



**FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

# **TRABAJO DE DIPLOMA**

**TEMA:**

**DISEÑO DE UNA FRESA ANGULAR PARA EL  
MECANIZADO DE LOS BRAZOS DEL MECANISMO DE  
BARRIDO DE LOS HORNO S DE REDUCCIÓN**

**Autor:** Luis Carlos Argote Ferrer

**Tutores:** MSc. Rodney Enrique Correa Suárez  
Ing. Murpis Pompa Larrazabal

**Moa, 2014  
“Año 56 de la Revolución”**

Declaración de Autoridad

**Yo:** Luis Carlos Argote Ferrer

Autor de esta tesis de grado, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez" el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

---

Luis Carlos Argote Ferrer

---

MSc. Rodney Enrique Correa Suarez

---

Ing. Murpis Pompa Larrazabal

## ***Agradecimientos***

***A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera en especial a Rodney Correa.***

***A mis tutores por confiar en mí en la realización de este trabajo, el MSc. Rodney Enriques Correa Suárez e Ing. Murpis Pompa Larrazabal.***

***A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.***

***A mis amigos que siempre creyeron en mí.***

***A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.***

***A la revolución, por darme la oportunidad de convertirme en profesional.***

***A todos.***

***Muchas Gracias***

## ***Dedicatoria***

***Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.***

***A mis padres Luis Manuel Argote Ramírez y Marlen Ferrer Quintero por darme su apoyo en todo momento, al igual que Odalis Montero Marichal y Juan Fonseca Montero.***

***A mis abuelos y a mi adorada novia Yadiana Fonseca por su dedicación y amor.***

## ***Pensamiento***

***El mundo está en las manos de aquéllos que tienen el valor de soñar, y correr el riesgo, de vivir, sus propios sueños.***

***Pablo Faholo Cuelho***

## TABLA DE CONTENIDOS

|                                                                    | <b>Pág.</b> |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                                                | <b>1</b>    |
| <b>1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN</b>                        |             |
| 1.1 Introducción                                                   | 4           |
| 1.2. Marco contextual donde se desarrolla la investigación         | 4           |
| 1.3. Aspectos a considerar en el proceso de manufactura            | 5           |
| 1.4. Peculiaridades acerca del diseño de herramienta de corte      | 6           |
| 1.5. Materiales para la fabricación de herramientas                | 6           |
| 1.5.1. Materiales actuales para herramientas de corte              | 11          |
| 1.6. Herramientas empleadas en el proceso de fresado               | 12          |
| 1.7. Características generales de la aleación A351 grado HK- 40.   | 14          |
| 1.7.1. Proceso tecnológico de fabricación de los brazos.           | 15          |
| 1.8. Tratamiento térmico de las herramientas de corte              | 16          |
| 1.9. Conclusiones del capítulo 1                                   | 19          |
| <b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>                                     |             |
| 2.1. Introducción                                                  | 20          |
| 2.2. Características del material para el diseño de la herramienta | 20          |
| 2.3 Selección y preparación de muestras                            | 21          |
| 2.4. Metodología de cálculo para el diseño de la fresa angular     | 22          |
| 2.4.17. Análisis por el método de los elementos finitos (MEF)      | 39          |
| 2.4.19. Selección del tratamiento térmico                          | 41          |
| 2.5. Conclusiones del capítulo 2                                   | 44          |

### **3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1. Introducción                                                      | 45        |
| 3.2. Composición química del material estudiado                        | 45        |
| 3.3. Resultados de la metodología de cálculo                           | 45        |
| 3.4. Análisis de las fuerzas que actúan sobre la fresa                 | 48        |
| 3.5. Análisis de las fuerzas que actúan sobre las aristas cortantes    | 51        |
| 3.6. Análisis a fatiga                                                 | 52        |
| 3.7. Análisis de los resultados por el método de los elementos finitos | 54        |
| 3.8. Análisis del sistema de sujeción                                  | 56        |
| 3.9. Análisis de los resultados del tratamiento térmico                | 57        |
| 3.10. Valoración económica                                             | 60        |
| 3.11. Impacto ambiental                                                | 62        |
| 3.12. Conclusiones del capítulo 3                                      | 63        |
| <b>CONCLUSIONES GENERALES</b>                                          | <b>I</b>  |
| <b>RECOMENDACIONES</b>                                                 | <b>II</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                                                    |           |
| <b>ANEXOS</b>                                                          |           |

## **Resumen**

El trabajo tuvo la finalidad de establecer el diseño de una fresa angular de vástago para el mecanizado de los brazos de barrido de los hornos de reducción de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", en los cuales su acabado final se realiza por medio de discos abrasivos de desbaste, este proceso de manufactura utilizado no garantiza las tolerancias de forma y posición, así como el acabado superficial que exige el conjunto mecánico. Teniendo en cuenta las solicitaciones y estados tensionales a que está sometida la herramienta de corte, se seleccionó el material de la marca P6M5, además de las variables y parámetros geométricos, así como el ciclo térmico que garanticen un factor de seguridad en correspondencia con las exigencias tecnológicas de diseño. Se determinó por el método de los elementos finitos (MEF) los esfuerzos tensionales de Von Mises y se compararon con los resultados obtenidos por el método analítico. Además se realizó la valoración económica, así como el análisis de la incidencia de los procesos de diseño en el medio ambiente.



## Abstract

The work had the purpose to establish the design of an angular strawberry of shoot for the mechanization of the arms of sweeping of the ovens of company reduction "Comandante Ernesto Che Guevara", the ones that his finishing touch accomplishes itself in by means of abrasive records of roughing down, this process of manufacture used does not guarantee the tolerances of way and position, as well as the superficial finishing that demands the mechanical set. Taking solicitations into account and tensional states to which the cutting tool is subdued, that P6M5, in addition to the variables and geometric parameters, selected himself check mark material to as well as the thermic cycle that guarantee a safety factor in mail with the technological designing requirements. ( MEF ) Vom Mises's tensional efforts were determined by the method of the finite elements and they compared with the results obtained for the analytical method. Besides the cost-reducing assessment, as well as the analysis of the incidence of the processes came true of design.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad supone un desafío encontrar soluciones efectivas y de largo alcance frente a la crisis mundial imperante. Crisis que afecta todos los sectores, principalmente la economía, tanto de los países desarrollados, subdesarrollados e inclusive ya en los de tercer mundo amenaza con la propia extinción de sus habitantes y la especie humana en general. El incremento de los precios de las materias primas, la sobrevaloración de los productos, el consumismo y la posible recesión en todo el planeta son algunos de los principales factores causantes de esta crisis, enmarcada según estadistas y expertos desde el año 2008 hasta el 2012 y que amenaza con extenderse.

Cuba como país no está ajeno a tales dificultades, por lo que se ha propuesto alcanzar un desarrollo sostenible con tendencia al incremento de los índices productivos. Para lo cual ha establecido objetivos imprescindibles como son: el uso racional de los recursos; el cuidado y conservación de los equipos y medios de producción, así como las máquinas herramientas; la sustitución de importaciones, entre tantos más, y todo aparejado a la creatividad y profesionalismo de los técnicos y profesionales, labor digna de elogiar.

En la actualidad el diseño de las herramientas de corte debe cumplir con estándares de calidad cada vez más estrictos y al menor costo posible, que les permita ser más competitivos en el mercado globalizado, para ello los centros o departamentos de desarrollo invierten en la capacitación y compra de normas y software en aras de lograr que éstos proyectos se ejecuten en las industrias metalmecánica con resultados satisfactorios.

En el diseño de las herramientas de corte es importante garantizar el comportamiento mecánico de los parámetros geométricos que conforman a las mismas y si éstos son capaces de soportar las solicitaciones y estados tensionales a que estarán sometidas durante el proceso tecnológico de mecanizado.

Todo ello ha conllevado al diseño de nuevas herramientas de corte fabricadas de aceros rápidos, de carburo de silicio y de carburo cementado con el objeto de

incrementar significativamente la eficiencia de la producción en la industria metalmecánica.

### **Situación problemática**

En la planta de Hornos de Reducción de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" en el mecanismo de arrastre se emplean brazos de la aleación A351 Grade HK - 40 obtenidos a partir del proceso metalúrgico de fundición en la Empresa Mecánica del Níquel "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche", estos están diseñados con una ranura tipo cola de milano, la cual debido al proceso tecnológico presentan macro deformaciones de forma que dificultan el alojamiento de los dientes de arrastre y originan desequilibrio en el sistema que no pueden ser eliminados por falta de una herramienta de corte en el mercado internacional que cumpla con las exigencias tecnológicas del diseño.

Lo anteriormente expresado permitió establecer como **problema**:

¿Cómo diseñar una herramienta de corte con la cual se pueda eliminar las asperezas e irregularidades superficiales obtenidas en la ranura de tipo cola de milano de los brazos del mecanismo de barrido de los hornos de reducción, los cuales se fabrican por el proceso de fundición?

Se establece como **objeto de investigación**:

El proceso de diseño de herramientas de corte.

### **Campo de acción:**

El proceso de diseño de fresas angulares.

Dado el problema a resolver se plantea como **hipótesis**:

Con el diseño de una fresa angular que permita el mecanizado de las asperezas e irregularidades presente en la ranura de tipo cola de milano de los brazos del mecanismo de barrido de los hornos de reducción, se podrá obtener una superficie que garantice el ensamble de los dientes y la reducción del esfuerzo físico del operario.

Se define como **objetivo general**:

Diseñar una fresa angular para el mecanizado de las asperezas e irregularidades desarrolladas en la ranura del tipo cola de milano en los brazos del mecanismo de barrido de los hornos de reducción fabricados por proceso de fundición

Para cumplir el objetivo general, se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

1. Caracterizar el material para el diseño de la fresa angular en correspondencia con las características de la aleación A351 Grade HK - 40.
2. Realizar un análisis por elementos finitos para la comprobación del diseño.
3. Elaborar la tecnología de tratamiento térmico.

De acuerdo con el objetivo propuesto, se establece como **tareas a desarrollar**:

1. Revisión bibliográfica y sistematización de las teorías, métodos y procedimientos relacionados con el diseño de herramientas de corte.
2. Desarrollo del proceso de diseño de la fresa angular
3. Análisis por elementos finitos.
4. Elaboración de la tecnología de tratamiento térmico.
5. Análisis y valoración de los resultados.
6. Planteamiento del efecto económico, social y ambiental del proceso derivado del diseño de la herramienta.

# **CAPÍTULO 1**

## **Marco teórico de la investigación**

## **Capítulo 1. Marco Teórico de la Investigación**

### **1.1. Introducción**

La Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche” tiene por objeto social prestar servicio en materia de fabricación y recuperación de elementos mecánicos, principalmente a las empresas productoras del níquel, para ello la misma cuenta con una UEB de Maquinado en la cual se mecanizan los brazos del mecanismo de arrastre de la Planta de Hornos de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

**El objetivo del capítulo** es exponer los fundamentos teóricos de los procedimientos definidos que conducen al establecimiento del estado del arte en el tema abordado y sustentan los resultados de la investigación.

### **1.2. Marco contextual donde se desarrolla la investigación**

Los Hornos de Reducción de la Empresa Che Guevara dentro en su sistema mecánico tienen implícitos los brazos del mecanismo de arrastre, éstos son manufacturados en la UEB de Fundición de la EMNI a través del proceso tecnológico de colada de la aleación A351 Grade HK-40, los mismos en su diseño tienen concebido una ranura tipo cola de milano para alojar los dientes que arrastran al mineral y como resultado del proceso metalúrgico surgen macro deformaciones de forma en su geometría las cuales impiden la correcta alineación y compensación del sistema mecánico.

El proceso de manufactura se realiza de dos formas:

- Manual
- Semiautomatizado

El proceso manual consiste en el desbaste de las ranuras con la utilización de una pulidora manual neumática porta discos abrasivos de desbaste.

El proceso de semiautomatizado consiste en el arranque de virutas a través de una máquina herramienta fresadora.

### **1.3. Aspectos a considerar en el proceso de manufactura**

- Económico
- Social
- Ambiental

En lo económico para el proceso manual se requiere de un consumo de tres discos abrasivos de desbaste de dimensiones 150 x 6 x 22, 2 mm con un costo unitario de 2,462838 CUC y en un tiempo de operaciones de 3,5 h por cada brazo. Este proceso no es eficiente debido a que la ranura tipo cola de milano requiere de tolerancias de forma y de posición las cuales no pueden ser asumidas por el operario, por tanto las macro deformaciones de forma de la geometría no se logran eliminar.

En el proceso de semi automatizado se emplea el diseño de una fresa angular de sujeción mecánica por tornillos de seis labios cortantes, la cual incluye 12 plaquitas y su costo de fabricación es de 125 CUP y 408, 56 euros, con ésta el mecanizado de las ranuras se realiza en 2 h, pero este proceso no es factible debido a que la aleación A351 Grade HK-40 tiene la propiedad de abrazarse a la fresa y provocar desajuste en el sistema de sujeción y con ello la fractura de las plaquitas lo que implica un mayor consumo de las mismas, y éstas están valoradas en el mercado internacional por los proveedores Sandvik Coromant y Bolesshaguer en 22, 35 y 27, 47 euros, además de que no se eliminan totalmente las macro deformaciones de forma debido al paso de la misma.

En lo social el proceso semi automatizado humaniza considerablemente el trabajo con respecto al proceso manual, ya que son menores las horas trabajadas y el esfuerzo físico empleado por parte del operario para acometer la tarea.

En la parte ambiental mediante el arranque de virutas en el proceso semi automatizado es menor el daño y las afecciones en el sistema respiratorio, ya que como resultado de la fricción de los discos abrasivos de desbaste respecto al material de los brazos en el proceso manual surge un calentamiento y esto induce un desprendimiento de partículas abrasivas en el orden de micrones que generan gases nocivos y partículas en suspensión las cuales son inhaladas por el operario.

#### **1.4. Peculiaridades acerca del diseño de herramienta de corte**

El diseño como tarea consiste en pensar (idear) y describir una estructura que aparece como una portadora de características deseadas (particularmente funciones); el diseño como proceso consiste en transformar información de las condiciones, necesidades y requisitos a la descripción de una estructura que las satisfaga (Maher, 2003).

El diseño de las herramientas de corte se basa en las propiedades físico-mecánicas y químicas de las aleaciones a mecanizar. También se tiene en cuenta las condiciones atmosféricas o climatológicas del área de trabajo. Se tiene en consideración si el mecanizado se realiza en estado seco o con lubricantes, si es periférico o frontal y en función de ellos, se determinan las variables geométricas de la herramienta.

#### **1.5. Materiales para la fabricación de herramientas**

Herramienta es el elemento que entra en contacto directo con la pieza y produce la eliminación del material sobrante de la preforma.

Una herramienta consta, en general, de una o varias aristas o filos cortantes, materializadas por la intersección de superficies, generalmente planas. Entre estas superficies, resultan de mayor interés la denominada cara de incidencia, aquella que queda enfrentada a la superficie mecanizada de la pieza y la cara de desprendimiento, aquella por la que se desprende el material eliminado o viruta. Las aristas se denominan aristas o filos de corte (Micheletti, 1986).

Según Bruhis *et al.* (2007) la tipología existente de herramientas es muy amplia, ya que depende, entre otras, de la operación a realizar y condiciones de la misma, de la máquina-herramienta en el que se desarrolla dicha operación y de las propiedades que se pretenden conseguir en la pieza una vez finalizado el proceso. Plantean Garay *et al.* (2008) que en función del número de aristas de corte es frecuente considerar una primera clasificación de herramientas en herramientas monofilos, tales y como las empleadas en operaciones de torno, y herramientas multifilos, tales y como las empleadas en operaciones de fresado. La herramienta se completa con



una parte no activa que permite su fijación a los elementos de sujeción de la máquina-herramienta.

Existe una amplia variedad de materiales empleados en la parte activa de la herramienta. La elección de uno u otro tipo depende fundamentalmente de las propiedades mecánicas del material a mecanizar y de los requerimientos del proceso a realizar. Por lo general, se requiere una elevada dureza y una elevada resistencia al desgaste que permita la eliminación continua de material. Resulta esencial que estas propiedades se mantengan en caliente debido al incremento de temperatura producido en la zona de corte como consecuencia del rozamiento entre la pieza y la herramienta. Este hecho descarta el uso de materiales tales como los aceros al carbono, al no mantener unas propiedades de dureza aceptables en caliente (Altintas, 2000).

Como materiales más usuales de la parte activa de la herramienta pueden considerarse los siguientes grupos según Koren (1997):

- Aceros rápidos
- Carburos metálicos
- Materiales cerámicos
- Cermets
- Materiales diamantados

**Los aceros rápidos**, denominados así por permitir altas velocidades de mecanizado en relación a otros aceros, están constituidos por un grupo de aceros con un contenido en carbono entre el 0,7 % y el 0,9 % y una serie de elementos de aleación tales como cobalto (5 % - 17 %), wolframio (18 % - 18,5 %), cromo (4 % - 4,5 %), molibdeno (0,5 % - 1,1 %) y vanadio (0,8 % - 2,5 %), que les confieren sus propiedades de dureza y resistencia al desgaste en frío y en caliente. Para herramientas de geometría compleja estos aceros se obtienen por sinterizado.

**Los carburos metálicos**, también denominados metales duros, están constituidos por carburos de wolframio con adición de cobalto, carburos de titanio y carburos de

tántalo. Presentan unos valores elevados de dureza y resistencia al desgaste en comparación con los materiales previamente mencionados. En la actualidad se trabaja en diferentes tipos de recubrimientos de estos materiales. Entre estos recubrimientos destacan el nitruro de boro, que confiere a la herramienta una dureza y una resistencia al desgaste muy elevadas. Los carburos metálicos son, junto con los aceros rápidos, los materiales más ampliamente utilizados.

**Los materiales cerámicos** tienen alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) como constituyentes básicos. Presentan una elevada dureza así como una gran fragilidad, hecho este que limita en gran medida su campo de aplicación. Existen materiales designados como los cermets, que son una mezcla de materiales cerámicos (TiC) y metales (Co, Ni, Mo) obtenida mediante sinterizado.

**Los materiales diamantados** emplean diamante en polvo y aglutinante como elementos básicos. Presentan la máxima dureza frente a los restantes materiales, aunque poseen una gran fragilidad y un elevado coste como principales inconvenientes.

Estas últimas herramientas se conocen con el nombre de "HSS" correspondientes a iniciales en inglés de High Speed Steel, que significa: aceros de alta velocidad. Estos aceros proporcionan una dureza entre 60 y 67 HRc y buena resistencia al impacto (Suárez, 1995).

### **Herramientas fabricadas de los aceros rápidos**

Los aceros que contienen del 8,5 - 9 % de tungsteno y de 3,8 – 9,6 % de cromo pueden ser utilizados para la fabricación de herramientas, las cuales no pierden sus propiedades de corte hasta no sobrepasar los 600 a 650 grados Celsius en el proceso de corte y son considerados como de alta velocidad (H.S.S); en ellos se pueden obtener durezas de 62 - 65 HRC con un adecuado tratamiento térmico y pueden trabajar a velocidades de corte de 2 a 3 veces mayor que las utilizadas en los aceros al carbono (Schmitt-Braess, 1999).

Los aceros rápidos se designan con la letra P al comienzo de la clasificación, seguido de un número que indica el porciento de tungsteno, con las letras y K indican el Vanadio y el Cobalto respectivamente.

El grado P18 es considerado el acero de alta velocidad básico, todos los demás grados son comparados con este. El grado P9 es de menor contenido de Tungsteno pues solo tiene la mitad del P18 pero tiene mayor contenido de vanadio, el cual incrementa sus propiedades de corte haciéndolas comparables con el P18.

El método más efectivo para incrementar la dureza, resistencia en caliente y por consiguiente la resistencia al desgaste de los aceros de corte rápido es:

- Por incremento del contenido de vanadio.
- Por adición de cobalto.

Otros grados de aceros de corte rápido son el P12, P6Mo5 y P6Mo3 (Molibdeno) los cuales poseen habilidades de corte aproximado a la del P18 pero son menos costosas que éste y más fáciles de trabajar que el P9 ya que por lo difícil del rectificado del P9 no es recomendable para la producción masiva de herramientas, especialmente donde es un requisito fundamental un alto grado de rectificado como el caso de las afeitadoras y las brochas (Pérez, 2001).

Según Ray y Majumder (1984) los grados P18, P12, P9, P6M3, y P182 son considerados de una capacidad normal de productividad, los demás grados P 95, P144, P9K5, P9K10, P18K52 y P10K55 son de mayor capacidad de trabajo, tienen mayor dureza, resistencia al rojo y resistencia al desgaste de 2 a 3 veces mayor que el P18.

Sus principales características son:

- Conservar su filo a temperaturas de 600 – 650 °C.
- Son menos duros en frío que los aceros al carbono.
- Permiten aumentar considerablemente la velocidad de corte.

Se emplea en la fabricación de cuchillas, brocas, brochas, fresas escariadores, herramientas de roscar, herramientas para elaborar ruedas dentadas, barrenas. Las marcas P18 y P9 poseen una amplia aplicación en nuestra industria como es en la elaboración de aceros de construcción de  $\sigma_t = 900 - 1\ 000$  MPa y HF de HB 270 - 280 MPa sin embargo el P18 es más productivo que el P9 por tener el doble del contenido de W, lo que le permite soportar temperaturas superiores (Micheletti, 1980).

Si se señala más del 0,3 % de Mo a los grados P18 y P9, el contenido de tungsteno se reducen respecto a los demás acero de su tipo en las siguientes proporciones: 1 % de Mo reemplaza 2 % de W.

El P9 $\Phi$ 5 tiene mayor contenido de vanadio y carbono que el P18 y 100 – 300 % más resistente al desgaste. Se recomienda para herramientas que trabajan a velocidades de corte bajas y cortan virutas finas como brochas, escariadores y machos.

Los aceros rápidos P12, P6M3, P6M5 poseen buena plasticidad en caliente lo que los hace adecuados para la aplicación de la herramienta por técnicas de deformación plástica, como las brocas y barrenas helicoidales.

Las propiedades del grado P14 $\Phi$ 4 son medios del P18 $\Phi$ 2 y P9 $\Phi$ 5.

Los grados P9K5, P9K10, P18K5 $\Phi$ 2 y P10K5 $\Phi$ 5 tienen mayor dureza, dureza al rojo y resistencia al desgaste de 2 a veces mayor que el P18 y son utilizados en herramientas que trabajan a velocidades de corte altas.

Los aceros de corte rápidos utilizados hasta ahora en la elaboración de herramientas de corte ha seguido un proceso de constantes mejoras con el uso de nuevos elementos de aleación, a pesar de ello existen limitaciones, como son las segregaciones.

Las segregaciones son diferencias en la composición química del acero creadas en el proceso de enfriamiento y originadas por las diferentes velocidades de enfriamiento en diferentes puestos del lingote. El fenómeno de las segregaciones comienza con la formación del hierro (ferrita) llamado dendritas con bajo contenido de carbono. Alrededor de estos núcleos llamados primarios, la colada se enriquece

de carbono y elementos de aleación, solidificándose después eutécticamente, con la aparición de carburos y Austenita. Estos carburos (combinaciones de carbono y metal caracterizado por una gran dureza) son de carácter primario y durante el enfriamiento se orientan en forma de red, formando las segregaciones, que constituyen los principales problemas de los aceros de corte rápidos los cuales son: Problemas de mecanizado y pulido, dificultades durante el tratamiento térmico (cambios dimensionales), fragilidad después del tratamiento térmico.

#### **1.5.1. Materiales actuales para herramientas de corte**

La introducción y el continuo desarrollo de los materiales ya existentes han mejorado el corte de metales en los últimos años aunque todavía no existe un material de herramienta óptimo para cada operación de mecanizado.

Plantea Landers *et al.* (2004) que seleccionar la calidad más correcta requiere un análisis y conocimientos de los diferentes materiales, además de tener en cuenta los factores mencionados. El material idóneo debe ser:

- Duro, que resista al desgaste.
- Tenaz, para resistir la rotura.
- Químicamente inerte con la pieza y estable, para resistir la oxidación y la disolución.
- Resistente a los choques térmicos.

Denai *et al.* (2007) afirma que una sola calidad no puede cubrir toda la demanda de mecanizado. Aunque haya calidades que cubren una amplia gama de aplicaciones, son los metales duros y aceros rápidos los que dominan totalmente las aplicaciones.

Los materiales más usados para recubrimiento son: el Carburo de Titanio (TiC), el Nitruro de Titanio (TiN), el Óxido de Aluminio-cerámico ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el Carbo-Nitruro de Titanio (TiCN). El TiC y el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  son materiales duros que proporcionan buena resistencia al desgaste. El TiN no es un material duro, pero proporciona bajos coeficientes de fricción en las caras de las placas y una mayor resistencia al

desgaste en cráter, debido a lo cual se aplica en herramientas de corte a temperaturas no muy altas (Grzesik y Brol, 2003).

### **1.6. Herramientas empleadas en el proceso de fresado**

Las fresas van provistas de su periferia, o también en su cara frontal, de dientes o de cuchillas. Son útiles de varios filos y tienen respeto a los útiles de un solo filo, para cepillar y para torneear, la ventaja de que no se calienten tanto y de que tampoco se embotan tan rápidamente. Cada filo está cortando nada más que una fracción del tiempo que dura su revolución y durante el resto del tiempo se vuelva a enfriar (Suryanarayana, 2001).

Las herramientas para fresar o fresas se hacen preferentemente de acero rápido. Como el acero rápido es un material caro, en el caso de fresas grandes, se hace el cuerpo de la fresa con acero de construcción y se le insertan cuchillas de acero rápido. En los platos o cabezales de cuchillas, en vez de las cuchillas insertadas pueden emplearse también placas de corte rotatorias de metal duro.

Según la forma de los dientes se distingue:

#### **Fresas de dientes puntiagudos**

- Las fresas cilíndricas tiene filos únicamente en su periferia. Se utilizan para desbastar y afinar superficies planas con la fresadora horizontal.
- Las fresas cilíndricas acopladas, con dientes helicoidales de sentidos opuestos, tiene la ventaja de que el empuje axial queda parcialmente compensado.
- Las fresas frontales cilíndricas tiene dientes no solamente en la periferia, sino también en una de las caras frontales. Se prestan para trabajar superficies planas y rebajos en ángulo recto.

#### **Fresas en forma de disco**

- La sierra circular se usa para cortar piezas y para hacer ranuras estrechas, como en las cabezas de los tornillos.

- Las fresas para ranura con dientes rectos sirven para fresar ranuras planas. Para evitar el roce lateral, van ahuecadas con la muela por ambos lados.
- Las fresas de disco de dientes triangulares se usan para chaveteros profundos.
- Las fresas de discos cruzados van provistas de filos dirigidos alternativamente a la derecha y a la izquierda.
- Las fresas de discos acoplados en ranuras pueden volver a su anchura primitiva mediante interposición de las convenientes arandelas.
- Fresa de disco en posición de trabajo.

### **Fresa con vástago**

Las fresas de vástago son fresas frontales cilíndricas de pequeño diámetro. El vástago sirve para la sujeción. Las fresas de vástago con corte a la derecha y hélice a la derecha o las de corte a la izquierda con hélice a la izquierda, pueden salirse del husillo como consecuencia del empuje axial. Para evitar esto, el mango de la fresa va provisto de una rosca de apriete que sirve para fijarla en el husillo de fresar.

Las fresas de vástago se prestan para fresar ranuras en T.

Las fresas para agujeros rasgados tienen dos filos y se utilizan para el fresado de chaveteros y de agujeros rasgados.

### **Fresas de forma**

Las fresas angulares son necesarias para la ejecución de guías prismáticas.

La fresa frontal angular se utiliza para el mecanizado de guías en ángulo.

Las fresas de un solo filo se utilizan para pequeños trabajos de fresado de forma.

Con el fresado cilíndrico, se trabajan superficies planas. Las fresas cilíndricas se usan para desbastar y afinar las superficies, y las frontales realizan rebajos en ángulo recto. Entre las piezas fresadas por este tipos de fresado, se encuentran, superficies de apoyo, por ejemplo, de matrices, superficie de junta estancada, superficies de deslizamiento, para rieles, superficies de guía o correderas, etc.

Con el fresado por discos, se fresan entalladuras estrechas. Por ejemplo, cabezas de tornillos, fresado de chaveteros, tanto planos como profundos, también se utilizan para curvas, arcos circulares y toda clase de perfiles.

Con el fresado con vástago, se realiza el fresado de piezas hexagonales, fresados de chaveteros y agujeros rasgados, ranuras tipo cola de milano, cabezas de tornillos, tuercas, ejes de chavetas, ruedas dentadas, etc.

Con el fresado de formas, se obtienen guías prismáticas, guías en ángulo, cuñas, reglas de acero para taller, de variadas formas, como de filo, de tres aristas, de cuatro aristas, con sección rectangular, etc.

En los últimos años se ha ido imponiendo el uso del husillo vertical, y con él también ha aumentado el empleo de las fresas del tipo de espiga y de cabeza o frontales.

Por su parte, el incremento de temperatura debido al rozamiento, resulta más crítico en la herramienta que en la pieza. La razón es que la pieza presenta en general unas dimensiones mayores que permiten la evacuación del calor por conducción hacia el interior y por convección hacia el exterior de la misma y que sólo una pequeña parte de la superficie de mecanizado se ve afectada en cada instante por el proceso. En el caso de la herramienta la situación es la inversa, es decir, sufre continuamente el efecto del rozamiento durante el proceso de corte y no dispone de las mismas posibilidades de evacuación del calor generado.

### **1.7. Características generales de la aleación A351 grado HK- 40**

Como su nombre lo indica, tienen configuración metalográfica austenítica. Esta estructura cristalina es cúbica centrada en las caras (fcc).

Pertenece a la serie 300 y es la más extensa, son aleaciones Cr-Ni. El níquel es un elemento estabilizador o formador sustitucional de austenita, y se emplea con este propósito en un porcentaje de 4 a 37 %. La serie 300 AISI mantiene alto contenido de níquel y hasta 2 % de manganeso. También pueden contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio, elementos que son utilizados para conferir ciertas características, como podría ser el prevenir en las estructuras soldadas la corrosión en la región cercana a la soldadura. En ciertos tipos se usa azufre o selenio para mejorar



su habilidad de ser maquinados.

Sus características son las siguientes:

- Excelente resistencia a la corrosión.
- Endurecidos por trabajo en frío y no por tratamiento térmico.
- Excelente soldabilidad.
- Excelente factor de higiene y limpieza.
- Formado sencillo y de fácil transformación.
- Tienen la habilidad de ser funcionales en temperaturas extremas, bajas temperaturas (criogénicas) previniendo la fragilización, y altas temperaturas (hasta 925 °C).
- Son esencialmente no magnéticos. Pueden ser magnéticos después de que son tratados en frío. El grado de magnetismo que desarrollan después del trabajo en frío depende del tipo de aleación de que se trate.

La composición química de la aleación a mecanizar de acuerdo con la Norma Internacional ASTM se muestra en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Composición química de porcentaje en masa de la aleación A351 grado HK- 40.

| Elementos | C    | Si   | Mn  | P    | S    | Cr   | Mo  | Ni   |
|-----------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|
| Min (%)   | 0,35 | -    | -   | -    | -    | 23,0 | -   | 19,0 |
| Max (%)   | 0,45 | 1,75 | 1,5 | 0,04 | 0,04 | 27,0 | 0,5 | 22,0 |

#### **1.7.1. Proceso tecnológico de fabricación de los brazos a partir de la aleación A351 grado HK- 40.**

El proceso de manufactura se realiza mediante colada, el mismo regula una serie de variables y parámetros propios del sistema de alimentación, los cuales durante el proceso de solidificación el enfriamiento produce contracciones (rechupes), que no pueden ser controlados en su totalidad y es por ello que es imposible lograr

homogeneidad y linealidad en la superficie geométrica de la ranura tipo cola de milano.

### **1.8. Tratamiento térmico de las herramientas de corte**

Las herramientas de corte se tratan térmicamente en función de las propiedades: químicas, físicas y mecánicas de las mismas.

En el temple del acero rápido se calienta (habitualmente en baños de sales) hasta altas temperaturas superiores a los 1 100 °C en dependencia de la marca del acero. Las altas temperaturas es necesaria para disolver una parte de los carburos y obtener durante el calentamiento austenita de alta aleación, que se asegura una alta estabilidad térmica del acero.

La estructura después del temple es de martensita, carburos y austenita residual. La dureza en ese estado es de alrededor de 62 HRc. Durante el revenido a temperaturas entre 550 y 600 °C, que de ordinario es triple (3 revenido), tiene lugar la precipitación a partir de la martensita de carburos finos y dispersos, y además ocurre la transformación de la austenita retenida en martensita revenida. Este proceso provoca una elevación de la dureza hasta 64 HRc.

Otra variante del tratamiento térmico consiste en aplicar temple subcero (enfriamiento en gases licuados hasta - 80 °C) seguido de un solo revenido. (Torres Alpízar, 2004).

La temperatura de temple para los aceros viene determinada por la posición de los puntos críticos  $A_1$  y  $A_3$ .

El tiempo total que dura el calentamiento se compone del tiempo de calentamiento hasta la temperatura dada ( $t_c$ ) y del tiempo de permanencia a esta temperatura ( $t_p$ ).

La magnitud  $t_c$  depende de la aptitud del medio para calentar, de las dimensiones y forma de las piezas y de su colocación en el horno;  $t_p$  depende de la velocidad de los cambios de fase, lo cual está determinada por el grado de recalentamiento por encima del punto crítico y por la dispersión de la estructura inicial. (Guliaév, 1978).

En la práctica  $t_p$  puede tomarse por un minuto por cada milímetro de espesor o

diámetro del elemento mecánico. El calentamiento suele hacerse en un medio gaseoso es decir en sales donde la relación de los tiempos  $t_c$  en estos medios es aproximadamente de 0,5.

Cuando hay que calentar hasta una temperatura más alta, el tiempo de calentamiento se reduce, ya que la intensidad de calentamiento por radiación aumenta rápidamente al elevarse la temperatura. Y al contrario, el calentamiento en horno hasta temperaturas inferiores a 800 - 900 °C, el calentamiento de revenido transcurre mucho más despacio, siendo tanto más lento, cuanto más baja es la temperatura, porque a bajas temperaturas el calentamiento se efectúa principalmente por convección, y no por radiación.

Los aceros rápidos tienen velocidad de temples más pequeños, se templean en aires todos los aceros de muy alta aleación. Aunque siempre los fabricantes señalan en sus catálogos el medio de enfriamiento que deben emplearse para el temple de cada acero, conviene recordar que muchas veces hay excepciones a las normas generales que suelen dar. (Apraiz Barreiro, 1966).

Por templabilidad se entiende (Guliaév 1978; Malishev, *et al* 1985) es la propiedad de templarse hasta una profundidad determinada. Por profundidad de templarse se suele entender la distancia desde la superficie hasta la copa con estructura semi martensita compuesta de un 50 % de martensita y un 50 % de troostita. La profundidad de templabilidad depende de la composición química del acero o más exactamente del valor de la velocidad crítica de temple: cuanto menor sea  $V_{crítica}$  tanto mayor es la profundidad de templabilidad.

En dependencia de la composición del acero, de la forma y de las dimensiones de la pieza y de las propiedades que se requieren de ella después de tratada térmicamente, hay que elegir el procedimiento óptimo de temple, que sea más fácil de realizar y que al mismo tiempo asegure las propiedades necesarias.

El temple en un solo medio de enfriamiento, es donde la pieza calentada hasta determinadas temperaturas se sumerge en el líquido de temple donde permanece hasta su total enfriamiento. Para disminuir las tensiones internas, la pieza, a veces,

no se sumerge inmediatamente en el líquido de temple, sino que se enfría durante cierto tiempo en el aire, es decir se "preenfía". Este procedimiento se llama temple con preenfriamiento.

Para el tratamiento térmico de los aceros, son cada día más empleados los baños de sales. Están constituidos principalmente por cantidades variables de cloruros, carbonatos, nitritos, nitratos y cianuros de sodio, potasio y bario. En las sales para el calentamiento en el temple del acero rápido se utilizan a temperaturas muy elevadas de 1100 a 1300 °C, suelen estar constituidos principalmente por cloruro bórico (95 % aproximadamente) y pequeños porcentajes de cloruro sódico. Para evitar que con el uso se vuelvan descarburantes, se les añade periódicamente pequeñas cantidades de sílice,  $\text{SiO}_2$ , en polvo. A veces estas sales se preparan también con pequeñas cantidades de fluoruro cálcico, sílice y bióxido de titanio, en cantidades inferiores siempre a 5 % (Apraiz Barreiro, 1966).

Según (Malishev, *et al* 1985) los defectos que pueden originarse durante el temple es la dureza insuficiente de la pieza templada donde se ocasiona por un calentamiento incompleto o por falta de rapidez en el enfriamiento con una velocidad inferior a  $V_{\text{crítica}}$ . También por la dureza, por manchas donde es resultado del calentamiento irregular del acero antes de templarlo o del enfriamiento irregular. Además por la oxidación y descarburación de la superficie donde es por el calentamiento de las piezas en hornos con atmósfera oxidante, donde un medio eficaz para evitar este defecto es mediante las sales fundidas. Otro defecto puede ser mediante la distorsión (deformación de la pieza) y grietas que ocurren a causa de las grandes tensiones que aparecen en el curso del temple, debido a que se obtienen distintas estructuras con volumen específico diferente a causa del enfriamiento irregular de las diferentes partes de la pieza (ángulos agudos, pasos bruscos).

### **1.9. Conclusiones del capítulo 1**

- Dentro de los aceros para la fabricación de herramientas de corte, los aceros rápidos presentan buenas propiedades mecánicas, sobre todo su resistencia a altas temperaturas y su fácil maquinabilidad.
- Los brazos del mecanismo de barrido de los hornos de la ECG se obtienen por fundición, sin embargo el proceso de limpieza de la ranura tipo cola de milano donde se alojan los dientes se realiza por esmerilado, por lo que se hace necesario el diseño de una fresa.
- Existe una amplia gama de herramientas de corte dentro de las que se encuentran las fresas, las cuales debido a la naturaleza del material a mecanizar y de la geometría deseada se establecen diferentes diseños en aras de lograr una buena calidad material y aparente.

# **CAPÍTULO 2**

## **Materiales y métodos**

## Capítulo 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Introducción

El conocimiento del proceso, diseño y el desarrollo de modelos matemáticos que representen los fenómenos físicos de los sistemas y el proyecto para la implementación de las nuevas tecnologías es un tema muy importante para el desarrollo industrial de nuestro país en la actualidad.

Según un pensador matemático, el modelo no es más que una abstracción del proceso real, donde la ecuación o conjunto de ellas que componen el mismo es la mejor aproximación del proceso.

**El objetivo del capítulo es** determinar el tipo de material a utilizar en el diseño de la fresa, así como establecer la metodología de cálculo relacionada con el diseño de la fresa angular de vástago.

### 2.2. Características del material para el diseño de la herramienta

Las herramientas de corte se diseñan de aleaciones que contienen cromo, molibdeno, vanadio, wolframio; estos son aceros rápidos. Además son empleados los carburos de tungsteno y de wolframio. De acuerdo con las propiedades físico-mecánicas de la aleación a mecanizar y de las solicitaciones y estados tensionales a que estará sometida la herramienta de corte durante el mecanizado, se escogió por la norma GOST 17 270 la aleación P6M5, la composición química y las propiedades físico-mecánicas de la misma se muestran en la tabla 2.1 y 2.2.

**Tabla 2.1.** Composición química en masa de la aleación P6M5

| C    | Cr   | W   | V   | Mo  | Fe      |
|------|------|-----|-----|-----|---------|
| 0,85 | 4,15 | 6,2 | 1,8 | 5,2 | Balance |

**Tabla 2.2.** Propiedades mecánicas y físicas del material P6M5

| Resistencia<br>tracción<br><br>Rm (N/mm2) | Límite de fluencia<br>$\sigma_y$ (N/mm2) | Elongación<br><br>a (%) | Dureza Brinell<br><br>HB |
|-------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 3 200 – 3 600                             | 90 – 100                                 | 8                       | 255                      |

Se selecciona el acero P6M5 por poseer buena plasticidad en caliente, lo que lo hace adecuado para la aplicación de la herramienta por técnicas de deformación plástica. Por ello, la principal propiedad que se exige a este tipo de acero es que presente una elevada resistencia, tenacidad y dureza acompañadas de buena resistencia al desgaste y templabilidad.

En el diseño de las herramientas de corte para el fresado se debe tener en cuenta las condiciones de trabajo a que estará sometida, las cuales pueden ser en concordancia o en contraposición.

El fresado en concordancia es el más conveniente: el filo penetra de lleno en la pieza produciendo una viruta gruesa en la entrada y delgada en la salida. Es conveniente que la viruta sea delgada en la salida, aumenta la seguridad del filo y la vida de la herramienta.

El fresado en contraposición se aplica si las condiciones de trabajo son inestables, o bien si hay que mecanizar piezas con superficies desfavorables.

### 2.3 Selección y preparación de muestras

En la UEB de Maquinado de la empresa mecánica del níquel se seleccionó una barra de acero P6M5 de diámetro 100 y a la misma se le extrajo una probeta de 15mm de espesor mediante corte refrigerado en la sierra semiautomática modelo 85661; luego en el laboratorio de la UEB de fundición se realizó la preparación de la superficie a examinar a través del desbaste y pulido en la electro amoladora modelo HEQ – 5 248 – 2 y pulidora metalográfica Montasupal para lograr una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se desbastaron con papeles abrasivos del tipo 100, 120, 150, 180; posteriormente se efectuó el análisis



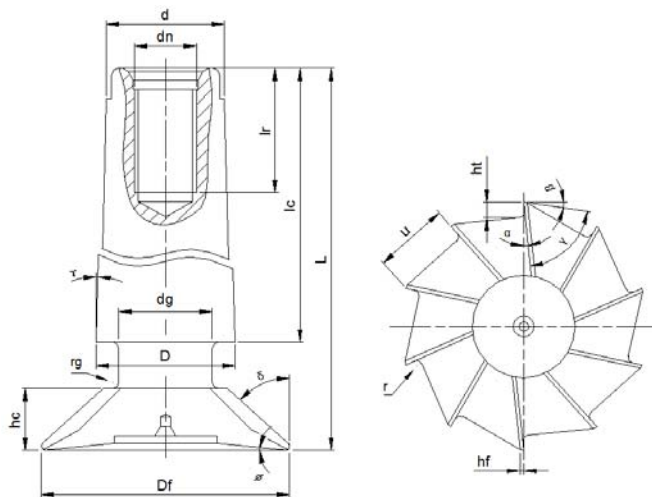
químico de las muestras en un espectrómetro cuántico de masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. Se comparó la composición química de las muestras con los estándares establecidos para conocer su correspondencia con la aleación a investigar.

#### **2.4. Metodología de cálculo para el diseño de la fresa angular de vástago**

Para la metodología de cálculo se tuvo en cuenta la capacidad de trabajo de la herramienta de corte, así como los criterios de diferentes autores relacionado con el diseño de estos tipos de herramientas, así como las características de la máquina herramienta.

##### **2.4.1. Geometría del filo**

Las herramientas de fresado se clasifican en dos grupos, en función de los procedimientos principales de fresado: fresado frontal, o sea, de planear, y fresado periférico, o sea, cilíndrico. El caso analizado se corresponde con el fresado frontal y en el mismo se analizaron los parámetros de diseño mostrados en la figura 2.1.



**Figura 2.1.** Geometría de la fresa angular de vástago.

- Ángulo de desprendimiento radial ( $\alpha$ )
- El ángulo de desprendimiento tiene gran influencia sobre la potencia de corte y la resistencia del filo de corte. Un ángulo grande disminuye las fuerzas de corte pero debilita el filo; un ángulo pequeño o incluso negativo produce el efecto contrario. Para

el mecanizado de acero, este ángulo oscila entre 5 y 15°; para aleaciones ligeras de 20 a 25°.

- Ángulo de incidencia ( $\beta$ )
  - El ángulo de incidencia evita el roce entre la herramienta y la pieza. Por lo general, oscila entre 5 y 12°, siendo mayor a medida que se trabajan materiales más blandos.
- Ángulo de posición ( $\delta$ )
  - El ángulo de posición influye, junto con el avance por diente, en el espesor de viruta y las fuerzas de corte. Excepto para operaciones de fresado en escuadra, este ángulo es inferior a 90° para que el filo de corte sea robusto y se produzca fácilmente la evacuación de las virutas. Los ángulos de posición más frecuentes oscilan entre 25 y 75°; cuanto mayor es el ángulo de posición menor es la fuerza axial, por lo que un ángulo de 90° puede ser la solución para el fresado frontal de piezas de estructura frágil con tendencia a vibraciones. Para el mecanizado pesado utilizar un ángulo de 45°, ya que el filo de corte es más robusto; también la fuerza de corte axial y radial son semejantes, lo cual puede ser favorable para fresadoras de gran tamaño, en las que los husillos tienen gran voladizo y, por tanto, la fuerza radial débil.

#### **2.4.2. Determinación del diámetro**

Los diámetros de fresas se seleccionaron de acuerdo con el tipo de mecanizado a realizar (periférico o frontal), geometría deseada y propiedades físico-mecánicas de la aleación a mecanizar, de ahí que para el maquinado de ranuras tipo cola de milano Baker (2006) estableció la relación matemática siguiente:

$$D_f = 0,8 a \quad (2.1)$$

Donde:

$D_F$  - diámetro de la fresa, mm

$a$  - anchura de la ranura a mecanizar, mm

### 2.4.3. Determinación del número de labios cortantes disponibles

La correcta determinación del número de aristas a ser utilizadas tiene influencia directa sobre el acabado de la superficie generada, la fuerza y la potencia de corte, la vida de la herramienta y el tiempo de corte, y, también, la potencia consumida en el proceso. Para condiciones de corte constantes, un aumento en el número de aristas de la herramienta resulta en mayor energía específica de remoción de material (Santos. A, 2001).

En relación a la vida de la herramienta, se afirmó que la reducción del número de aristas de corte aumenta la vida de la herramienta si los parámetros de corte ha sido mantenidos constantes (Richetti *et al*, 2004).

Según Moufki. A, (2004) el número de labios cortantes o aristas de corte está dada por:

$$Z = \frac{9,45 \cdot D_f}{B} \quad (2.2)$$

Donde:

$Z$  - número de aristas cortantes

$B$  - ancho de corte; mm

y de acuerdo con Arshinov. V, (1976) se determinó como:

$$B = 0,8 \cdot D_f \quad (2.3)$$

### 2.4.4. Selección del paso circular

Una fresa de paso grande está recomendada cuando se trabaja con pasadas profundas en piezas grandes. Los alojamientos de virutas deben ser mayores y el número de dientes en corte simultáneo tiene que ser menor para evitar las sobrecargas en la máquina. Las fresas de diámetro mayor o igual a 125 mm tienen paso grande y a su vez diferencial, calculado para alterar el ritmo de corte, evitando así vibraciones.

El paso normal se utiliza para el mecanizado en general, cuando la potencia de la máquina no limita el avance de la plaquita. También, para el fresado de superficies estrechas, en el cual es conveniente que haya más de un diente en corte.

Para el mecanizado de fundición con grandes avances y en piezas con sujeción débil con riesgo de vibración, se recomendó las fresas de paso reducido debido a que generan buenos acabados superficiales.

Las herramientas de paso fino son más ventajosas para el mecanizado de materiales frágiles. Las herramientas de paso ancho, resultan en un acabado superficial más grotesco y en un mayor esfuerzo por arista de corte (Weingaertner, 2006).

Según Moufki. A, (2004) el paso circular de la fresa se expresó como:

$$u = \frac{\pi \cdot D_f}{Z} \quad (2.4)$$

Donde:

u - paso circular, mm

#### **2.4.5. Altura de los labios cortantes**

Este es uno de los parámetros geométricos que debe ser controlado porque de él depende el flujo de virutas arrancado por diente, así como su rigidez durante el trabajo.

De acuerdo con Arshinov. V (1976) la altura de los labios cortantes está dada por:

$$h_t = (0,15 - 0,5)u \quad (2.5)$$

Donde:

$h_t$  - altura de los labios cortantes, mm

#### **2.4.6. Longitud del flanco de corte**

Según Arshinov. V (1976) la longitud de los flancos de corte se determinó como:

$$h_f = 1 - 1,2 \quad (2.6)$$

Donde:

$h_f$  - longitud de los flancos de corte, mm

#### **2.4.7. Radio de fondo del diente**

De acuerdo con Fernández (1987) para distribuir la fatiga y con ello atenuar los esfuerzos concentradores de tensión el radio se determinó como:

$$r = \frac{D_f}{(D_f - 2h_t)} \quad (2.7)$$

Donde:

$r$  - radio de fondo del diente, mm

#### **2.4.8. Frecuencia de rotación de la fresa**

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D_f} \quad (2.8)$$

Donde:

$n$  - frecuencia de rotación de la fresa,  $\text{min}^{-1}$

$v_c$  - velocidad de corte, m/s

De acuerdo con Ardatz (1998) la velocidad de corte establecida para las aleaciones fundidas de acero inoxidable austenítico según el tipo de mecanizado es:

$v_c = 5 \div 12$  m/min para el mecanizado de desbaste.

$v_c = 12 \div 18$  m/min para el mecanizado de acabado.

#### **2.4.9. Velocidad lineal de avance de la pieza**

El avance de mecanización o la velocidad lineal del centro de la herramienta se determinó como:

$$S = n \cdot Z \cdot f_z \quad (2.9)$$

Donde:

S - Velocidad lineal de avance de la pieza, mm/min

$f_z$  - avance de la mesa en mm/diente y se determinó a partir de la ecuación:

$$f_z = \frac{h_m \cdot D_f / 2}{\sqrt{D_f \cdot ap - ap^2}} \quad (2.10)$$

Según Westerman (1973) para fresas de vástago de perfil angular el avance es:

$f_z = 0,02 \div 0,08$  mm/diente para operaciones de desbaste

$f_z = 0,01 \div 0,02$  mm/diente para operaciones de acabado

Donde:

ap - profundidad de corte, mm

$h_m$  - espesor medio de viruta, mm

El espesor de la viruta se utilizará para calcular los valores de las fuerzas de corte, que dependerán de la geometría del proceso y de los parámetros del corte como la tensión dinámica de cizalladura, el ángulo de deslizamiento y el coeficiente de rozamiento (Boothroyd, 1989).

Según Rodríguez (2013) el espesor medio de viruta para el fresado frontal asimétrico en dependencia del movimiento de la pieza se determinó como:

$$h_m = \frac{\text{sen}(k_r) \cdot 360 \cdot B \cdot f_z}{\pi \cdot D_f \cdot \arcsen\left(\frac{B}{D_f}\right)} \quad (2.11)$$

Donde:

$k_r$  - ángulo de posición, grados

#### 2.4.10. Determinación del flujo de material arrancado

A través de este parámetro se mide el rendimiento de la herramienta de corte durante el proceso tecnológico de fresado, el cual ha sido determinado por Sandvik (2009) como:

$$Q = ap \cdot B \cdot n \cdot Z \cdot f_z \quad (2.12)$$

Donde:

Q- flujo de material arrancado, m<sup>3</sup>/s

#### 2.4.11. Determinación de la fuerza de corte

De acuerdo con Sekulic *et al.* (2010) en el fresado frontal, las fuerzas de corte ejercida por los dientes frente a la fresa en la pieza de trabajo son cambiantes en el tiempo y el espacio de la corte. De estas fuerzas, solamente la fuerza activa consume potencia, por estar en el plano de trabajo y ser formada por la suma vectorial de las fuerzas de corte y de avance, sin embargo otras acciones no relacionadas a esas fuerzas como el flameado en el cuadro de herramientas depende directamente de la fuerza pasiva, ejerciendo influencia en el desgaste y en la fuerza efectiva de corte.

Según Gómez *et al* (2004) la ecuación de la fuerza de corte ( $F_c$ ) para la fresa frontal se obtuvo por intermedio de la ecuación modificada de Kinzle y se expresó como:

$$F_c = k_s \cdot ap \cdot f_z \quad (2.13)$$

Donde:

$F_c$  - Fuerza de corte, N

$k_s$  - resistencia específica de corte del material a mecanizar, MPa

Budak *et al* (1996) plantea que debido al redondeo del radio del filo existirá una fuerza de recalado que aparecerá incluso cuando no se arranque viruta por el efecto tamaño. Esta fuerza será constante para cualquier espesor de viruta. Suponiendo un

filo vertical la fuerza sobre un diferencial de filo se puede expresar como suma de dos términos y su expresión está dada por:

$$dF_t = (K_{te} + K_{tc} \cdot t_c) \cdot d_z \quad (2.14)$$

$$dF_r = (K_{re} + K_{rc} \cdot t_c) \cdot d_z \quad (2.15)$$

Donde:

$K_{te}$ ,  $K_{tc}$ ,  $K_{re}$ ,  $K_{rc}$  - son constantes presentes en el proceso tecnológico de fresado y dependen del espesor de viruta.

#### 2.4.12. Determinación de la presión de corte

De acuerdo con Pérez. H. *et al* (2006) la presión de corte se expresó como:

$$K = k_s \cdot h_m^m \quad (2.16)$$

Donde:

$K$  – presión de corte, MPa

$m$  – exponente que depende del tipo de material a mecanizar

#### 2.4.13. Determinación de la potencia de corte

La potencia de corte es una variable que mide el consumo de energía para realizar trabajo y está en función de los parámetros de corte y de acuerdo con (Arshinov. V, 1976) se expresó como:

(2.17)

$$N_{cut} = 42,4 \times 10^{-5} \cdot ap \cdot f_z^{0,75} \cdot B^{1,1} \cdot n^{0,8} \cdot \frac{Z}{D_f^{0,3}}$$

Donde:

$N_{cut}$  - potencia de corte, kW

#### 2.4.14. Determinación de la potencia requerida por el motor eléctrico

Según Arshinov. V, (1976) la potencia requerida por el motor eléctrico para realizar el mecanizado se expresó como:



$$N_{cm} = \frac{1,15 N_{cut}}{\eta} \quad (2.18)$$

Donde:

$N_{cm}$  - potencia requerida por el motor eléctrico, kW

$\eta$  - eficiencia de la máquina herramienta, %

#### 2.4.15. Determinación del momento torsor

El momento torsional a que está sometida la herramienta de corte depende en gran medida de la resistencia específica del material a mecanizar y de los regímenes de corte establecidos, es por ello que Saranche (2007) estableció su expresión matemática como:

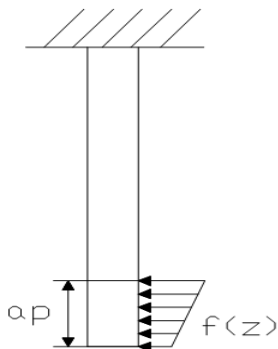
$$M_{tor} = \frac{k_s \cdot ap \cdot B \cdot D_f \cdot S}{2 \cdot v_c} \quad (2.19)$$

Donde:

$M_{tor}$  - momento torsional de la herramienta, N·m

#### 2.4.16. Análisis de las fuerzas que actúan sobre la fresa

Rodríguez. A (2013) considera que la herramienta de corte es una viga empotrada en el extremo superior la cual presenta una carga distribuida en el extremo inferior a una distancia igual a la profundidad de corte (ver figura 2.2).



**Figura 2.2.** Fuerzas distribuidas sobre la herramienta.

La fuerza situada en esa posición provocó un perfil de deformación lineal en la herramienta (Nash. W, 1998), del que el valor máximo corresponderá al extremo inferior. La siguiente expresión, tomada del análisis elástico de una viga en las condiciones indicadas en la figura 2.2, proporcionó la desviación máxima que tiene lugar en ella bajo la acción de una fuerza  $F_T$ :

$$d_{\max} = \frac{(L-a)^2 \cdot (2L+a)}{6 \cdot E \cdot I} \cdot F_T \quad (2.20)$$

Donde:

$d_{\max}$  - desviación máxima de la herramienta, mm

$L$  - longitud de la herramienta de corte, mm

$a$  - distancia del extremo de la viga al punto de aplicación de la fuerza, mm

$E$  - módulo de elasticidad del material de la herramienta, MPa

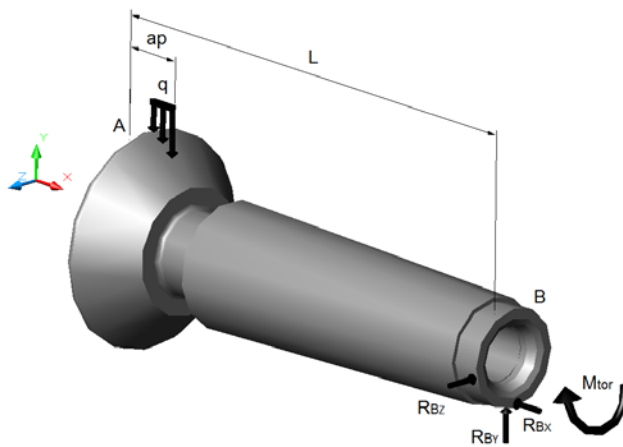
$I$  - momento de inercia del material de la herramienta, mm<sup>4</sup>

$F_t$  - Fuerza distribuida, MPa

Weingaertner (2006) sostuvo que durante el fresado cada diente de la herramienta está sujeto a una carga de impacto cuando entra en la región de corte. La magnitud de esta carga depende del material de la pieza, de la posición de la herramienta, de los parámetros de mecanizado y de la geometría de la herramienta. Las fuerzas en el fresado son cíclicas y fuertemente proporcionales a la espesura de corte en cada posición.

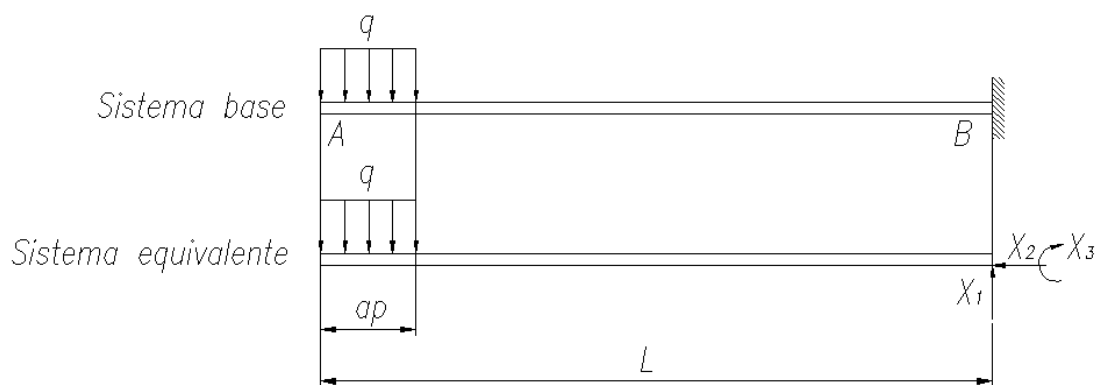
Sin embargo ninguno de los autores consultados ha realizado un modelo matemático, ni un análisis por elementos finitos (AEF) para determinar los esfuerzos generados por el corte en fresas angulares de vástago, así como no se ha estimado el coeficiente dinámico generado por el contacto entre la pieza y la fresa.

Partiendo del método de Vereshiaguin (Fernández. G, 1987) se analizan las fuerzas que actúan sobre la herramienta de corte a través del diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 2.3.



**Figura 2.3.** Diagrama de cuerpo libre de la fresa angular de vástago.

De acuerdo con la teoría de Morh se establece un sistema equivalente (ver figura 2.4) en el cual se determina la desviación estática.



**Figura 2.4.** Sistemas base y equivalente.

Planteando las ecuaciones de equilibrio, es decir, sumatoria de fuerzas en las direcciones X, Y e Z, y la sumatoria de momentos en los planos XOY y XOZ, se tiene:

Plano XOY

$$\sum F_Y = 0$$

$$-q + R_{By} = 0$$

$$R_{By} = q \quad (2.21)$$

$$\sum M_{AXOY} = 0$$

$$R_{BY} \cdot L - M_{tor} = 0$$

$$M_{tor} = R_{BY} \cdot L \quad (2.22)$$

$$\sum M_{BXOY} = 0$$

$$-\frac{q \cdot a p^2}{2} = 0$$

Plano XOZ

$$\sum F_z = 0$$

$$R_{BZ} = 0$$

$$\sum M_{AXOZ} = 0$$

$$R_{BZ} \cdot L = 0$$

La tensión máxima a que está sometida la fresa angular de vástago de acuerdo con Fernández, G (1987) se determinó como:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{f_{\max}}}{w_x} \leq [\sigma] \quad (2.23)$$

Donde:

$\sigma_{\max}$  – tensión máxima, MPa

$M_{f_{\max}}$  – momento flector máximo, Nm

$w_x$  – módulo de la sección transversal, mm<sup>3</sup>

$[\sigma]$  – tensión admisible a tracción, MPa

Considerando el proceso como un sistema hiperestático, para convertirlo en un sistema estáticamente determinado se aplica el método de Vereshiaguin para determinar las ecuaciones canónicas.

Ligaduras externas adicionales:  $LE = 3 - 3 = 0$

Ligaduras internas adicionales:  $LI = 2 - 3 = 1$

Grado de hiperastividad:  $GI = 1$

Sistema de ecuaciones canónicas:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \delta_{1q} = 0 \quad (2.24)$$

Como la reacción  $X_2$  es nula entonces la ecuación 2.23 quedaría:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{13}X_3 + \delta_{1q} = 0 \quad (2.25)$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI}(\text{Triángulo} * \text{Triángulo}) \quad (2.26)$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \left( \frac{X_1 l^3}{3} \right) \quad (2.27)$$

$$\delta_{13} = \frac{1}{EI}(\text{Triángulo} * \text{Rectángulo}) \quad (2.28)$$

$$\delta_{13} = \frac{1}{EI} \left( \frac{hsl}{2} \right) \quad (2.29)$$

$$\delta_{13} = \frac{1}{EI} \left( \frac{X_1 * l * X_3}{2} \right) \quad (2.30)$$

$$\delta_{1q} = \frac{1}{EI} (\text{Trapezio} * \text{Parábola cuadrática} + \text{Triángulo} * 0) \quad (2.31)$$

$$\delta_{1q} = \frac{1}{EI} \left( \frac{1}{12} hl(3S_1 + S_2) \right) \quad (2.32)$$

$$\delta_{1q} = \frac{1}{EI} \left( \frac{1}{12} \frac{q * ap^2}{2} * ap * (3X_1 * L + X_1 * (L - ap)) \right) \quad (2.33)$$

Por lo que la desviación estática se expresa como:

$$\delta_{est} = \delta_{11} + \delta_{1q} \quad (2.34)$$

Donde:

$\delta_{est}$  - desviación estática, mm

De acuerdo con Fernández. G, (1987) el coeficiente dinámico, desplazamiento dinámico, el momento dinámico y la tensión dinámica de impacto se determinan en las ecuaciones (2.35), (2.36), (2.37) y (2.38) como:

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{g \cdot \delta_{est}}} \quad (2.35)$$

Donde:

$v$  - velocidad de impacto, m/s

Donde:

$g$  - aceleración de la fuerza de gravedad, m/s<sup>2</sup>

$$\delta_d = \delta_{est} \cdot k_d \quad (2.36)$$

Donde:

$\delta_d$  – desplazamiento dinámico, mm

$$M_d = F_T \cdot k_d \quad (2.37)$$

Donde:

$M_d$  - momento dinámico, Nm

$$\sigma_d = \frac{M_d}{W_x} \quad (2.38)$$

Donde:

$\sigma_d$  - tensión dinámica de impacto, MPa

Aplicando el código ASME de acuerdo con Spotts (2003) se tiene que el diámetro mínimo de la sección de la garganta está dado por:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16}{\pi \cdot S_{s_{\max}}} \sqrt{(C_m \cdot M_f)^2 + (C_t \cdot M_{tor})^2}} \quad (2.39)$$

Donde:

$d$  - diámetro mínimo de la garganta, mm

$C_m$  - coeficiente numérico combinado para impacto y fatiga (se toma 1,5 para cargas aplicadas bruscamente y pequeños impactos)

$M_f$  - momento flector, Nm

$C_t$  - coeficiente aplicado al momento torsor (se toma la unidad)

$M_{tor}$  - momento torsor, Nm

$S_{s_{\max}}$  - esfuerzo cortante de trabajo máximo, MPa

Aplicando la teoría de rotura por cortadura máxima, y teniendo en cuenta la concentración de esfuerzos en las aristas cortantes, se considera el 75 % del esfuerzo cortante de trabajo máximo el cual según Spotts (2003) se determinó como:

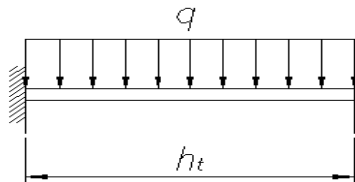
$$s_{s_{\max}} = 0,75 \cdot 0,5 \cdot S_y \quad (2.40)$$

Donde:

$S_y$  - límite de fluencia del material de la fresa, MPa

#### 2.4.16.1. Análisis de las fuerzas que actúan sobre las aristas cortantes

Considerando los labios o aristas cortantes como una viga empotrada en uno de sus extremos y el otro en voladizo con una carga distribuida en toda la luz como se muestra en la figura 2.5, entonces se pudo determinar los esfuerzos a que está sometido cada uno de ellos.



**Figura 2.5.** Diagrama de carga.

Partiendo del diagrama de la figura 2.5, el momento flector a que está sometida la arista cortante se determinó a través de la ecuación matemática:

$$M_f = \frac{q \cdot h_t^2}{8} \quad (2.41)$$

Donde:

$M_f$  - momento flector, Nm

$q$  - carga distribuida, N/m

La tensión máxima que se genera bajo la acción de la carga se determinó como:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_f}{W_x} \leq [\sigma]_t \quad (2.42)$$

Donde:

$\sigma_{\max}$  - tensión máxima, MPa

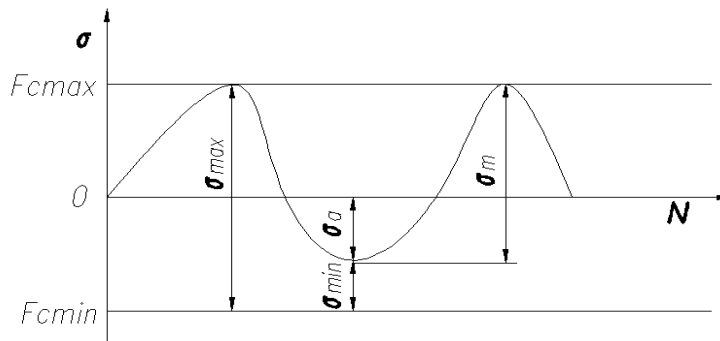


$w_x$  - módulo de la sección transversal, mm<sup>3</sup>

$[\sigma]_t$  - tensión admisible a tracción, MPa

#### 2.4.16.1.1. Análisis a fatiga

Basado en que la fatiga está dada bajo la acción de cargas cíclicas reiteradas en el tiempo, y conociendo que para cada profundidad de corte, la fuerza necesaria para arrancar el material varía, entonces los esfuerzos tensionales a que está sometido cada labio cortante se representa a través de la figura 2.6.



**Figura 2.6.** Gráfico de tensiones.

Para la fuerza de corte mínima y máxima, las tensiones en MPa se expresan según las ecuaciones (2.43) y (2.44):

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{c\max} \cdot h_t}{w_x} \quad (2.43)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{F_{c\min} \cdot h_t}{w_x} \quad (2.44)$$

Las tensiones media y amplitud se calculan en las ecuaciones (2.45) y (2.46):

$$\sigma_m = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.45)$$

Donde:

$\sigma_m$  – tensión media, MPa

$$\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_m \quad (2.46)$$

Donde:

$\sigma_a$  – tensión amplitud, MPa

La razón de asimetría se determina como:

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.47)$$

La razón de asimetría que determina la zona de trabajo se expresa como:

$$r_s = 1 - \frac{\sigma_{-1}(\sigma_r - \sigma_f)}{\sigma_f(\sigma_r - \sigma_{-1})} \quad (2.48)$$

Donde:

$\sigma_r$  – tensión límite de rotura, MPa

$\sigma_f$  – tensión límite de fluencia, MPa

$\sigma_{-1}$  – tensión límite de fatiga, MPa

La cual para el ciclo asimétrico y bajo sollicitación de flexión se determina como:

$$\sigma_{-1} = 0,6 \sigma_r \quad (2.49)$$

De acuerdo con el diagrama de High (Fernández, 1987), el factor de seguridad para el ciclo simétrico se determinó a través de la expresión matemática siguiente:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \varphi_\sigma \cdot \sigma_m} \quad (2.50)$$

Donde:

$\varphi_\sigma$  – factor de sensibilidad

#### **2.4.17. Análisis por el método de los elementos finitos (MEF)**

La simulación se realizó con el empleo del método de elementos finitos. El MEF permitió pronosticar la resistencia mecánica en función del material y de la geometría de la fresa angular de vástago en las condiciones investigadas.

#### 2.4.17.1. Variables para el proceso de simulación

Las variables de diseño son los factores que pueden ser ajustados para controlar la calidad material de la herramienta de corte. Para obtener los mejores resultados en el proceso, es necesario conocer el efecto de cada variable sobre las diversas características o propiedades del proceso de mecanizado. Ciertas variables que pueden ser continuamente reguladas o fácilmente medidas constituyen controles mejores de aquéllas que no pueden ser medidas o sólo pueden ser modificadas indirectamente. En la tabla 2.3 aparecen las variables a considerar en el proceso de simulación.

**Tabla 2.3.** Parámetros para la simulación.

| Parámetros                          | Magnitud |
|-------------------------------------|----------|
| Carga distribuida, $q$ (N/m)        | 521,2    |
| Momento torsor, $M_{tor}$ (Nm)      | 145,9    |
| Temperatura de mecanizado, $T$ (°C) | 600      |
| Coeficiente de fricción, $\mu$      | 0,5      |

- Las propiedades que se utilizarán para el modelo de elementos finitos se clasificaron en dos grupos:
- Propiedades térmicas: conductividad, calor específico, calor latente, coeficiente de dilatación.
- Propiedades mecánicas: límite elástico, carga de rotura, módulo de elasticidad, alargamiento, densidad, coeficiente de Poisson.

Para comprobar la idoneidad del método y los modelos propuestos se desarrolló el tratamiento estadístico de los resultados simulados y los experimentales, se realizaron con la utilización del tabulador Microsoft Excel 2003 y el paquete Cosmos Design 7.0.

#### 2.4.18. Sistema de sujeción

Existen disímiles diseños de sistemas de sujeción que garantizan el correcto funcionamiento del conjunto mecánico (árbol-fresa). De acuerdo con el diseño de la máquina herramienta fresadora, la misma posee un mandril porta fresas con alojamiento morse, una conicidad de  $\gamma = 1^{\circ}30'47''$  y un árbol roscado en el extremo para la conexión de la fresa angular de vástago.

Según Norton, R. (1999) la longitud de rosca mínima en orificios para aceros de diferentes naturalezas está dada por:

$$L_{r\min} = 1,5 \cdot d_n \quad (2.51)$$

Donde:

$L_{r\min}$  -longitud mínima de rosca, mm

$d_n$  -diámetro nominal de rosca, mm

#### 2.4.19. Selección del tratamiento térmico

Los aceros diseñados para la fabricación de Herramientas de Corte de acuerdo a su naturaleza y a las condiciones de trabajo a que estarán sometidas, estos requieren o exigen de un tratamiento térmico de temple con un enfriamiento de acuerdo al tipo de aleación puede ser agua, aceite, y sales. En nuestro caso la herramienta de corte será diseñada de acero rápido el cual exige ser templada completamente a 50 °C por encima de la temperatura crítica de calentamiento en baños de sales de NaCl y BaCl, y posteriormente para eliminar las tensiones de primer y segundo género, así como fijar la dureza necesaria se aplica tres veces un Revenido con enfriamiento en aire no forzado. Se eligió este tratamiento térmico de acuerdo a la composición del material, su forma y propiedades, también es el recomendado de acuerdo a las bibliografías consultadas.

Hale y Rick, (2000) plantean que las herramientas de corte fabricadas de acero P6M5 requieren de una dureza HRC de 58 a 62 unidades las cuales le confieren considerable resistencia al desgaste y estabilidad al rojo o mantenimiento de las

propiedades del acero a elevadas temperaturas de corte sin perder filo sus aristas cortantes bajo la acción de fuerzas de corte moderadas.

#### **2.4.19.1. Pasos tecnológicos para el tratamiento térmico**

Basado en el criterio de Schaeffer *et al*, (2000) de que las piezas en estado frío son poco plásticas, con baja conductividad térmica y no son capaces de adaptarse por deformación plástica al campo de tensiones de origen térmico, y teniendo en cuenta el principio de Craig. R (2007) el cual expresa que durante el calentamiento surgen tensiones de primer género, tensiones térmicas, tensiones zonales las cuales originan deformaciones en el retículo cristalino y pueden formar microfisuraciones y con ello la falla, es por ello que el calentamiento debe ser lento y homogéneo.

#### **2.4.19.2. Cálculo de los tiempos de calentamiento y permanencia**

De acuerdo con Astigarraga. J, (1998) el tiempo que demora una pieza en alcanzar la temperatura deseada se determinó a través de la expresión matemática siguiente:

$$t = \frac{1}{4k_1^{1/4} \cdot k_2^{3/4}} \left[ \ln \left( 1 + \frac{T_C}{T_p} \right) - \ln \left( 1 - \frac{T_C}{T_p} \right) + \frac{2\pi}{180} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{T_C}{T_p} \right) \right] \quad (2.52)$$

Dónde:

$t$  – tiempo de calentamiento, h

$T_C$  – temperatura de calentamiento de la pieza, °C

$T_p$  – temperatura de la pared del horno, °C

$T_o$  – temperatura inicial de la pieza, °C

$T_f$  – temperatura final de la pieza, °C

$k_1$  y  $k_2$  – conductividad térmica, las cuales se determinan como:

$$k_1 = \frac{\sigma \cdot A_p \cdot F_{p-c}}{m_c \cdot C_{pc}} \quad (2.53)$$

$$k_2 = \frac{\sigma \cdot A_p \cdot F_{p-c} \cdot T_p^4}{m_c \cdot C_{pc}} \quad (2.54)$$

Donde:

$\sigma$  – constante universal ( $4,965 \times 10^{-8}$  kcal/h\*m<sup>2</sup>\*K)

$A_p$  – área de pared cubierta con elementos de resistencia, m<sup>2</sup>

$\varepsilon_p$  – emisividad de la pared (0,9)

$\varepsilon_c$  – emisividad de la pieza

$C_{pc}$  – calor específico de la pieza, kcal/kg\*°C

$m_c$  – masa de la pieza, kg

$F_{p-c}$  - factor de forma pared-pieza determinado por Manrique. J, (1980) como:

$$F_{p-c} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_c} \cdot \frac{A_p}{A_c} + \frac{1}{\varepsilon_p^{-1}}} \quad (2.55)$$

Dónde:

$A_c$  – área de la pieza, m<sup>2</sup>

Caballero. N, (1990) planteó que el tiempo de permanencia se determina en función de la naturaleza de la aleación y las dimensiones espaciales de la pieza, para los aceros herramentales la permanencia es de un minuto por cada milímetro de espesor para el temple y de dos a tres minutos para el revenido, el cual no debe ser menor de una hora.

De acuerdo con Caballero. N, (1990) la expresión matemática que determinó el tiempo de permanencia para el proceso de temple es:

$$t_T = l_c + l_g + d_v + e_{po} \quad (2.56)$$

Donde:

$t_T$  -tiempo de permanencia para el temple, h

$l_c$  .longitud del cono, mm

$l_g$  -longitud de la garganta, mm

$d_v$  -diámetro del vástago, mm

$e_{po}$  -espesor de pared del orificio roscado, mm

Según Caballero. N, (1990) la ecuación con que se determinó el tiempo de permanencia para el proceso de revenido es:

$$t_R = 1,1 \cdot t_T \quad (2.57)$$

Donde:

$t_r$  -tiempo de permanencia para el revenido, h

## **2.5. Conclusiones del capítulo 2**

- Los procedimientos descritos permiten establecer el comportamiento de las variables de diseño que intervienen directamente en el proceso tecnológico de fresado.
- Las ecuaciones desarrolladas permiten establecer el procedimiento metodológico de diseño de fresas angulares de vástago de la aleación P6M5 en función de las sollicitaciones y estados tensionales a que estará sometida.
- El empleo de herramientas computacionales como los elementos finitos presentan ventajas, por un lado en la celeridad en su aplicación, y por otro en que permite, muy fácilmente, introducir modificaciones en el modelo, así como el comportamiento de las variables de diseño durante el proceso de fresado.

# **CAPÍTULO 3**

## **Análisis de los resultados**



## CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados

### 3.1. Introducción

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos a partir de los métodos empleados para la solución del problema planteado en el capítulo anterior, del mismo modo se establece un conjunto de criterios que sustentan las teorías que garantizan la veracidad de la hipótesis planteada como resultado del análisis. Se realiza además un análisis mediante el método de elementos finitos para la verificación de los parámetros de resistencia de la fresa angular de vástago, y una valoración económica relacionada con el ahorro de este diseño, así como el impacto medioambiental que se relaciona con el trabajo.

**El objetivo del capítulo es** realizar una valoración crítica de los resultados y a través de ella, exponer los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

### 3.2. Composición química del material estudiado

El promedio de las mediciones de composición se muestra en la tabla 3.1. Como se observa la composición química del material está dentro del rango establecido para la aleación, la que se corresponde con el acero rápido P6M5, de acuerdo con las especificaciones de GOST 17 270.

**Tabla 3.1.** Comparación de la composición química entre las probetas y los estándares de P6M5

| Material | C     | Cr   | W    | V     | Mo   | Fe      |
|----------|-------|------|------|-------|------|---------|
| Probeta  | 0,848 | 4,08 | 6,22 | 1,789 | 5,19 | 81,873  |
| P6M5     | 0,85  | 4,15 | 6,2  | 1,8   | 5,2  | Balance |

### 3.3. Resultados de la metodología de cálculo

Para la selección de los ángulos de las aristas de corte en la fresa de vástago diseñada se tuvo en cuenta según los parámetros mencionados en el capítulo anterior, también según las características y configuración de la pieza a mecanizar

(ranura tipo cola de milano). El ángulo de desprendimiento radial se seleccionó de ( $\alpha=6^\circ$ ) ya que con este ángulo se logra una mayor vida útil a los labios cortantes de la fresa y mayor resistencia al filo de corte, así como aumenta la fuerza de corte. Para el ángulo de incidencia se determinó de ( $\beta=8^\circ$ ) para lograr el espacio ideal entre la herramienta y la pieza. En el ángulo de posición ( $\delta=30^\circ$ ) se determinó de este valor para que logre una mayor productividad, es decir, para que evacúe más fácil las virutas.

El diámetro de la fresa se determinó por la ecuación 2.1 teniendo en cuenta una anchura de la ranura tipo cola de milano  $a= 105$  mm el mismo se estandarizó y resultó ser:  $D_f= 80$  mm.

En la ecuación 2.2 para determinar el número de labios cortantes se calcula primeramente el ancho de corte por la ecuación 2,3 donde es la multiplicación de la constante 0,8 por el diámetro de la fresa obtenida inicialmente y dando como resultado  $B= 64$  mm, así se puede calcular el número de labios obteniendo como resultado un valor de 12 dientes que es lo que necesita la fresa para lograr un efectivo acabado superficial y tolerancias de forma y posición en la superficie a mecanizar.

Para el cálculo del paso circular de la fresa mediante la ecuación 2,4 donde se tuvo en cuenta el diámetro de la fresa y el número de dientes anteriormente calculados y este da como resultado  $u= 20, 94$  mm lo que muestra que tiene un paso reducido que es ideal para evacuar el flujo de material arrancando por unidad de tiempo, así como garantizar una buena disipación del calor generando durante el proceso tecnológico de mecanizado, además es óptimo en la productividad en condiciones estables, así como para materiales de virutas cortas y termo resistentes (Weingaertner, 2006).

En la ecuación 2,5 se determinó la altura de los labios cortantes, para ello se eligió como valor promedio 0,325, el paso circular  $u= 20, 94$  mm, donde esta resultó ser:  $h_t= 6,81$  mm.

La longitud del flanco determinada por la ecuación 2.6 se tomó  $h_f = 1,2$  mm debido a que con el máximo valor de longitud de flanco se incrementa el tiempo de vida útil de la herramienta de corte (Arshinov. V, 1976).

El radio de fondo del diente determinado por la ecuación 2.7, tiene en cuenta el diámetro de la fresa,  $D_f = 80$  mm y la altura del diente,  $h_t = 6,81$  mm para un valor de  $r = 1,2$  mm.

La frecuencia de rotación de la fresa angular de vástago se determinó por la ecuación 2,8, la cual tuvo en cuenta los parámetros velocidad de corte,  $v_c = 0,25$  m/s y diámetro de la fresa,  $D_f = 80$  mm, para un valor estandarizado de  $n = 63 \text{ min}^{-1}$ .

La ecuación 2,9 nos muestra el cálculo del avance lineal de la pieza donde se encuentra relacionado el avance de la mesa que se calcula en la ecuación 2,10 y nos da como resultado  $f_z = 0,08$  mm/diente resultado determinado en operaciones de desbaste, con este resultado ya es posible el cálculo en la ecuación 2,9 donde el avance lineal es:  $S = 60,48$  mm/diente.

Para el espesor medio de viruta expresado en la ecuación 2,11 el ángulo de posición es de  $45^\circ$  y despejando todos los valores en las ecuaciones calculados anteriormente da como resultado  $h_m = 0,098$  mm.

El flujo de material arrancado determinado en la ecuación 2,12 tiene en cuenta los parámetros: profundidad de corte,  $a_p = 5$  mm, ancho de corte,  $B = 64$  mm, frecuencia de rotación,  $n = 63 \text{ min}^{-1}$ , número de dientes o aristas cortantes,  $Z = 12$ , avance de la mesa,  $f_z = 0,08$  mm/diente, el cual tiene un valor  $Q = 3,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , el mismo expresa que la herramienta de corte tiene una buena productividad (Sandvik, 2009).

La fuerza de corte necesaria para el mecanizado se determinó por la ecuación 2.13, la cual tiene en cuenta la resistencia específica de corte del material a mecanizar, la cual de acuerdo con Gómez *et al* (2004) para aceros inoxidables austeníticos fundidos,  $k_s = 2\,827$  MPa, la profundidad de corte,  $a_p = 5$  mm y el avance de la mesa,  $f_z = 0,08$  mm/diente, y su valor es  $F_c = 1\,130,8$  N.

La presión de corte ejercida durante el mecanizado se determinó por la ecuación 2.16 y ésta considera la resistencia específica de corte del material a mecanizar,  $k_s = 2\,827$  MPa, el espesor medio de viruta,  $h_m = 0,098$  mm y el exponente de mecanizado,  $m = 0,98$  de acuerdo con Pérez. H. *et al* (2006) para aceros inoxidables austeníticos fundidos, cuyo valor es  $K = 290,22$  MPa.

La potencia de corte para realizar el mecanizado se determinó por la ecuación 2.17, la misma tiene en cuenta los parámetros: profundidad de corte,  $a_p = 5$  mm, avance de la mesa,  $f_z = 0,08$  mm/diente, ancho de corte,  $B = 64$  mm, frecuencia de rotación,  $n = 63\text{ min}^{-1}$ , número de labios cortantes,  $Z = 12$ , diámetro de la fresa,  $D_f = 80$  mm para un valor de  $N_{cut} = 2,74$  kW.

La potencia requerida por el motor eléctrico para realizar el mecanizado se determinó por la ecuación 2.18, la cual considera la potencia de corte,  $N_{cut} = 2,74$  kW y la eficiencia de la máquina,  $\eta = 0,75$  por mediciones técnicas realizadas, y la misma resultó ser:  $N_{cm} = 4,2$  kW.

El momento torsional a que está sometida la herramienta de corte se determinó por la ecuación 2.19, en la misma se evalúan: la resistencia específica de corte del material a mecanizar,  $k_s = 2\,827$  MPa, la profundidad de corte,  $a_p = 5$  mm, el ancho de corte,  $B = 64$  mm, el diámetro de la fresa,  $D_f = 80$  mm, el avance lineal de la pieza,  $S = 60,48$  mm/diente y la velocidad de corte,  $v_c = 0,25$  m/s, este tiene por valor  $M_{tor} = 145,9$  Nm.

### **3.4. Análisis de las fuerzas que actúan sobre la fresa**

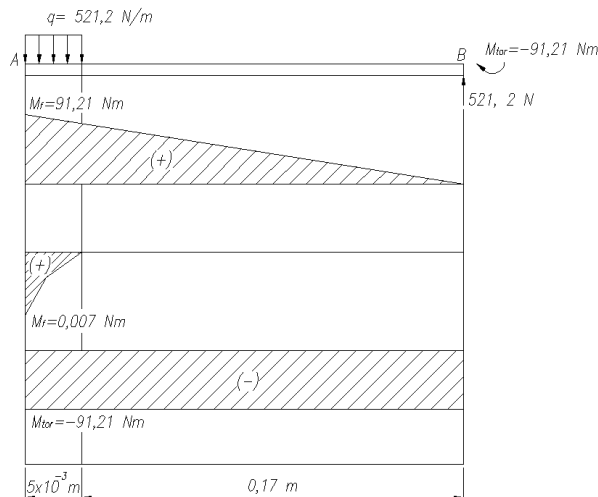
A través del diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 2.3. del capítulo 2 se plantea la teoría de Morh la cual establece un sistema equivalente mostrado en la figura 2.4, en el mismo se considera que en el extremo izquierdo habrá una carga distribuida formada por la masa del conjunto mesa de la máquina herramienta, brazo (pieza a mecanizar) y elementos de sujeción mecánica que intervienen en la basificación a una distancia denominada profundidad de corte, y en el extremo derecho un empotramiento el cual tiene en cuenta un momento torsional y dos

reacciones, aplicando la sumatoria de fuerzas en el plano XOY, el valor de la reacción RBy determinada por la ecuación 2.21 resulta ser RBy= 521,2 N.

Con la sumatoria de momentos en el extremo A para el plano XOY se determinó a través de la ecuación 2.22 el momento torsional provocado por la reacción RBy= 521,2 N y la longitud de la fresa, L= 0,175 m, cuyo valor es Mtor= - 91,21 Nm.

En el plano XOZ la reacción RBz no provoca la acción de un momento flector por lo que éste es nulo ni existen fuerzas que establezcan un equilibrio estático-dinámico del sistema.

En la figura 3.1 se plasman los resultados obtenidos a través del modelo matemático.



**Figura 3.1.** Gráfico de momentos

En la ecuación 2.23 se determinó la tensión máxima a que está sometida la fresa en condiciones estáticas, la cual considera el momento flector máximo mostrado en la figura 3.1 de Mfmax= 91,21 Nm y el módulo de la sección transversal de la fresa,  $w_x = 51\,200\text{ mm}^3$ , y su magnitud es  $\sigma_{\max} = 1,78\text{ MPa}$ . El resultado arrojado muestra que la resistencia mecánica de la fresa angular bajo condiciones estáticas está asegurada.

Considerando el proceso como un sistema hiperestático, se aplicó el método de Vereshiaguin para determinar la desviación estática causada por la carga durante el

mecanizado a través de las ecuaciones 2.24, 2.27 y 2.33 las cuales consideran el módulo de Young de la aleación P6M5,  $E = 2,5 \times 10^5$  MPa, momento de inercia de la geometría de la fresa el cual se determinó a través del software Autodesk Mechanical Desktop 2006,  $I = 3\,570\,645\,266\text{ mm}^4$ , donde la desviación estática resultó ser  $\delta_{\text{est}} = 4,3 \times 10^{-6}$  mm. Este resultado expresa la no existencia de la deflexión paralela debido al equilibrio que existe entre la carga distribuida  $q$  y la reacción  $R_{By}$  que se opone al desplazamiento que pudiera provocar la carga  $q$ .

Considerando que durante el mecanizado se produce un impacto de carácter horizontal entre la pieza a mecanizar y la herramienta de corte, donde surge un coeficiente dinámico (Boothroyd, 1989) el cual se determinó a través de la ecuación 2.35, la cual tiene en cuenta la velocidad de impacto la cual se estima igual a la velocidad de avance lineal de la pieza,  $v = 3,63$  m/s, la aceleración de la gravedad,  $g = 9,8\text{ m/s}^2$  y la desviación estática que se calculó en la ecuación 2.34, con valor  $\delta_{\text{est}} = 4,3 \times 10^{-6}$  mm y tiene por valor  $k_d = 17\,684$ , resultado que suele ser elevado debido a que la fresa angular de vástago no experimenta una deflexión paralela durante el impacto producto de la existencia de la reacción  $R_{By}$  de igual magnitud pero sentido contrario al de la carga  $q$  que se distribuye axialmente a una distancia igual a la profundidad de corte.

El desplazamiento dinámico se determinó por la ecuación 2.36 la cual considera los parámetros desviación estática,  $\delta_{\text{est}} = 4,3 \times 10^{-6}$  mm y el coeficiente dinámico,  $k_d = 17\,684$  para el cual resultó  $\delta_d = 7,6 \times 10^{-5}$  mm por lo que podemos apreciar que la fresa angular de vástago experimenta una desviación insignificante bajo la acción de la carga distribuida  $q$ .

El momento dinámico se determinó en la ecuación 2.37, el cual considera la carga distribuida,  $q = 521,2$  N/m y el coeficiente dinámico,  $k_d = 17\,684$  y su valor es  $M_d = 9\,216,901$  Nm.

La tensión dinámica se determinó en la ecuación 2.38 tiene en cuenta, el momento dinámico,  $M_d = 9\,216,901$  Nm y el módulo de la sección transversal de la fresa el cual

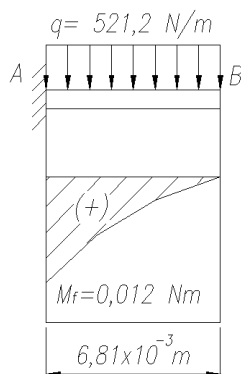
se determinó a través del software Autodesk Mechanical Desktop (2006),  $w_x = 51\,200\text{ mm}^3$  y su valor es  $\sigma_d = 180\text{ MPa}$ . Este resultado indica que la resistencia mecánica de la fresa angular de vástago bajo condiciones dinámicas está asegurada con un factor de seguridad  $N = 2,17$ .

El diámetro mínimo de la sección de la garganta determinado en la ecuación 2.39 estima los parámetros: esfuerzo cortante de trabajo máximo el cual se determinó en la ecuación 2.40, éste considera el 75 % del esfuerzo cortante de trabajo máximo según Spotts (2003) y el límite de fluencia,  $S_y = 100\text{ MPa}$ , para  $s_{s_{\max}} = 37,5\text{ MPa}$ , coeficiente numérico combinado de impacto y fatiga que para cargas aplicadas bruscamente y pequeños impactos,  $C_m = 1,5$ , momento flector,  $M_f = 91,21\text{ Nm}$ , coeficiente aplicado al momento torsor,  $C_t = 1$ , momento torsor,  $M_{\text{tor}} = 145,9\text{ Nm}$  por lo que el diámetro mínimo de garganta es  $d = 12\text{ mm}$ .

### 3.5. Análisis de las fuerzas que actúan sobre las aristas cortantes

Considerando los labios o aristas cortantes como una viga empotrada en uno de sus extremos y el otro en voladizo con una carga distribuida en toda la luz como se muestra en la figura 2.5 del capítulo 2.

El momento flector a que está sometida la arista cortante se determinó a través de la ecuación 2.41, la cual considera la carga distribuida,  $q = 521,2\text{ N/m}$  y la altura del diente,  $h_t = 6,81\text{ mm}$  ( $6 \times 10^{-3}\text{ m}$ ) y tiene por valor  $M_f = 0,012\text{ Nm}$ , el cual obedece a una ley parabólica (Fernández. G, 1987) como se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2.** Gráfico de momentos

La tensión máxima que se genera bajo la acción de la carga se determinó en la ecuación 2.42, la misma tiene en cuenta el momento flector máximo que se genera durante el mecanizado,  $M_f = 0,012 \text{ Nm}$  y el módulo de la sección transversal de la arista cortante determinado a través del software Autodesk Mechanical Desktop (2006) como  $w_x = 154 \text{ mm}^3$  y resultó ser:  $\sigma_{\max} = 7,79 \text{ MPa}$  mucho menor a la tensión admisible a tracción del material seleccionado,  $(\sigma)_t = 3\,600 \text{ MPa}$ , valor que satisface las variables de diseño seleccionadas en función de las solicitaciones y estados tensionales a que está sometida la fresa angular de vástago durante el proceso tecnológico de mecanizado.

### 3.6. Análisis a fatiga

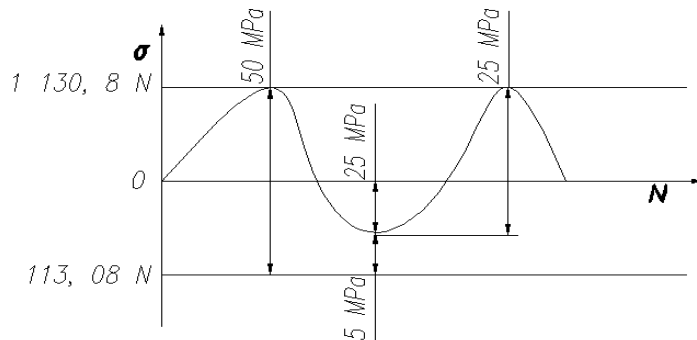
Las tensiones mínima y máxima fueron determinadas en las ecuaciones 2.43 y 2.44, las cuales tienen en cuenta las fuerzas de corte, que para la mínima profundidad de corte,  $a_p = 0,5 \text{ mm}$  se obtiene la mínima fuerza de corte,  $F_{c\min} = 113,08 \text{ N}$ , y para la máxima profundidad de corte,  $a_p = 5 \text{ mm}$ , se obtiene la máxima fuerza de corte,  $F_{c\max} = 1\,130,8 \text{ N}$ , por lo que los valores de las tensiones mínima y máxima resultaron ser:  $\sigma_{\min} = 5 \text{ MPa}$  y  $\sigma_{\max} = 50 \text{ MPa}$ .

La tensión media se determinó en la ecuación 2.45, la cual tiene en cuenta la variación existente entre la máxima y mínima tensión que se originan producto de la profundidad de corte seleccionada, para lo cual su valor numérico es  $\sigma_m = 25 \text{ MPa}$ .

La tensión amplitud se determinó en la ecuación 2.46 y ésta considera la tensión máxima,  $\sigma_{\max} = 50 \text{ MPa}$  y la tensión media,  $\sigma_m = 25 \text{ MPa}$  y su resultado es  $\sigma_a = 25 \text{ MPa}$ .

El comportamiento de las tensiones anteriormente determinadas se muestra en la figura 3.3.





**Figura 3.3.** Ciclo a fatiga.

La razón de asimetría se determinó a través de la ecuación 2.47, la misma evalúa la tensión mínima,  $\sigma_{\min} = 5 \text{ MPa}$  y la tensión máxima,  $\sigma_{\max} = 50 \text{ MPa}$ , ésta resultó ser:  $r = 0,1$  lo cual expresa que se encuentra en la zona II del diagrama del límite de fatiga determinado por Fernández. G, (1987), en la cual hay resistencia a la fatiga pero no al límite de fluencia por ser un ciclo asimétrico.

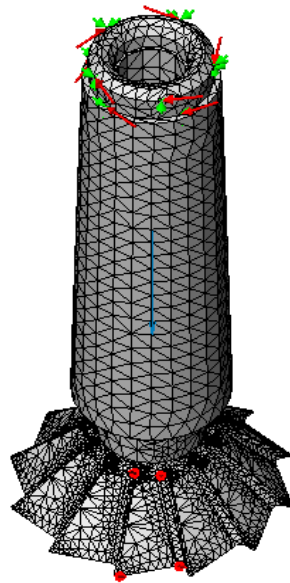
La razón de asimetría que determina la zona de trabajo se determinó en la ecuación 2.48, ésta considera los parámetros: la tensión límite de fatiga la cual se determinó en la ecuación 2.49 para un ciclo a simétrico expuesto a la sollicitación de flexión tiene un valor número igual a  $\sigma_{-1} = 216 \text{ MPa}$ , la tensión de rotura del material seleccionado para el diseño,  $\sigma_u = 3200 \text{ MPa}$  y tensión límite de fluencia,  $\sigma_y = 90 \text{ MPa}$ , el resultado arrojado por la expresión matemática resultó ser:  $r_s = -4,3$ . El significado físico del mismo revela que el sistema pertenece a un ciclo simétrico por ser menor a cero lo que coincide con la zona I del diagrama del límite de fatiga determinado por Fernández. G, (1987), en el cual se pone de manifiesto que hay resistencia a la fatiga y a la tensión límite de fluencia.

El factor de seguridad para el ciclo simétrico se determinó en la ecuación 2.50, en la misma se evalúan los parámetros: tensión límite de fatiga,  $\sigma_{-1} = 216 \text{ MPa}$ , la tensión amplitud,  $\sigma_a = 25 \text{ MPa}$  y el factor de sensibilidad del material,  $\phi_\sigma = 0,9$  de acuerdo con Fernández. G, (1987) para los cuales el factor de seguridad resultó ser:  $n_\sigma = 4,54$ , lo que significa que la resistencia mecánica de la fresa angular de vástago está

asegurada por lo que satisface las exigencias tecnológicas a que estará sometida y las condiciones de diseño impuestas.

### **3.7. Análisis de los resultados por el método de los elementos finitos (MEF)**

Para simular el comportamiento de la resistencia mecánica de la fresa angular de vástago el empleo de los elementos finitos se procedió a realizar el mallado del elemento, como se muestra en la figura 3.4. El estudio de la malla nos permitirá, por un lado su refinamiento y por el otro, mejorar la exactitud de la solución. Durante las simulaciones habrá que adoptar decisiones de compromiso entre los errores de los resultados y el consumo de tiempo memoria para la ejecución del código (Saavedra, 2000).



**Figura 3.4.** Mallado del elemento para la simulación.

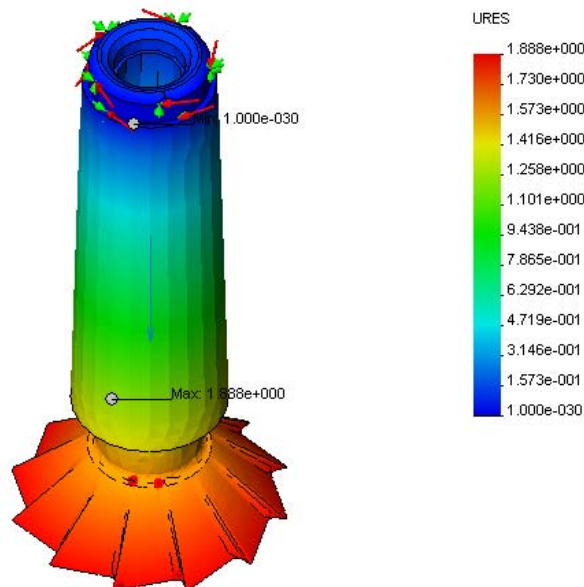
En total el modelo numérico consta de 89 777 nodos distribuidos por 18 290 elementos. El método de resolución empleado fue el del gradiente conjugado de Jacobi. Para demostrar esta afinidad se compararon la solución analítica y la numérica, por lo que se consideró en el experimento:

- La temperatura generada durante el proceso tecnológico de mecanizado (T= 600 °C).

- El material de la fresa angular de vástago con sus propiedades físico-mecánicas constantes ( $E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_f = 90 \text{ MPa}$ ).

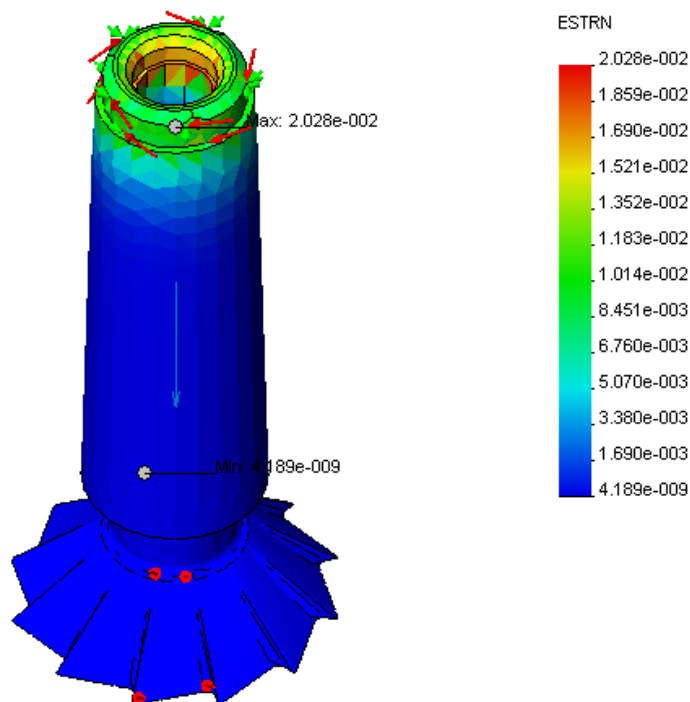
El análisis de los resultados (figura 3.4) nos permite verificar la relación ya conocida, que con el uso de una malla más densa se consigue disminuir el error de la solución numérica. Evidentemente este aumento en el número de elementos repercutirá tanto en el consumo de memoria, como en el de tiempo de ejecución del código, lo que fue reportado por Bhate, J. et al, (1984).

La respuesta de la simulación de los modelos, en el dominio de las tensiones, muestra que para los parámetros: paso reducido ( $u = 20,94 \text{ mm}$ ), ángulo de desprendimiento ( $\alpha = 6^\circ$ ), ángulo de incidencia ( $\beta = 8^\circ$ ), ángulo de posición ( $\beta = 30^\circ$ ), el desplazamiento máximo para un coeficiente severo de fricción,  $\mu = 0,5$ , bajo la acción de un momento torsor,  $M_{tor} = 145,9 \text{ Nm}$  y un momento flector dinámico,  $M_d = 9\,216,901 \text{ Nm}$  se localiza en la superficie exterior de los labios o aristas cortantes y toma como máximo valor  $1,88 \text{ mm}$  (figura 3.5).



**Figura 3.5.** Desplazamiento.

Las tensiones tangenciales máximas aparecen en forma de ángulo respecto a los ejes longitudinal y transversal de la fresa en la superficie roscada, la cual es parte componente del sistema de sujeción y su magnitud física toma el valor de  $\sigma = 200 \text{ MPa}$ , valor éste que es mucho menor al admisible. Además se observa que las aristas cortantes y cambios de secciones no sufren esfuerzos bajo la acción de la carga dinámica que se genera durante el proceso de mecanizado (figura 3.6).



**Figura 3.6.** Distribución espacial de tensiones.

### 3.8. Análisis del sistema de sujeción

De acuerdo con el diseño de la máquina herramienta fresadora, la misma posee un mandril porta fresas con alojamiento morse con una conicidad de  $\gamma = 1^{\circ}30'47''$  y un árbol roscado en el extremo para la conexión de la fresa angular de vástago.

De acuerdo con Norton, R. (1999) la longitud de rosca mínima del orificio del vástago se determinó en la ecuación 2.51 la cual evalúa el diámetro nominal de rosca de diseño,  $d_n = 20 \text{ mm}$  tomado en función de la sección transversal del vástago, para el cual resultó ser:  $L_{\text{min}} = 30 \text{ mm}$  y para el diseño se escogió  $L_{\text{min}} = 33 \text{ mm}$  por lo que la unión roscada es capaz de resistir los esfuerzos a que estará sometido sin

producir barrido de los filetes, ni fracturas en el diámetro de raíz de la superficie roscada.

### 3.9. Análisis de los resultados del tratamiento térmico

Basado en las propiedades físico-mecánicas de la aleación a mecanizar A351 grado HK-40 fundida, las dimensiones espaciales de la superficie a mecanizar, y de las sollicitaciones, y estados tensionales a que puede estar sometida la fresa durante el proceso tecnológico de mecanizado, se seleccionó la aleación P6M5 para el diseño debido a que la misma cumple con las exigencias tecnológicas de diseño.

De acuerdo con el criterio de Schaeffer *et al*, (2000) de que las piezas en estado frío son poco plásticas, con baja conductividad térmica y no son capaces de adaptarse por deformación plástica al campo de tensiones de origen térmico, y teniendo en cuenta el principio de Craig. R (2007) el cual expresa que durante el calentamiento surgen tensiones de primer género, tensiones térmicas, tensiones zonales las cuales originan deformaciones en el retículo cristalino y pueden formar microfisuraciones y con ello la falla, es por ello que el calentamiento debe ser lento y homogéneo.

De acuerdo con Astigarraga. J, (1998) el tiempo de calentamiento se determinó por la ecuación 2.52 la cual tiene en cuenta los parámetros: temperatura de calentamiento de la fresa en cada etapa del proceso tecnológico descritas como: para el primer calentamiento,  $T_c = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para el segundo calentamiento,  $T_c = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para el austenizado completo,  $T_c = 1\ 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para el revenido triple,  $T_c = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la temperatura de la pared del horno, la cual se comporta como: durante el primer calentamiento,  $T_p = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para el segundo calentamiento,  $T_p = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para el austenizado completo,  $T_p = 1\ 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la temperatura inicial de la fresa, ésta se registra en los valores de: para el primer calentamiento,  $T_o = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para el segundo calentamiento,  $T_o = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para el austenizado completo,  $T_o = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , temperatura final de la fresa fraccionada en: para el primer calentamiento,  $T_f = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para el segundo calentamiento,  $T_f = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para el austenizado completo,  $T_f = 1\ 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la conductividad térmica, la cual se determinó en la ecuación 2.52 y la misma considera: la constante universal  $\sigma = 4,965 \times 10^{-8}\text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$ , área de pared cubierta

con elementos de resistencia,  $A_p = 0,75 \text{ m}^2$ , masa de la fresa,  $m_c = 1,88 \text{ kg}$ , la cual se determinó con la ayuda del software Aodesk Mechanical Desktop (2006), el calor específico de la fresa,  $C_{pc} = 0,105 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ , el factor de forma pared-fresa, éste se determinó en la ecuación 2.55 y en él se evaluaron las variables: emisividad de la pared del horno,  $\varepsilon_p = 0,9$ , emisividad del material de la fresa,  $\varepsilon_c = 1$  y área de la fresa,  $A_c = 0,01 \text{ m}^2$  la cual se calculó con el software Aodesk Mechanical Desktop (2006) y todo ello permitió determinar que el tiempo de calentamiento total necesario que exige el ciclo térmico es  $T_c = 3,27 \text{ h}$ .

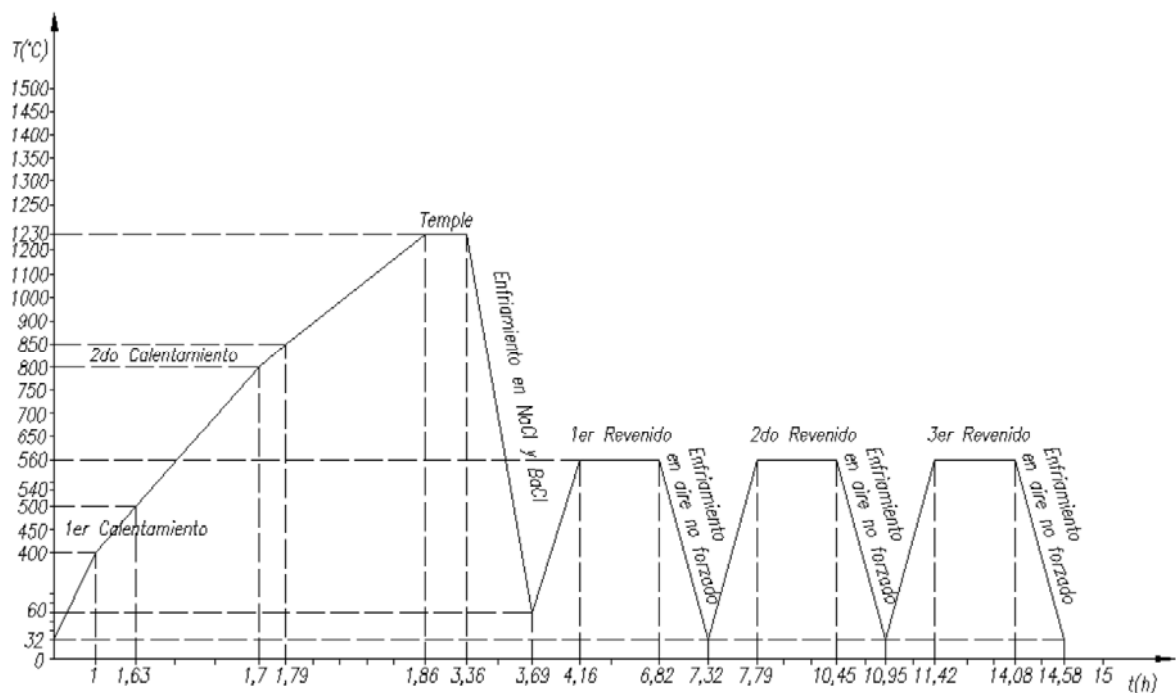
De acuerdo con Caballero. N, (1990) el tiempo de permanencia se determina en función de la naturaleza de la aleación y las dimensiones espaciales de la pieza, para los aceros herramentales la permanencia es de un minuto por cada milímetro de espesor para el temple y de dos a tres minutos para el revenido, el cual no debe ser menor de una hora.

En la ecuación 2.56 se determinó el tiempo de permanencia de la fresa angular de vástago dentro del horno durante el proceso de austenizado completo (temple), el cual considera las variables: longitud del cono,  $l_c = 20 \text{ mm}$ , longitud de la garganta,  $l_g = 19 \text{ mm}$ , diámetro del vástago,  $d_v = 44,7 \text{ mm}$  y espesor de pared del orificio roscado,  $e_{po} = 7,5 \text{ mm}$  para lo cual se obtuvo que el tiempo de permanencia necesario para lograr que el retículo cristalino sea completamente austenita es  $t_T = 1,5 \text{ h}$  e inhibir el aumento del tamaño del grano austenítico, la descarburización y la disminución de las propiedades mecánicas (Guliáev. A. P, 1978).

A través de la ecuación 2.57 se determinó el tiempo de permanencia de la fresa dentro del horno durante el proceso de revenido con el objeto de eliminar las tensiones de primer y segundo género que se originan en el proceso precedente de temple, lograr una estructura cristalina compuesta totalmente por martensita con la macrodureza de diseño de 58 a 62 HRC e inhibir la formación de esferoiditos (Tokmakoba. L. E, 1966) debe ser  $T_R = 2,66 \text{ h}$ .

Debido a la pequeña conductividad térmica del acero rápido, para evitar la aparición de grietas, la fresa angular de vástago de acuerdo con la figura 3.7 se somete al

horno cuando el mismo posee una temperatura de 400 °C para recibir su primer calentamiento hasta la temperatura de 500 °C, la velocidad de calentamiento empleada en el interior no debe ser superior de 50 – 80 °C/h y a un segundo calentamiento de 800 – 850 °C a la misma velocidad. Luego se lleva a la temperatura de proceso de 1 200 – 1 230 °C para garantizar un austenizado completo (temple completo) con una permanencia de 1,5 h, posteriormente se enfría en un baño de sales de NaCl y BaCl a razón de 80 °C/h hasta una temperatura de 60 °C. Más tarde para eliminar las tensiones de primer género, provocar la transformación de la austenita retenida en martensita revenida y fijar la dureza específica de diseño se somete a un primer revenido de 540 – 560 °C con una permanencia de 2,66 h y a un segundo y tercero revenido conservando las mismas variables y finalmente se enfría en aire no forzado hasta la temperatura ambiente. Los detalles del ciclo térmico impuesto a la fresa angular de vástago se muestran en el anexo 3.



**Figura 3.7.** Ciclo térmico de la fresa angular de vástago

### 3.10. Valoración económica

Esta consiste en evaluar todos los consumos generados desde el inicio del proceso tecnológico de fabricación hasta su total culminación, desarrollada a partir de la ficha de costo mostrada en la tabla 3.2.

El proceso de manufactura llevado a cabo en la UEB de Maquinado de la EMNI para el mecanizado de la ranura tipo cola de milano de los brazos del mecanismo de arrastre de la planta de hornos de la ECG con el empleo de discos de desbaste de tipo Tirollic 150 x 6 x 22,22 mm se efectúa con la utilización de tres de ellos en un tiempo de 3,5 h, para un consumo por concepto de materiales fundamentales, costos indirectos y energía de 50 CUC y 170, 35 CUP.

Si se efectuase el mecanizado con el diseño previsto por Socorro, J (2010) mostrado en el anexo 1 el cual incluye ocho plaquitas de la serie R390-012A16-11L y otras ocho plaquitas más con número de serie R390-025A25-17L cuyos precios se registran en el mercado internacional por el proveedor Sandvik Coromant en los valores de 22, 35 y 27, 47 euros para el cual el costo de fabricación de la fresa se estima de 125 CUP y 408, 56 euros, con ésta el mecanizado de las ranuras se realiza en 2 h.

Si la fresa angular de vástago fuese importada a través de la Empresa Comercializadora Exterior del Níquel (CEXNI) con los proveedores Sandvick Coromant y Bolesshaguer los costos por concepto de flete y precio FOX estarían en los valores de 725, 53 y 720, 25 euros.

En cambio sí se fabrica una fresa con el diseño mostrado en el anexo 2, el costo de fabricación de la misma es de 28, 1710 CUP y 82, 13 CUC y con ella es posible realizar el proceso de mecanizado de las ranuras tipo cola de milano de los brazos en un tiempo de 0,61 h, así como garantizar las tolerancias de forma y posición que exige el mecanismo para realizar trabajo.

**Tabla 3.2.** Análisis de los costos



|                                                            |                               |                                |   |                                                         |            |      |           |                                            |           |                       |                |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------------------------------|------------|------|-----------|--------------------------------------------|-----------|-----------------------|----------------|
| <b>Empresa Mecánica del Níquel</b><br><b>UEB Maquinado</b> |                               |                                |   | <b>Orden de Trabajo</b><br><b>07 – R – 52</b>           |            |      |           | <b>Orden de Producción:</b><br>002 – 0310A |           |                       |                |
|                                                            |                               |                                |   |                                                         |            |      |           | Cantidad: 1                                |           | No. de<br>Consecutivo |                |
|                                                            |                               |                                |   |                                                         |            |      |           | Plan: x                                    | Real:     |                       |                |
| Solicitada por:                                            | Emp. Cdte Ernesto Che Guevara |                                |   | Fecha inicio                                            | XX/XX/2011 |      |           | Elaborado por:                             |           | Firma:                |                |
| Turno de trabajo                                           | Turno "A"                     |                                |   | Fecha fin                                               | XX/XX/2011 |      |           | Aceptada por:                              |           | Firma:                |                |
| No. Plano:<br>HC –<br>0020310A                             | XXX                           |                                |   | Ejecutante                                              |            |      |           | UEB Maquinado                              |           |                       |                |
| Tipo de Fabric.                                            | M                             | X                              | C | Denominación de la Producción: Fresa angular de vástago |            |      |           |                                            |           |                       |                |
| Observación:                                               |                               |                                |   | Tiempo Planificado                                      |            |      |           | Brigada                                    |           |                       |                |
|                                                            |                               |                                |   | Operador                                                |            |      |           |                                            |           |                       |                |
|                                                            |                               |                                |   | J' brigada                                              |            |      |           |                                            |           |                       |                |
|                                                            |                               |                                |   | Ayudante                                                |            |      |           |                                            |           |                       |                |
|                                                            |                               |                                |   | Gruero                                                  |            |      |           |                                            |           |                       |                |
|                                                            |                               |                                |   | Afilador                                                |            |      |           |                                            |           |                       |                |
| <b>Gastos de Fuerza de Trabajo</b>                         |                               |                                |   |                                                         |            |      |           |                                            |           |                       |                |
| Chapa                                                      | Calificación                  | Tarifa                         |   |                                                         |            |      |           |                                            |           | <b>Total Horas</b>    | <b>Importe</b> |
| 2120                                                       | Cortador                      | 2,47                           |   |                                                         |            |      |           |                                            |           | 0,03                  | 0, 0700        |
| 2539                                                       | Tornero                       | 2,64                           |   |                                                         |            |      |           |                                            |           | 1,52                  | 4, 0128        |
| 5842                                                       | Fresado                       | 2,64                           |   |                                                         |            |      |           |                                            |           | 0,50                  | 1,3200         |
| 366                                                        | Rectificado                   | 2,64                           |   |                                                         |            |      |           |                                            |           | 0,03                  | 0,0792         |
| 7903                                                       | Afilado                       | 2,64                           |   |                                                         |            |      |           |                                            |           | 0,04                  | 0, 1056        |
| 4360                                                       | Temple                        | 2,50                           |   |                                                         |            |      |           |                                            |           | 3,69                  | 6, 2500        |
| 2378                                                       | Revenido                      | 2,50                           |   |                                                         |            |      |           |                                            |           | 10,89                 | 8, 7500        |
| 4015                                                       | J' Brigada                    | 2,99                           |   |                                                         |            |      |           |                                            |           | 1,73                  | 5,1727         |
| 1922                                                       | Ayudante                      | 2,36                           |   |                                                         |            |      |           |                                            |           | 0,40                  | 0,9534         |
| 1045                                                       | Gruero                        | 2,47                           |   |                                                         |            |      |           |                                            |           | 0,59                  | 1,4573         |
| Total                                                      |                               |                                |   |                                                         |            |      |           |                                            | 19,42 h   |                       | 28, 1710 CUP   |
| No. de vales                                               | Códigos                       | Denominación de los materiales |   |                                                         |            | U/ M | Cantid ad | Precio                                     | Importe   |                       |                |
| XXXXXXXX                                                   | 27359980090                   | Barra redonda acero P6M5 Ø90   |   |                                                         |            | kg   | 9,49      | 8,6547 CUC                                 | 82,13 CUC |                       |                |
| Total                                                      |                               |                                |   |                                                         |            |      |           |                                            | 82,13 CUC |                       |                |

Teniendo en cuenta que el consumo horario de la máquina herramienta fresadora empleada para el mecanizado de las ranuras tipo cola de milano de los brazos es de 15,75 kW y de que el precio de 1 kWh en horario normal es de 0,2 CUC, entonces podemos inferir que con el nuevo diseño de la fresa la cual posibilita realizar el maquinado en 0,61 h el costo de la energía consumida es de 1,9215 CUC y en consideración de que el consumo por hora de un compresor es de 90 kW y de que el precio de 1 m<sup>3</sup> de aire comprimido es de 0,04 CUC, y de que el tiempo empleado para limpiar las superficies que conforman la cola de milano es de 3,5 h y de que el para realizar el mismo se utilizó 3,5 m<sup>3</sup> de aire comprimido, entonces el costo de la energía consumida por concepto de proceso de manufactura con pulidora neumática es de 63,084 CUC.

El análisis realizado sobre la base de las diferentes variantes antes expuesta revela un ahorro sustancial de las variables energía y tiempo comprendidos en los valores de 2,89 h y 61,1625 CUC.

### **3.11. Impacto ambiental**

En Moa, el desarrollo de la industria minero metalúrgica es una muestra de cómo en el mundo se atenta contra el medio ambiente, y en mayores proporciones en los países industrializados del primer mundo. La interacción entre la industria y el medio ambiente deben ser satisfactorias y así se preservará el entorno.

Los principales problemas detectados en relación con el medio ambiente en el sector de tratamiento térmico son en la limpieza del local donde afecta la salud de los mismos trabajadores del área. En esta área se producen emanaciones de polvo principalmente por salideros en la parte superior de los silos (rajaduras), esta contaminación afecta el área de trabajo. La limpieza que se realiza en esta parte es manual.

En la inspección realizada en la EMNI se puede decir de forma general que el orden e higiene de la UEB de Maquinado son aceptables. Los desechos sólidos son clasificados adecuadamente permitiendo de esta manera la eliminación de las basuras y el reciclaje de la chatarra.

Los ruidos sólidos están compuestos fundamentalmente por virutas de los procesos de mecanizado, escorias, metal fundido, arenas de moldeo, lana de vidrio, materiales refractarios, aserrín, madera, goma. Las cenizas de hidróxido de calcio  $[Ca(OH)_2]$  producto de la producción de acetileno se vierten en una presa que se encuentra en la parte sur de la instalación, la cual tiene una capacidad de 6 570 m<sup>3</sup> al año. Esto soluciona uno de los problemas ambientales más significativos señalados en controles y auditorías.

### 3.12. Conclusiones del capítulo 3

- Las variables y parámetros establecidos en los cálculos de diseño por el método analítico posibilitan la realización de las múltiples operaciones tecnológicas, con el consumo mínimo de las variables (energía y tiempo) y sin generar gastos superfluos por concepto de mecanizado.
- Con el diseño de la fresa angular de vástago es posible desbastar un mayor volumen de material, así como garantizar las tolerancias de forma y posición que exige el mecanismo para trabajar en condiciones de equilibrio respecto al centro de masa y geométrico de rotación del sistema.
- En consideración a las disímiles variantes expuestas para llevar a cabo el proceso tecnológico de mecanizado se determinó que con el diseño de la fresa angular de vástago el ahorro por concepto de energía y tiempo es de 2,89 h y 61, 1625 CUC.

## **Conclusiones Generales**

- Dentro de los aceros para la fabricación de herramientas de corte, los aceros rápidos presentan buenas propiedades mecánicas, sobre todo su resistencia a altas temperaturas y su fácil maquinabilidad.
- Las ecuaciones desarrolladas permiten establecer el procedimiento metodológico de diseño de fresas angulares de vástago de la aleación P6M5 en función de las solicitaciones y estados tensionales a que estará sometida.
- Con el diseño de la fresa angular de vástago propuesta es posible desbastar un mayor volumen de material, garantizar las tolerancias de forma y posición que exige el mecanismo para trabajar en condiciones de equilibrio respecto al centro de masa y geométrico de rotación del sistema, minimizar los costos por concepto de proceso tecnológico, incrementar el tiempo de vida útil de los brazos del mecanismo de arrastre y atenuar los costos por concepto de mantenimiento presupuestados por la ECG para la compra de este elemento mecánico, el cual es solicitado por parte de la misma en grandes cantidades debido a las fallas que se generan y que están en función del acabado superficial y geometría de la ranura tipo cola de milano.

### **Recomendaciones**

- Informar a los directivos de la producción de la Empresa Mecánica del Níquel (EMNI) de la existencia del diseño realizado y someter a análisis el mismo para su posible fabricación y puesta en marcha.
- A falta del material seleccionado para el diseño, es preciso realizar un análisis de sus propiedades, químico, físico y mecánicas y buscar una aleación comparable a ésta.
- Cumplir estrictamente los parámetros tecnológicos prescritos en el ciclo térmico para inhibir la presencia de microfisuraciones, grietas o disminución de las propiedades mecánicas de la fresa angular de vástago.

# BIBLIOGRAFÍAS

## **Bibliografías**

1. Altintas, Y., Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design; Cambridge University Press, 2000.
2. Apraiz Barreiro, J., Tratamientos térmicos de los aceros, Edición Revolucionaria, 1966.
3. Ardatz, C., Machos de roscar rectificadas y destalonados en acero súper - rápido HSS y HSS – Co, 1998.
4. Arshinov, V., Diseño de Elementos de Maquina, Editorial Mir Moscú, 1976.
5. Astigarraga, J., Hornos industriales de resistencias. Editorial Normas S. A, 1998.
6. Baker, M., Finite element simulation of high speed cutting forces Journal of Materials Processing Technology. Vol.176, pp.117-126, 2006.
7. Boothroyd, G., Fundamentos del corte de metales y de las máquinas Herramientas McGraw Hill, 1989.
8. Bruhis, Y.; Sebring, W.; Noland, D., Meeting the Challenge of Milling Aerospace Materials; Aerospace Manufacturing and design, 2007.
9. Caballero, N., Manual de tratamiento térmico de los aceros. 1990.
10. Craig, R., Mecánica de materiales. Segunda edición, pág. 373-475. 2007.
11. Denai, M.; Palis, F. y Zeghib, A., Modeling and control of non-linear systems using soft computing techniques, Applied Soft Computing Journal, vol. 7, pp. 728 - 738, 2007.
12. Fernández, G., Resistencia de Materiales, Editorial Pueblo y educación, 1987.
13. Garay, J.; Villar, L.; Iriarte, P. y Arrazola, J., Estudio de la Maquinabilidad de Aceros a través del Empleo de Técnicas Experimentales Avanzadas, Congreso Nacional de Máquina Herramienta, 2008.
14. Gómez, T.; Maekawa, K.; Miller, T.; Clinton, Y., Metal machining: theory and applications, 2004.
15. Grzesik, W. y Brol, S., Hybrid approach to surface roughness evaluation in multistage machining processes, Journal of Materials Processing Technology, vol. 134, pp. 265-272, 2003.
16. Guliaev, A.P., Metalografía, Tomo 1, Editorial Mir Moscú, 1978.
17. HALE y RICK., Behavior and manufacturing properties of materials. Colocada en

- 15/2000. Disponible en la Worl Wide Web en <http://www.engr.ukans.edu/rhale/> .
18. Koren, K., An Analytical Evaluation of metal-Cutting Temperatures, ASME Transactions, 1997.
19. Landers, R., Ulsoy, A., y Ma, H. A comparison of model-based machining force control approaches, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 44, pp. 733-748, 2004.
20. Maher, R., Mechanics of metal cutting and type 2 chip" Journal of Applied Physis. Vol. 16, pp. 267-318, 2003.
21. Malishev, A; Nikolaev, G; Shuvalov, Y., Tecnología de los Metales, Séptima Edición, Editorial Mir Moscú, 1985.
22. Manrique. J., Transferencia de calor. Editorial TEC-CIEN. México, 1980.
23. Micheletti, G., Mecanizado por Arranque de Viruta, Editorial Blrnne, España 1980 (traducido por D. Tomás López Doménech).
24. Moufki, A., Thermo mechanical Modeling of oblique cutting and experimental validation, Inter. J. of Mach. Tools and Manufacture, 2004.
25. Nash, W., Finite Element Analysis of cutting forces in high speed machining Materials Science Forum.Vol.532 - 533,pp.753 756, 1998.
26. Norton, R, L., Diseño de Máquinas. México: editorial Prentice-Hall (Pearson), 1999.
27. Pérez, C., Supervisión Inteligente del Proceso de Mecanizado en una Máquina Herramienta, Tesis Doctoral, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
28. Pérez, M; Torres,C; Dally, J., Determinación de esfuerzos en la optimización de diseños mecánicos, 2006.
29. Ray, K. y Majumder, D., Application of Circle Criteria for Stability Analysis of Linear SESS and MEMS Systems Associated with Fuzzy Logic Controller, IEEE Trans. on SMC 14 (2), pp.345-349, 1984.
30. Richetti, E; Sánchez,S; Lameda, A., Mecanizado de alto rendimiento, procesos de arranque" Ediciones Técnicas Ízaro. Bilbao, 2004.
31. Rodríguez, A., Efecto del cambio de las condiciones de maquinado sobre la rugosidad superficial,. Editorial TEC-CIEN, 2013.



32. Saavedra, E., Predicción de la evolución de la temperatura durante el tratamiento térmico de materiales metálicos por láser; Ingeniería Mecánica. 13 (3) 1759 - 1764, 2000.
33. Sandvik. C; Catalogo general de herramientas de corte, 2009.
34. Santos, A., Metal cutting mechanics CRC Press LCC, Corporate Blvd., N.W. Boca Raton, Florida, 2001.
35. Saranche, L., Exploring Advanced Manufacturing Technologies, Industrial press Inc, 2007.
36. Sekulic, G.; Dornfeld, D. y Denkena, B., Advancing cutting technology, CIR Annals-Manufacturing Technology, vol. 52, pp. 483-507, 2010.
37. Schaeffer, S; Antolovich, S y Warner., Ciencia y Diseño de Materiales de ingeniería, Ed. CECSA, 2000.
38. Schmitt-Braess, G., Frequency domain evaluation of Circle Criterion, Popov Criterion and Off-Axis Criterion in the MIMO case. International Journal of Control, 72(13) pp. 1299-1309, 1999.
39. Socorro, J., Manual de diseño de herramientas de corte, 2010.
40. Spotts.M, F., Proyecto de Elementos de Máquinas, 2003.
41. Suárez, R., Herramientas de corte: materiales y aplicaciones. Informador Técnico (Cali). No 49, Enero 1995.
42. Suryanarayana, C., Mechanical alloying and Milling. Progress in Materials Science. Colorado. Pergamon, 2001.
43. Tokmakoba. L. E; Manual del joven termista. 1966.
44. Torres Alpízar, E., Apuntes acerca del T.T y la clasificación general de los aceros, 2004.
45. Weingaertner, P., Speed machining goes mainstream, 2006.

**ANEXOS**

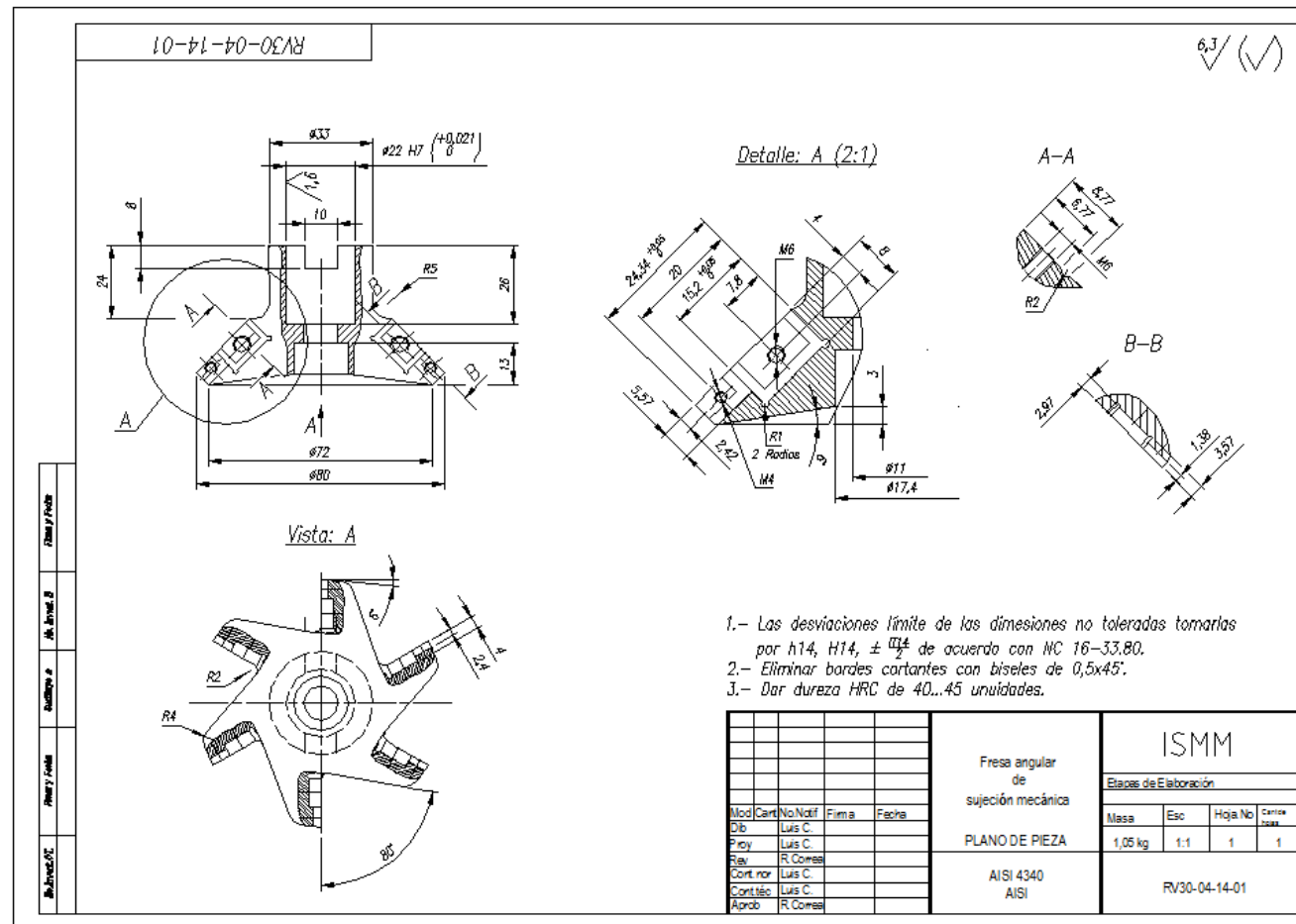


Figura 1. Fresa angular de sujeción mecánica (Fuente: Socorro, J (2010)).

## ANEXO 2

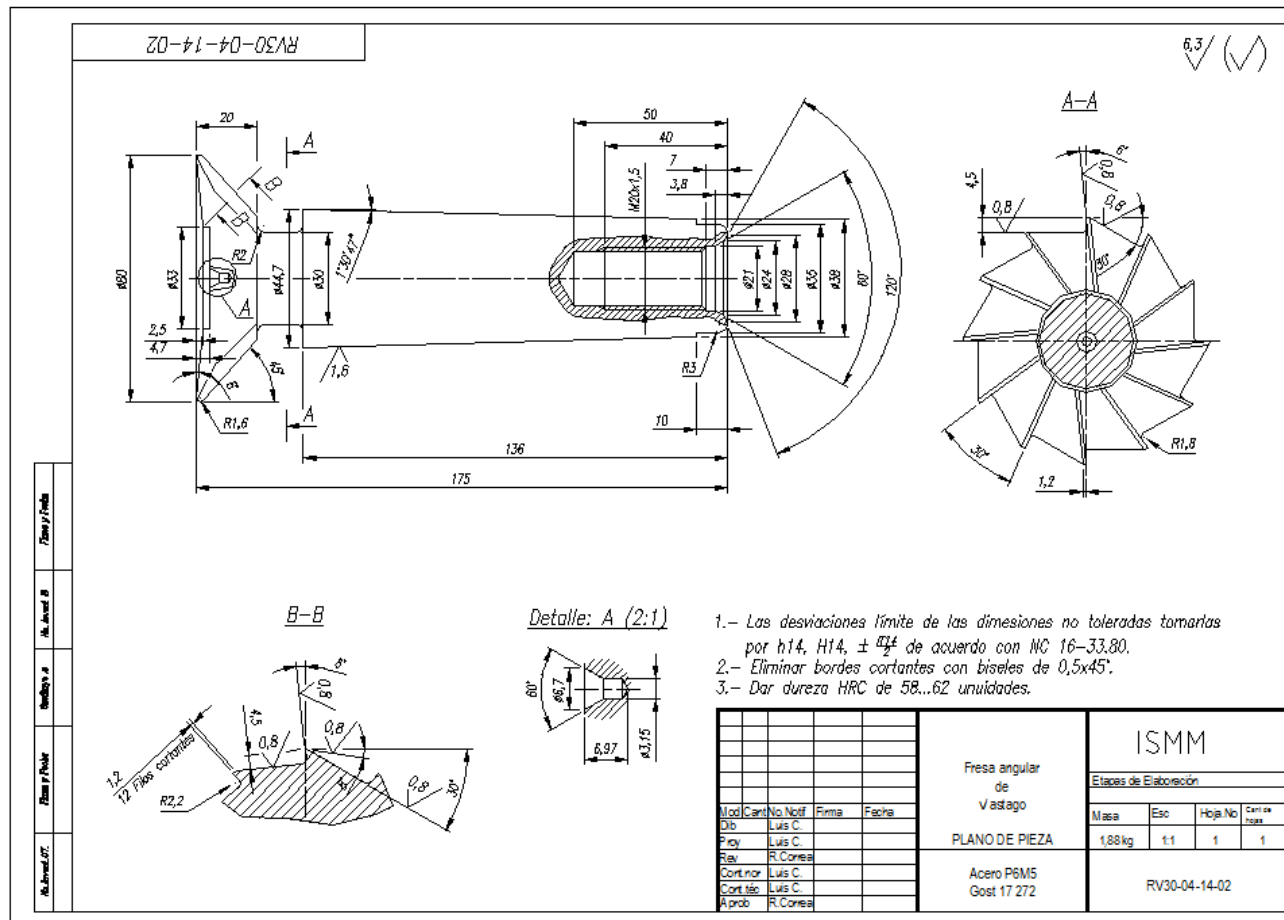


Figura 2. Fresa angular de vástago.

**ANEXO 3**

| CARTA TECNOLÓGICA DE TRATAMIENTO TÉRMICO 07 – R – 59                      |                     |        |          |                   |            |                                                       |                    |                               |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------|----------|-------------------|------------|-------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|----------|-----------|------|--------------------------|-------|-------------------|--------------------------------------------------------------|
| Empresa Mecánica del Níquel<br>Comandante Gustavo Machín Hoed<br>de Beche |                     |        |          |                   |            | Denominación de la pieza:<br>Fresa angular de vástago |                    | Orden de trabajo: 002 – 0310A |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
|                                                                           |                     |        |          |                   |            | Nº de Plano: RV30-04-14-02                            |                    | No. Tecnología: 500           |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
|                                                                           |                     |        |          |                   |            | Denominación y grado del material: Acero P6M5         |                    |                               |          |           |      |                          |       | Masa (kg)<br>1,88 |                                                              |
| No                                                                        | Operac.<br>Tecnológ | Equipo | Utillaje | Medio<br>ambiente | Dureza HRC | Penet rac                                             | Régimen de trabajo |                               |          | Cantidad  |      | Norma<br>rendimien<br>to |       | Volumen           | TPC: 0,1 h<br>T. Efectivo:<br>10,2 h<br>T. Total:<br>14,58 h |
|                                                                           |                     |        |          |                   |            |                                                       | T (°C )            | Exp.                          | V (°C/h) | Pzas Disp | Prof | Cant                     |       |                   |                                                              |
| 1.                                                                        | Precalmnto          | CW4    | Disp     |                   |            |                                                       |                    |                               |          | 1         | 1    | Tta                      | V     | 1                 | 1,79 h                                                       |
|                                                                           | Calentamiento       |        |          |                   |            |                                                       | 400 - 500          |                               |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
|                                                                           | Permanencia         |        |          |                   |            |                                                       |                    | 0,63 h                        | 50-80    |           |      |                          |       |                   |                                                              |
| 2.                                                                        | Calentamiento       |        |          |                   |            |                                                       | 800 - 850          |                               |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
|                                                                           | Permanencia         |        |          |                   |            |                                                       |                    | 0,79 h                        |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
| 3.                                                                        | Temple              | CW4    | Disp     |                   |            |                                                       |                    |                               |          |           |      |                          |       |                   | 1,57 h                                                       |
|                                                                           | Calentamiento       |        |          |                   |            |                                                       | 1200 - 1230        |                               |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
|                                                                           | Permanencia         |        |          |                   |            |                                                       |                    | 1,5 h                         |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
|                                                                           | Enfriamiento        |        |          | BaCL y<br>NaCl    |            |                                                       |                    |                               |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
|                                                                           | Comp dureza         | DP     |          |                   | 58-<br>62  |                                                       |                    |                               |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
| Observaciones:                                                            |                     |        |          |                   |            |                                                       |                    |                               |          |           |      | Firma                    | Fecha |                   |                                                              |
| Cant pzas por<br>eventos                                                  |                     | 1      | Cant     | No. Notif         | Firma      | Fecha: 17/6/2014                                      | Elaboró            |                               | Luis C.  |           |      | 17/6/2014                |       |                   |                                                              |
| Cant de eventos                                                           |                     | 1      |          |                   |            |                                                       | Revisó             |                               | Rodney   |           |      | 17/6/2014                |       |                   |                                                              |
| Tiempo Supervisor                                                         |                     | 1,1 h  |          |                   |            |                                                       | Aprobó             |                               | Rodney   |           |      | 17/6/2014                |       |                   |                                                              |
| Tiempo Ayudante                                                           |                     | 0,3 h  |          |                   |            |                                                       |                    |                               |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
| Tiempo Gruero                                                             |                     | 0,58 h |          |                   |            |                                                       |                    |                               |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |
| CARTA TECNOLÓGICA DE TRATAMIENTO TÉRMICO 07 – R – 59                      |                     |        |          |                   |            |                                                       |                    |                               |          |           |      |                          |       |                   |                                                              |

| Empresa Mecánica del Níquel<br>Comandante Gustavo Machín Hoed<br>de Beche |                     |        |         |                   |            | Denominación de la pieza:<br>Fresa angular de vástago |                    |        | Orden de trabajo: 002 – 0310A |            |           |                          |              |         |        |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------|---------|-------------------|------------|-------------------------------------------------------|--------------------|--------|-------------------------------|------------|-----------|--------------------------|--------------|---------|--------|
|                                                                           |                     |        |         |                   |            | N° de Plano: RV30-04-14-02                            |                    |        | No. Tecnología: 500           |            |           |                          |              |         |        |
|                                                                           |                     |        |         |                   |            | Denominación y grado del material: Acero P6M5         |                    |        |                               |            |           | Masa (kg)<br>1,88        |              |         |        |
| No                                                                        | Operac.<br>Tecnológ | Equipo | Utilaje | Medio<br>ambiente | Dureza HRC | Penet rac                                             | Régimen de trabajo |        |                               | Cantidad   |           | Norma<br>rendimient<br>o |              | Volumen | TPC:   |
|                                                                           |                     |        |         |                   |            |                                                       | T (°C )            | Exp.   | V (°C/h)                      | Pzas Disp. | Prof      | Cant                     | T. Efectivo: |         |        |
| 4.                                                                        | Revenido            | CW4    | Disp    |                   |            |                                                       |                    |        |                               | 1          | 1         | Tta                      | V            | 1       | 3,63 h |
|                                                                           | Calentamiento       |        |         |                   |            |                                                       | 540 - 560          |        |                               |            |           |                          |              |         |        |
|                                                                           | Permanencia         |        |         |                   |            |                                                       |                    | 2,66 h | 50-80                         |            |           |                          |              |         |        |
|                                                                           | Enfriamiento        |        |         | Aire              |            |                                                       |                    |        |                               |            |           |                          |              |         |        |
|                                                                           | Comp dureza         |        |         |                   | 58-62      |                                                       |                    |        |                               |            |           |                          |              |         |        |
| 5.                                                                        | Revenido            | CW4    | Disp    |                   |            |                                                       |                    |        |                               |            |           |                          |              |         | 3,63 h |
|                                                                           | Calentamiento       |        |         |                   |            |                                                       | 540 - 560          |        |                               |            |           |                          |              |         |        |
|                                                                           | Permanencia         |        |         |                   |            |                                                       |                    | 2,66 h | 50-80                         |            |           |                          |              |         |        |
|                                                                           | Enfriamiento        |        |         | BaCl y NaCl       |            |                                                       |                    |        |                               |            |           |                          |              |         |        |
|                                                                           | Comp dureza         | DP     |         |                   | 58-62      |                                                       |                    |        |                               |            |           |                          |              |         |        |
| Observaciones:                                                            |                     |        |         |                   |            |                                                       |                    |        |                               |            |           | Firm                     | Fecha        |         |        |
| Cant pzas por eventos                                                     |                     | 1      | Cant    | No. Notif         | Firm       | Fecha: 17/6/2014                                      | Elaboró            |        | Luis C.                       |            | 17/6/2014 |                          |              |         |        |
| Cant de eventos                                                           |                     | 1      |         |                   |            |                                                       | Revisó             |        | Rodney                        |            | 17/6/2014 |                          |              |         |        |
| Tiempo Supervisor                                                         |                     | -      |         |                   |            |                                                       | Aprobó             |        | Rodney                        |            | 17/6/2014 |                          |              |         |        |
| Tiempo Ayudante                                                           |                     | -      |         |                   |            |                                                       |                    |        |                               |            |           |                          |              |         |        |
| Tiempo Gruero                                                             |                     | -      |         |                   |            |                                                       |                    |        |                               |            |           |                          |              |         |        |
| CARTA TECNOLÓGICA DE TRATAMIENTO TÉRMICO 07 – R – 59                      |                     |        |         |                   |            |                                                       |                    |        |                               |            |           |                          |              |         |        |
| Empresa Mecánica del Níquel<br>Comandante Gustavo Machín Hoed<br>de Beche |                     |        |         |                   |            | Denominación de la pieza:<br>Fresa angular de vástago |                    |        | Orden de trabajo: 002 – 0310A |            |           |                          |              |         |        |
|                                                                           |                     |        |         |                   |            | N° de Plano: RV30-04-14-02                            |                    |        | No. Tecnología: 500           |            |           |                          |              |         |        |

|                       |                     |        |          |                   |            | Denominación y grado del material: Acero P6M5 |                    |        |          |            |      |                          |              | Masa (kg)<br>1,88 |        |
|-----------------------|---------------------|--------|----------|-------------------|------------|-----------------------------------------------|--------------------|--------|----------|------------|------|--------------------------|--------------|-------------------|--------|
| No                    | Operac.<br>Tecnológ | Equipo | Utillaje | Medio<br>ambiente | Dureza HRC | Penet rac                                     | Régimen de trabajo |        |          | Cantidad   |      | Norma<br>rendimient<br>o |              | Volumen           | TPC:   |
|                       |                     |        |          |                   |            |                                               | T (°C )            | Exp.   | V (°C/h) | Pzas Disp. | Prof | Cant                     | T. Efectivo: |                   |        |
| 6.                    | Revenido            | CW4    | Disp     |                   |            |                                               |                    |        |          | 1          | 1    | Tta                      | V            | 1                 | 3,63 h |
|                       | Calentamiento       |        |          |                   |            |                                               | 540 - 560          |        |          |            |      |                          |              |                   |        |
|                       | Permanencia         |        |          |                   |            |                                               |                    | 2,66 h | 50-80    |            |      |                          |              |                   |        |
|                       | Enfriamiento        |        |          | Aire              |            |                                               |                    |        |          |            |      |                          |              |                   |        |
|                       | Comp dureza         |        |          |                   | 58-62      |                                               |                    |        |          |            |      |                          |              |                   |        |
|                       |                     |        |          |                   |            |                                               |                    |        |          |            |      |                          |              |                   |        |
|                       |                     |        |          |                   |            |                                               |                    |        |          |            |      |                          |              |                   |        |
|                       |                     |        |          |                   |            |                                               |                    |        |          |            |      |                          |              |                   |        |
|                       |                     |        |          |                   |            |                                               |                    |        |          |            |      |                          |              |                   |        |
|                       |                     |        |          |                   |            |                                               |                    |        |          |            |      |                          |              |                   |        |
| Observaciones:        |                     |        |          |                   |            |                                               |                    |        |          |            |      | Firma                    | Fecha        |                   |        |
| Cant pzas por eventos |                     | 1      | Cant     | No. Notif         | Firma      | Fecha: 17/6/2014                              | Elaboró            |        | Luis C.  |            |      | 17/6/2014                |              |                   |        |
| Cant de eventos       |                     | 1      |          |                   |            |                                               | Revisó             |        | Rodney   |            |      | 17/6/2014                |              |                   |        |
| Tiempo Supervisor     |                     | -      |          |                   |            |                                               | Aprobó             |        | Rodney   |            |      | 17/6/2014                |              |                   |        |
| Tiempo Ayudante       |                     | -      |          |                   |            |                                               |                    |        |          |            |      |                          |              | Cantidad          |        |
| Tiempo Gruero         |                     | -      |          |                   |            |                                               |                    |        |          |            |      |                          |              | 1                 |        |
|                       |                     |        |          |                   |            |                                               |                    |        |          |            |      |                          |              |                   |        |

