AN 15694982)</p> <p> <a href="#">Texto completo en PDF</a> (39K)</p>	<p> <a href="#">Añadir</a></p>
	<p>3. <a href="#">Influence of Carbon Content in the Base Metal on Diffusion Chroming Layers Using Refractory Chromites. (English)</a> By: González Ruiz, Jesús Eduardo; Puchol, Rafael Quintana; Scott, Alejandro Duffus; Cristo, Alejandro Rodríguez; Pérez, Larisvel</p>	<p> <a href="#">Añadir</a></p>

<a href="#">treatment</a>	López. Centro Azúcar, abr-jun2002, Vol. 29 Issue 2, p79-85, 7p; Language: Spanish; (AN 18536676)  <a href="#">Texto completo en PDF</a> (258K)	
	4. <a href="#">Possibility of employ, in the sugar industry, of the cold-formed steel produced in Cuba. (English)</a> By: Gamón Torres, Roberto. Centro Azúcar, ene-mar2002, Vol. 29 Issue 1, p64-71, 8p; Language: Spanish; (AN 20066362)  <a href="#">Texto completo en PDF</a> (233K)	 <a href="#">Añadir</a>
	5. <a href="#">Modificación de espectrógrafo para realizar análisis químico por espectral visual. (Spanish)</a> By: González, Elizabet Rodríguez; Alonso, Argelia Alfonso. Centro Azúcar, abr-jun2001, Vol. 28 Issue 2, p93-96, 4p; Language: Spanish; (AN 18419335)  <a href="#">Texto completo en PDF</a> (222K)	 <a href="#">Añadir</a>
	6. <a href="#">BEHAVIOR OF AISI HH AND HK-40 HEAT-RESISTANT ALLOYS IN CARBURIZATION AND NITRIDING PROCESSES. (English)</a> By: Del Rosario, Alberto Velázquez; Cala, Maritza Mariño; Brindis, Eleno alfonso; Rosado, Mario Feliú. Minería y Geología, 2001, Vol. 18 Issue 1, p83-87, 5p; Language: Spanish; (AN 18428113)  <a href="#">Texto completo en PDF</a> (6.7MB)	 <a href="#">Añadir</a>
	7. <a href="#">Efecto de la transferencia de masa sobre la corrosión del acero AISI-SAE 1010 en contacto con emulsiones de aceite mineral en agua en condiciones hidrodinámicas controladas. (Spanish)</a> By: Becerra, Haydée Quiroga; Retamoso, Clemente. Centro Azúcar, ene-mar2000, Vol. 27 Issue 1, p81-91, 11p; Language: Spanish; (AN 18536454)  <a href="#">Texto completo en PDF</a> (200K)	 <a href="#">Añadir</a>
1 - 7 de 7 Páginas: 1	 <a href="#">Añadir (1-7)</a>	

[Inicio de página](#)

[Cláusula de confidencialidad](#) - [Condiciones de uso](#) - [Copyright](#)

© 2006 EBSCO Publishing.