



**Instituto Universitario de Tecnología del Oeste Í Mariscal Sucrel  
Universidad de Holguín  
Í Oscar Lucero Moya  
Facultad de Ingeniería  
Centro de Estudios CAD/CAM**

**EVALUACIÓN CAD - CAE - CAM DEL EJE SOPORTE DEL MOTOR  
DE TRACCIÓN DE LOS TRENES DE LA III GENERACIÓN DE LA  
C.A. METRO DE CARACAS.**

Tesis presentada en opción al título de Máster en Diseño y Fabricación Asistidos  
por Computadora para la Rama Metal Mecánica (CAD/CAM).

**Prof. Oscar Armando Richards Gil.**

Caracas  
Mayo 2009

**Instituto Universitario de Tecnología del Oeste Í Mariscal Sucrel**



**Universidad de Holguín  
Í Oscar Lucero Moya  
Facultad de Ingeniería  
Centro de Estudios CAD/CAM**



## **EVALUACIÓN CAD - CAE - CAM DEL EJE SOPORTE DEL MOTOR DE TRACCIÓN DE LOS TRENES DE LA III GENERACIÓN DE LA C.A. METRO DE CARACAS.**

Tesis presentada en opción al título de Máster en Diseño y Fabricación Asistidos  
por Computadora para la Rama Metal Mecánica (CAD/CAM).

**Autor: Prof. Oscar Armando Richards Gil.  
Tutor: Dr. C. Noel Álvarez del Pino.**

Caracas  
Mayo 2009

## AGRADECIMIENTO

Agradezco al gobierno nacional por su visión revolucionaria e integradora, con la cual permitió la relación fraterna entre la República Bolivariana de Venezuela y la República de Cuba.

Al Instituto Universitario de Tecnología del Oeste Mariscal Sucre (IUTOMS), por haberme brindado la oportunidad de pertenecer al equipo de trabajo que con una visión revolucionaria está en la búsqueda de mejorar su calidad y su participación activa en la época de cambios que en nuestro País está aconteciendo de lo cual me siento coparticipe.

A la comitiva de profesores del Centro de Estudios CAD/CAM, de la Universidad de Holguín %Oscar Lucero Moya+ por brindarme no sólo su aporte en lo científico sino también su amistad.

En especial reconocimiento a los profesores Dr.C. Raúl Santana y Dr.C. Ricardo Ávila, por apostar al logro del objetivo de alcanzar el título que con este trabajo estoy optando.

Y por último y no por eso menos importante a mi tutor del trabajo de tesis, el Dr. C. Noel Álvarez del Pino (Papá Noel), que sin la ayuda de él hubiese sido muy difícil culminar este trabajo investigativo y por lo cual estaré eternamente agradecido y con la firme promesa que no lo defraudare.



## DEDICATORIA

A la memoria de mi hija ORIANA que en el corto tiempo que estuvo a mi lado me enseñó lo que es luchar por la vida y llenó con la luz de sus ojos mi existencia dejando su recuerdo por siempre para hacer que cada día intente ser mejor padre, esposo, compañero, profesional y amigo y con ello hacer honor a su memoria.

A mi esposa Alejandra por apoyarme pacientemente en cada uno de los numerosos y largos días de lucha en la obtención del título de máster.

A mis hijos Jessica, Oscar y a mí recién nacida Giuliana como una demostración que con trabajo honesto y sin mezquindad se logra alcanzar todas las metas.

## SÍNTESIS

La necesidad de eliminar la rotura del eje soporte de los motores eléctricos asincrónicos utilizados en la propulsión del metro de Caracas fue la motivación del presente trabajo. Para alcanzar este objetivo se trabajó en la determinación del mecanismo que provoca dichos fallos. Para ello se aplicó el Método por Elementos finitos para realizar el estudio estático y pseudodinámico con el correspondiente análisis de convergencia del mallado obteniendo como resultado los estados tensionales y las deformaciones unitarias. Para estos fines se emplearon los software profesionales SolidWorks y CosmoWorks. Los resultados permitieron evaluar la validez del diseño. Para la elaboración de la tecnología de fabricación CNC se tuvo en cuenta la forma de obtención de la pieza en bruto así como la selección de las herramientas de cortes con la ayuda del software CoroGuide de la Sandvik Coromat. Para la obtención de los códigos CNC se tomó como base los pasos tecnológicos propuestos y se utilizó el software profesional SurfCam. Se validó económicamente la variante propuesta.

## INDICE

Contenido	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES Y ACTUALIDAD DE LAS EVALUACIONES	
CAD-CAE Y LAS TECNOLOGÍAS CAM	5
1.1 Propiedades Macroscópicas de los materiales	8
1.2 Tipos de solicitaciones	10
1.2.1 Solicitaciones Estáticas	10
1.2.2 Solicitaciones Dinámicas	12
1.3 Concentración y concentradores de tensiones	14
1.4 Integridad superficial	16
1.5 Vías para aumentar la resistencia a la fatiga de los componentes mecánicos	18
1.5.1 La rugosidad superficial	18
1.5.2 Procesos Térmicos como forma de mejorar las características del acero para la fatiga	21
1.6 El proceso de diseño con el uso de herramientas CAD-CAE	24
1.6.1 Herramientas CAD	26
1.6.2 Herramientas CAE	27
1.7 Proceso de fabricación	28

Contenido	Pág.
Conclusiones del Capítulo1	31
2. EVALUACIÓN CAD-CAE DEL DISEÑO Y TECNOLOGÍA CNC DE FABRICACIÓN DEL EJE SOPORTE DEL MOTOR DE TRACCIÓN DE LOS TRENES DE III GENERACIÓN DE LA C.A METRO DE CARACAS	33
2.1 Evaluación CAD-CAE	37
2.2 Confección del modelo de análisis por elementos finitos sometido a cargas estáticas	40
2.3 Análisis de las tensiones pseudodinámicas	46
2.4 Clasificación de las Superficies según su Designación	48
2.5 Clasificación de las bases atendiendo a la cantidad de grados de libertad que eliminan	49
2.6 Procesos tecnológicos empleados para la obtención de la pieza en bruto, para la fabricación del Eje Soporte del Motor	50
2.7 Determinación de la pieza	51
2.8 Determinación del tipo de producción	52
2.9 Cálculo de la magnitud del lote	53
2.10 Coeficiente de Aprovechamiento del Material de la Pieza en Bruto (A)	54
2.11 Pasos tecnológicos para cada superficie del eje	56
2.12 Elección de las bases tecnológicas y establecimiento de la ruta tecnológica	56

<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
2.13 Elección de las Herramientas de Corte	59
2.14 Cálculo del Régimen de Corte para Cada Herramienta	62
2.15 Cálculo del tiempo útil de trabajo y Potencia consumida	63
Conclusiones del Capítulo 2	66
<b>3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	<b>68</b>
3.1 Validación del modelo numérico del eje soporte del motor de tracción	69
3.2 Resultados del análisis de la resistencia y rigidez del eje soporte del motor de tracción	70
3.3 Resultados del análisis de la tecnología de fabricación del eje soporte del motor de tracción	72
3.4 Análisis económico de la fabricación del eje soporte del motor	75
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>79</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>80</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>81</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>87</b>



## INTRODUCCIÓN:

Los antecedentes históricos de los inicios del uso del ferrocarril se remontan al siglo XVIII en países europeos como Inglaterra y Francia cuando los mineros de esa época transportaban el material en vagones sobre improvisados rieles. Luego en esos mismos territorios se construyeron los primeros rieles con material ferroso lo cual significó un gran paso de avance.

Posteriormente, en 1831 en Carolina del Sur (USA), surge la primera locomotora transportada sobre rieles importados desde Inglaterra. Más adelante estos se construyeron en USA dándole nuevas formas y usando nuevos materiales que garantizaban un mejor comportamiento de los mismos.

En Venezuela, la construcción de las primeras vías férreas con una longitud de 70 km se remonta al año 1873 y enlazaba a las poblaciones de Tucacas y Aroa en el Estado Falcón.

Con el crecimiento de la población en los centros urbanos se hizo imprescindible el diseño de un sistema de transporte masivo en las ciudades y con ello aparecieron los tranvías. A comienzos del siglo XX, la capital Venezolana estrenaba los tranvías eléctricos, los cuales estaban sustituyendo a los viejos tranvías de caballos. La Compañía Tranvías Eléctricos de Caracas tenía una flota de 40 unidades con capacidad para 38 personas sentadas y el tranvía alcanzaba hasta 25 km/h.

El 8 de agosto de 1977, se fundó la Compañía Anónima del Metro de Caracas, con el objeto de contribuir al desarrollo del transporte colectivo en el área metropolitana de Caracas. El 2 de enero de 1983, se hace realidad el gran sueño de la inauguración de esta obra. Paulatinamente se fueron construyendo las líneas en el siguiente orden: en el 1987 la Línea 1, en el 1989 la Línea 2, en el 1994 la Línea 3 y en el 2004 la Línea 4.

El Metro actualmente es propulsado por motores eléctricos asíncronos que están sometidos a grandes y variados tipos de cargas lo cual crea las condiciones para la aparición de fallas en los componentes de este sistema. Ese es el caso del soporte de dicho motor que presenta frecuentes roturas. En la actualidad no se conocen las causas exactas que las producen. Es usual en estos casos evaluar diferentes factores como son existencia de concentradores de tensiones, valores de las cargas, tipos de cargas, vibraciones, materiales con los que se encuentra construida la pieza, su estructura metalográfica y tratamiento térmicos entre otros para poder describir con exactitud el mecanismo de aparición de las mencionadas fallas.

Todo lo anterior permite afirmar que el problema enfrentado en esta investigación es la rotura del eje soporte del motor de tracción de los trenes de la III generación de la C.A. Metro de Caracas.

Para dar solución a este problema se plantea la Hipótesis de que la evaluación CAD-CAE-CAM correspondiente del eje soporte del motor de tracción de los trenes de III generación del Metro de Caracas, permitirá determinar y erradicar las

causas de las roturas así como confeccionar la tecnología CNC correspondiente para sustituir su importación.

### **Objetivo General:**

Describir con exactitud el mecanismo de aparición de las fallas del eje soporte del motor de tracción de los trenes de III generación del Metro de Caracas y proponer una tecnología CNC para su fabricación.

### **Objetivos Específicos:**

1. Determinar los antecedentes y actualidad de las evaluaciones CAD-CAE y las tecnologías CAM para piezas cilíndricas.
2. Evaluar el diseño original del eje soporte de motor con el uso de herramientas CAD-CAE.
3. Obtener su tecnología de fabricación CNC.

### **Novedad**

La obtención de un modelo CAD-CAE que contribuya a describir con exactitud el mecanismo de aparición de las fallas y sirva como base para recomendar las modificaciones necesarias para reducir la frecuencia de ocurrencia de las mismas así como la obtención de la tecnología CNC de fabricación Nacional del eje soporte del motor de los trenes de III generación de la C.A. Metro de Caracas.

### **Aportes**

1. Se implementaría la sustitución de importación del eje soporte.
2. Interrelación de la industria con las Instituciones académicas de Venezuela.
3. Constituye una fuente de autogestión para las Institución.

## Métodos de la Investigación

1. **Histórico-lógico.** Este se aplicó para establecer el estado del arte del tema de Investigación, como marco teórico referencial, permitiendo conocer qué se ha investigado sobre fallas en elementos de máquinas.
2. **Método de observación científica.** Para identificar, en ejes en los cuales ha ocurrido la falla, los probables tipos y magnitudes de cargas y esfuerzos que estuvieron presente durante su funcionamiento.
3. **Método experimental.** Esta metodología se utilizó en la determinación de los efectos causados por los esfuerzos a los que está sometido un elemento de máquina para garantizar la prestación de servicio.
4. **Método de medición.** Se aplicaron durante la verificación de los valores obtenidos en cada una de las variables dependientes en la fase experimental.
5. **Análisis y Síntesis:** esta metodología es aplicada en la investigación de estado del arte del tema y en la síntesis de los fundamentos teóricos que sustentan la presente investigación.



**PDF**  
Complete

*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

# **CAPITULO I**

## **ANTECEDENTES Y ACTUALIDAD DE LAS EVALUACIONES CAD-CAE Y LAS TECNOLOGÍAS CAM.**

## **1. ANTECEDENTES Y ACTUALIDAD DE LAS EVALUACIONES CAD-CAE Y LAS TECNOLOGÍAS CAM**

La propiedad más significativa de un sólido es su estabilidad mecánica, o sea su resistencia a cambiar de forma y tamaño frente a las fuerzas exteriores. En el estudio de los materiales la explicación de por qué un puente, o la rama de un árbol soporta su carga, Laufganng [14], debe orientarse hacia las miríadas de enlaces atómicos que trabajando como pequeños resortes electrostáticos mantienen unidos a los átomos de la materia sólida proporcionando la reacción a las cargas externas que postula Newton en su ley de acción y reacción. Estas miríadas de enlaces químicos (enlaces metálicos, covalentes e iónicos) y/o físicos (Van der Waals y Puentes de hidrógeno) entre átomos y moléculas mantienen unidos a los sólidos y pueden destruirse de diferentes maneras por ejemplo, por fractura mecánica, por fusión, por disolución o por ataque químico.

Debido a que los enlaces son siempre los mismos, no importa porque medio se les rompa, se podría erróneamente suponer que ahora que los Químicos y Físicos saben mucho acerca de la naturaleza de los mismos no habría dificultad en relacionar la fractura mecánica con la disolución, la fusión o el ataque químico.

Decir esto sería suponer que el comportamiento mecánico de los materiales podría considerarse una rama de la química. Este por supuesto está relacionado con los enlaces atómicos pero lo es tan indirectamente que no existe actualmente una teoría que comunique simple y enteramente a la química clásica o la física atómica con la resistencia mecánica, la deformación y fractura de los materiales que son en esencia los principales fenómenos asociados al comportamiento mecánico de los materiales.

Debido a ello las propiedades mecánicas, factores esenciales del comportamiento mecánico, deben obtenerse por ensayos y no mediante ecuaciones basadas en magnitudes asociadas al átomo.

Esto lleva a que la moderna Ciencia de Materiales en general y la tradicional Metalurgia en particular sean tópicos esencialmente empíricos, condición por la cual se las ha menospreciado comparativamente con ciencias más "teóricas" como la electricidad o la electrónica las que abordan el trabajo de explicar el comportamiento de los electrones mas matemáticamente pero solo por que los electrones tienen un comportamiento más sencillo de aproximar con ecuaciones que el comportamiento mecánico.

La teoría del comportamiento mecánico de los materiales asume que los materiales son continuos, homogéneos e isótropos y que las tensiones están uniformemente distribuidas en la sección. Se sabe que los materiales no son ni continuos, ni homogéneos, ni isótropos, tienen estructuras a diferentes niveles y están formados por unidades discontinuas que son llamados átomos. Las tensiones tampoco están uniformemente distribuidas en la sección sino que

están concentradas en los enlaces atómicos, separados entre sí por la distancia interatómica.

Por razones ya expuestas se describe el comportamiento mecánico, dentro de lo posible, en términos de tensión y deformación macroscópica promedio, más que en términos de átomos individuales. Para que esta simplificación sea válida el elemento de volumen elegido debe ser pequeño comparado con el espécimen de ensayo o la estructura en estudio pero suficientemente grande comparado con el átomo.

### **1.1 Propiedades Macroscópicas de los materiales.**

La elasticidad es una propiedad macro de los Materiales y en particular de los metales. Se puede definir como la capacidad de los metales de recuperar total o parcialmente su forma y dimensiones una vez que ha dejado de actuar la carga que produjo la deformación. Los metales tienen una gama de valores del módulo de elasticidad que varía entre 14 GPa para el plomo y entre 500 y 600 GPa para el Wolframio y el Osmio. En muchos casos estos valores pueden modificarse mediante Tratamientos Térmicos o Mecánicos pero aun así mantienen cierta plasticidad que evita su ruptura frágil o permite darles forma por procesos de Deformación Plástica. Cuando un Metal es sometido a una tensión igual o mayor que  $\sigma_f$  llamada límite de fluencia, finaliza el comportamiento elástico lineal y, en vez de fracturarse como lo hacen los cerámicos y vidrios, comienza la deformación plástica. De todas las clases de materiales los metales son los menos resistentes a la corrosión.



Otra propiedad macro de los metales es la llamada "resistencia" de un elemento mecánico. Esta propiedad depende de diversos factores, a saber; la identidad del material, el aspecto geométrico de la pieza y los aspectos debidos a las sollicitaciones. La resistencia según Hamrock [12], ~~es~~ es una propiedad específica de un elemento de máquina antes de ser ensamblado en la máquina+. Sin embargo se debe tener en cuenta que este tipo de indicadores es de carácter aleatorio cuando se trate de elementos producidos en serie o sometidos a variaciones en los procesos de carga.

Con el análisis de las relaciones entre cargas estáticas y resistencias estáticas se podrá tomar decisiones respecto del material y su tratamiento, condiciones de geometría y de carga para poder garantizar un funcionamiento eficiente a un órgano de máquina.

La relación entre falla y rotura se establece de la siguiente forma, para Shigley [26], [La idea de rotura o de falla de una pieza está asociada a la idea de desafectar la misma del mecanismo o máquina en la cual actúa+. Sin embargo entre ellas existe una diferencia conceptual que permite efectuar un análisis diferente en cada caso y tomar decisiones afines. Un proceso de rotura significa que la pieza se divide en dos o más partes dejando así de cumplir con la función que tiene asignada como órgano de máquina. Un proceso de falla aunque es entendido de la misma manera que el anterior como que la pieza deja de cumplir con la función asignada en la máquina, de por sí constituye un concepto algo más general ya que contempla al anterior sin embargo la falla de una pieza puede ocurrir sin necesidad de su rotura. Ver anexo 1.

Para Shigley [26], existen diferentes mecanismos de falla en diferentes tipos de piezas construidas con diferentes tipos de materiales, en algunos casos se presentan dos o más, donde pueden aparecer deformación por fuerzas, impacto, erosión superficial, entre otras. Ver anexo 2.

## **1.2 Tipos de solicitaciones.**

Según Piován [23], en las piezas de máquinas se pueden hallar diferentes tipos de solicitaciones, las cuales se pueden distinguir en dos tipos característicos: estáticas y dinámicas según que varíen o no con el tiempo. Así pues las cargas estáticas suelen denominarse monotónicas o estacionarias y a las cargas dinámicas se las suele denominar cíclicas o transitorias.

### **1.2.1 Solicitaciones Estáticas.**

Un parámetro que caracteriza a los metales cuando están sometidos a cargas estáticas es el valor de la tensión de fluencia ( $\sigma_f$ ). Estos valores pueden ser determinados por varios métodos que serán analizados a continuación.

Según Shigley [26], la teoría de la máxima tensión cortante fue introducida en forma independiente por Coulomb (1773) y por Tresca (1868), y se la suele llamar también Criterio de Fluencia de Coulomb-Tresca o Criterio de Fluencia de Tresca. De acuerdo con la evidencia experimental sobre láminas de titanio y otros metales, según las cuales los mismos se deformaban según planos de corte perfectamente definidos. Estas observaciones condujeron a definir el criterio de fluencia como sigue: «Una pieza sujeta a cualquier combinación de cargas sufrirá falla cuando la tensión cortante máxima exceda un valor crítico». El valor crítico se puede obtener a partir de los ensayos de tracción y compresión convencionales.

*La Teoría de la Energía de Distorsión*, según Shigley [26], postula que la falla es causada por la energía elástica asociada con la energía de deformación por corte. La hipótesis de la energía de distorsión surge de la observación que los materiales dúctiles sometidos a tensiones hidrostáticas tienen resistencias a la fluencia que exceden los valores de los experimentos de tracción simple. Esto da la idea que la fluencia no es un proceso de tracción o compresión simples sino que hay involucrada cierta distorsión angular en el volumen unitario más solicitado. Esta teoría predice la fluencia bajo cargas combinadas con mayor exactitud que cualquier otra teoría conocida. La teoría de la energía de distorsión se puede deducir matemáticamente de varias maneras. Para estos autores la hipótesis de la energía de distorsión postula que la fluencia ocurrirá cuando la energía de distorsión de un volumen unitario sea igual a la energía de distorsión del mismo volumen cuando se le someta a un esfuerzo uniaxial hasta la resistencia a la fluencia+.

Otra teoría o hipótesis es la de la Fricción Interna (para materiales dúctiles), Esta teoría se basa en una serie de hipótesis y observaciones efectuadas por Mohr a principios del siglo XX, mediante los únicos métodos prácticos con que se contaba, es decir con los círculos Mohr e ideas afines al mismo. Aunque la idea es antigua, sigue siendo útil conceptualmente. La intención central de esta hipótesis involucra hallar una forma de cálculo para la tensión de fluencia representativa, conociendo los resultados experimentales de los tres ensayos de fluencia, a tracción, compresión y corte puro, luego describir sus estados en respectivos círculos de Mohr y finalmente trazar la envolvente de los tres círculos

la cual podría ser una recta, parábola o curva cualquiera. Sin embargo es más fácil obtener una fórmula de resistencia a la fluencia por corte puro en función de los otros dos experimentos, en vez de efectuar el ensayo de caracterización de fluencia por corte puro (entiéndase torsión). Ver anexo 3 y 4.

### **1.2.2 Solicitaciones Dinámicas.**

Las cargas dinámicas aplicadas a los componentes de máquinas producen estados tensionales particulares que no pueden ser explicados con simples ensayos de tracción y compresión. Varios autores han expresado sus opiniones sobre estos temas de la siguiente forma:

El mecanismo de fatiga es uno de los más complejos fenómenos en el estudio de falla en piezas sometidas a la acción de cargas dinámicas, Shigley [26]. Este fenómeno puede aparecer súbitamente y sin aviso previo. Este fenómeno está asociado principalmente a la presencia de patrones de carga dinámicos de tipo cíclico como los vistos anteriormente.

Cuando piezas o bien partes de una máquina fallan estáticamente, es muy frecuente que las mismas presenten grandes deflexiones pues fue sobrepasado el límite de elasticidad, y la pieza se reemplaza antes de que se produzca la rotura, Piován [23]. La falla estática tiene la ventaja de señalar o "avisar" de su presencia. Ahora bien, las fallas dinámicas o por fatiga son del tipo de fallas que no proporcionan evidencia. Son repentinas y fatales en muchos casos. El diseño y cálculo contra la falla estática son tareas relativamente sencillas debido a que el conocimiento del fenómeno de falla estática es bastante completo desde el punto de vista experimental y su modelación matemática. Sin embargo el diseño de

piezas contra la falla dinámica o bien contra la fatiga es algo de mayor complejidad y actualmente solo es comprendido en forma parcial y los métodos de cálculo que pueden emplearse se deben entender en términos estadísticos. Para Piován [23], una visión muy conservadora consiste en no emplear métodos de cálculo por fatiga y multiplicar por 3 o por 4 los coeficientes de seguridad comúnmente empleados, pero esta práctica conduce a diseños poco competitivos; lo cual conduce a derrotas seguras en el mercado profesional.

Desde mediados del siglo XIX se sabe que en aquellas piezas sometidas a cargas variables, con un número grande de aplicaciones se producía la rotura de la pieza prácticamente sin deformaciones; a este fenómeno se lo llamo fatiga", Hamrock [12], por semejanza al cansancio humano. Los distintos estudios efectuados, condujeron a distintas teorías, que tomadas en su conjunto pueden dejar las siguientes conclusiones:

a) Los aceros de construcción de máquinas y en general los metales, no poseen homogeneidad en su estructura, ni continuidad de resistencia en los metales que poseen cristales de una sola fase, que al variar de tamaño y orientación, hacen que la resistencia promedio sea sólo válida para solicitaciones estáticas, debido a que estas solicitaciones permiten un re-acomodamiento adaptativo de los cristales a medida que aumenta la carga.

a) A su vez las cargas variables tienen su aplicación prácticamente instantánea, lo cual no deja mucho margen temporal para el reacomodamiento, siendo este el motivo de la separación de los cristales en aquellos lugares donde hay menor cohesión intercrystalina, generando el inicio de una microfisura, la

que por el efecto de concentración de tensiones producida por la microentalla, crea en esa zona un incremento de tensiones que va aumentando rápidamente la fisura hasta que la sección resistente no puede soportar la carga, produciéndose en ese instante la rotura súbita de la pieza.

b) Las microfisuras o grietas iniciales de fatiga comienzan sobre la superficie de las piezas en varios puntos simultáneamente y se propagan a los sustratos inferiores. Estas grietas que son normalmente muy pequeñas y difíciles de observar, pero se propagan en conjunto ante la presencia de un defecto dominante pueden llevar rápidamente a la catástrofe.

### **1.3 Concentración y concentradores de tensiones.**

Se Comienza por definir los tres términos más usados durante el estudio de la distribución de tensiones.

Para Spotts [28], un concentrador de tensión, ~~es~~ es una discontinuidad que altera la distribución de la tensión en inmediaciones de la discontinuidad. Ver anexo N° 3 y

La *concentración de tensiones* es la zona donde se hallan los concentradores de tensiones. Normalmente se define el factor de concentración de tensiones,

como el indicador del incremento de tensiones en la concentración de tensiones+

La concentración de tensiones es un efecto geométrico sumamente localizado.

En algunos casos se puede deber a una grieta superficial, en otros se puede deber a un maquinado no adecuado o a la selección de radios de acuerdo muy bruscos entre superficies vecinas. Si el material es dúctil, la carga estática de diseño, puede generar una fluencia en el punto crítico sobre la muela. Esta fluencia puede conducir a un endurecimiento por deformación del material y a un

incremento de la resistencia de fluencia en tal punto. Suele suceder que siendo las cargas estáticas, la fluencia localizada no conduce a fluencia general y en consecuencia la pieza globalmente puede soportar la sollicitación.

Los factores concentradores de tensión, históricamente han sido y actualmente son muy útiles para poder emplear metodologías de cálculo tradicionales (Resistencia de Materiales) sin incurrir en graves errores de representatividad del estado tensional.

Para la obtención de los factores de concentración de tensiones usualmente se recurría a ensayos de foto-elasticidad o termo-elasticidad radiométrico los cuales son métodos costosos en términos generales. Sin embargo hoy en día con el avance computacional es mucho más fácil y obtener los factores concentradores de tensión mediante el empleo de plataformas de cálculo por elementos finitos bidimensionales y/o tridimensionales, con las cuales se puede hallar en forma precisa el valor de las tensiones en los puntos de interés.

Aun así en casos de importancia superlativa, por el riesgo que implica la mala predicción de los estados de tensiones, se suelen efectuar modelos computacionales de elementos finitos y correlacionarlos con modelos de foto elasticidad a escala o de tamaño real.

Normalmente los factores de concentración de tensiones se condensan en gráficos o ábacos o programas de cálculo para una configuración de sollicitación determinada como es el caso de radios de acuerdo en muescas, fondos de agujeros y chaveteros, entre otros.

Un estado multiaxial de tensiones en un cuerpo, es el estado más general que puede presentarse ante una condición de sollicitación, sin embargo aquel puede reducirse a estados biaxiales o triaxiales. En la práctica, suele ser complejo y hasta a veces imposible idear experimentos que puedan cubrir cada detalle y cada particular combinación de tensiones, puesto que tal circunstancia se debe al extraordinario costo que el procedimiento implica. Por tal razón se necesitan modelos o teorías que permitan evaluar, comparar y relacionar las tensiones tridimensionales con los resultados experimentales del ensayo de tracción típico, cuyo costo es relativamente muy bajo.

#### **1.4 Integridad superficial.**

La calidad se ha convertido en uno de los factores de decisión más importante para elegir entre productos y servicios que compiten. De esta forma, entender y mejorar la calidad es un factor clave que lleva al éxito y permite alcanzar una posición competitiva. Todo esto ha motivado la introducción de nuevas tecnologías a nivel industrial que utilizan máquinas herramientas flexibles que garantizan el aumento de la productividad, la flexibilidad y la exactitud de fabricación. Lo anterior solo es posible con el uso de los últimos adelantos en el campo de la electrónica y la informática.

La especificación y fabricación de superficies de alta calidad requiere la comprensión de la interrelación entre metalurgia, maquinabilidad y ensayos mecánicos. Para satisfacer este requerimiento se ha introducido una disciplina global conocida como Integridad Superficial. La tecnología de la integridad superficial describe y controla todas las posibles alteraciones producidas en una



capa superficial durante la fabricación, incluyendo sus efectos sobre las propiedades del material y el comportamiento de la superficie en servicio. La integridad superficial se consigue mediante la selección y el control de los procesos de fabricación, estimando sus efectos sobre las propiedades significativas de los materiales de trabajo.

La integridad superficial implica el estudio y el control tanto de la rugosidad o la topografía superficial como de la metalurgia superficial. Ambos factores influyen en la calidad de la superficie y de las sub-superficie mecanizadas y se tornan extremadamente significativos al fabricar componentes estructurales que deban soportar elevadas tensiones estáticas y dinámicas. Por ejemplo, cuando la carga dinámica resulta un factor principal en el diseño, la resistencia útil se ve frecuentemente limitada por las características a fatiga de los materiales. Los fallos por fatiga casi siempre se originan en/o cerca de la superficie de un componente; igualmente la corrosión por tensión es también un fenómeno superficial. Por consiguiente, la naturaleza de la superficie desde un punto de vista tanto topográfico como metalúrgico es importante en el diseño y la fabricación de componentes críticos.

Las alteraciones de la integridad superficial más comunes se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Alteraciones mecánicas, entre las que cabe citar las variaciones de dureza, la aparición de grietas y la creación de tensiones residuales.
- Alteraciones químicas que incluyen efectos de corrosión o de contaminación del material de pieza.

- Alteraciones metalúrgicas, entre las que se encuentran la aparición de capa blanca, de inclusiones en el material y los cambios de fase.

### **1.5 Vías para aumentar la resistencia a la fatiga de los componentes mecánicos.**

No siempre es posible cambiar los tipos de cargas ni la magnitud de los esfuerzos por lo que es necesario recurrir a otras vías para aumentar la resistencia a la fatiga de las piezas maquinadas. A continuación trataremos las vías de uso más frecuentes:

#### **La rugosidad superficial.**

La investigación científica en el campo del acabado superficial de piezas, ha generado un creciente interés sobre la calidad de las piezas mecanizadas en las últimas décadas, con un gran esfuerzo para dilucidar sus causas y así predecir sus efectos. Como hay un contacto continuo entre la herramienta y la pieza, donde la primera, es presionada contra la pieza, la cual es más blanda y es encajada por la herramienta si los ángulos son pequeños, produciendo una textura superficial con desviaciones repetitivas y aleatorias. Por otra parte se pueden presentar fallas debido a las grietas, rayas, inclusiones y defectos que se pueden presentar cuando los ángulos son grandes.

La mayor parte de la bibliografía básica consultada sobre los factores que influyen en la rugosidad se resume en el artículo publicado por los ingenieros, Correa [6] donde hacen referencia de los principales investigadores de la rugosidad superficial tales como Boothroyd y Knight, quienes dividieron la rugosidad superficial en, ideal que es el resultado de la geometría de la herramienta y la

velocidad de avance y natural que es el resultado de irregularidades del proceso de corte. Otros aportes de importancia se refieren al arte del proceso de mecanizados como el fresado y torneado y presenta un diagrama de causa y efecto donde refleja todos los factores que influyen en la rugosidad superficial, el cual presenta una similitud en la presente investigación. Ver Figura 1.1



Figura 1.1 Diagrama de causa y efecto de los factores que afectan a la rugosidad superficial.

Una de las formas más usadas para la medición de la rugosidad superficial es la correlación de figuras de speckle según Léger [15]. Este método se basa en que cuando se ilumina una superficie rugosa con un haz láser la luz dispersada presenta una estructura granular, esto es, manchas de luz y oscuridad aleatoriamente distribuidas. A esta figura se la denomina "speckle". Esta es el resultado de la interferencia múltiple de la luz proveniente de cada una de las irregularidades que conforman la superficie óptimamente rugosa. Esto significa

que el patrón de figuras de speckle está íntimamente relacionado con la estructura de la superficie, es decir, que depende de la rugosidad, la longitud de correlación, la reflectividad de la muestra, etc. como también de las condiciones de iluminación de ella. Cuando el ángulo de iluminación varía ligeramente, la figura de speckle no solo se desplaza angularmente sino que los granos de speckle sufren una deformación. Una medida de esa deformación se obtiene comparando los patrones de speckle mediante una operación de correlación antes y después de haber variado el ángulo de iluminación. Los cálculos de la correlación de speckle en función de la variación del ángulo de incidencia están basados en los trabajos de Léger [15] y las modificaciones de Rebollo [24].

En el trabajo de Suresh [29], desarrollan un modelo para predecir la rugosidad superficial en un material de acero templado mediante la metodología de superficie de respuesta y con el apoyo de algoritmos genéticos. Ellos sostienen que, el radio de la nariz de la herramienta para corte, la velocidad de corte, la tasa de alimentación, la dureza del material, el uso de fluidos para corte, la vibración de la máquina herramienta y la profundidad de corte; son los factores que más afectan la rugosidad superficial de la pieza de trabajo.

Por otro lado Zuperl [32], establece un modelo fundamentado en la teoría de redes neuronales, el cual optimiza una función multiobjetivo para mejorar las condiciones de corte de metal en las operaciones de torneado. La función multiobjetivo está compuesta por los siguientes objetivos en conflicto: la tasa de producción, los costos de operación y la calidad del acabado superficial. Este modelo tiene como

variables de entrada la tasa de alimentación, la velocidad y profundidad de corte, y como variables de salida la función rugosidad superficial.

El artículo también presenta un resumen de artículos representativo de investigadores donde se muestran las distintas variables que afectan la rugosidad superficial, técnicas de análisis, procesos aplicados y con qué materiales se han aplicado.

Los procesos de rectificado generan tensiones compresivas en la superficie libre, que se vuelven nulas o tractivas bajo la misma, para posteriormente anularse en el interior del material. Estos procesos no modifican de forma notable la estructura sub-superficial del material.

Para el torneado duro, y dependiendo del estado de la herramienta, pueden obtenerse en la superficie libre tensiones tractivas o compresivas. Inmediatamente bajo la superficie siempre se obtienen tensiones compresivas importantes hasta una profundidad de 50 a 100 ó 200 micrómetros, donde tienden a anularse. Asimismo, el torneado duro genera cambios estructurales notables en la superficie de la pieza mecanizada, observándose en algunos casos la denominada *capa blanca*, de elevada dureza, cuya estructura es nanocristalina.

### **1.5.2 Procesos térmicos como forma de mejorar las características del acero para la fatiga.**

Luego del estudio de las diferentes teorías planteadas de falla por fatiga del material se hace indispensable conocer la estructura del acero como material para la construcción de elementos de máquinas por lo tanto las propiedades físicas de los aceros y su comportamiento a distintas temperaturas dependen sobre todo de

la cantidad de carbono y de su distribución en el hierro según *Metáls Handbook* [2]. Antes del tratamiento térmico, la mayor parte de los aceros son una mezcla de tres sustancias: ferrita, perlita y cementita. La ferrita, blanda y dúctil, es hierro con pequeñas cantidades de carbono y otros elementos en disolución. La cementita, un compuesto de hierro con el 7% de carbono aproximadamente, es de gran dureza y muy quebradiza. La perlita es una profunda mezcla de ferrita y cementita, con una composición específica y una estructura característica, y sus propiedades físicas son intermedias entre las de sus dos componentes.

La resistencia y dureza de un acero que no ha sido tratado térmicamente depende de las proporciones de estos tres ingredientes. Cuanto mayor es el contenido en carbono de un acero, menor es la cantidad de ferrita y mayor la de perlita: cuando el acero tiene un 0,8% de carbono, está por completo compuesto de perlita. El acero con cantidades de carbono aún mayores es una mezcla de perlita y cementita.

Al elevarse la temperatura del acero, la ferrita y la perlita se transforman en una forma alotrópica de aleación de hierro y carbono conocida como austenita, que tiene la propiedad de disolver todo el carbono libre presente en el metal. Si el acero se enfría despacio, la austenita vuelve a convertirse en ferrita y perlita, pero si el enfriamiento es repentino la austenita se convierte en martensita, una modificación alotrópica de gran dureza similar a la ferrita pero con carbono en solución sólida.

El proceso básico para endurecer el acero mediante tratamiento térmico consiste en calentar el metal hasta una temperatura a la que se forma austenita, generalmente entre los 750 y 850 °C, y después enfriarlo con rapidez sumergiéndolo en agua o aceite. Estos tratamientos de endurecimiento, que forman martensita, crean grandes tensiones internas en el metal, que se eliminan mediante el revenido o el recocido, que consiste en volver a calentar el acero hasta una temperatura menor. El recocido reduce la dureza y resistencia y aumenta la ductilidad y la tenacidad.

El objetivo fundamental del proceso de tratamiento térmico es controlar la cantidad, tamaño, forma y distribución de las partículas de cementita contenidas en la ferrita, que a su vez determinan las propiedades físicas del acero.

Hay muchas variaciones del proceso básico. Los ingenieros metalúrgicos han descubierto que el cambio de austenita a martensita se produce en la última fase del enfriamiento, y que la transformación se ve acompañada de un cambio de volumen que puede agrietar el metal si el enfriamiento es demasiado rápido.

Se han desarrollado tres procesos relativamente nuevos para evitar el agrietamiento. En el templado prolongado, el acero se retira del baño de enfriamiento cuando ha alcanzado la temperatura en la que empieza a formarse la martensita, y a continuación se enfría despacio en el aire. En el martemplado, el acero se retira del baño en el mismo momento que el templado prolongado y se coloca en un baño de temperatura constante hasta que alcanza una temperatura uniforme en toda su sección transversal. Después se deja enfriar el acero en aire a lo largo del rango de temperaturas de formación de la martensita, que en la

mayoría de los aceros va desde unos 300 °C hasta la temperatura ambiente. En el austemplado, el acero se enfría en un baño de cal o sal mantenido de forma constante a la temperatura en que se produce el cambio estructural deseado, y se conserva en ese baño hasta que el cambio es completo, antes de pasar al enfriado final.

Hay también otros métodos de tratamiento térmico para endurecer el acero. En la cementación, las superficies de las piezas de acero terminadas se endurecen al calentarlas en compuestos de carbono. Estos compuestos reaccionan con el acero y aumentan su contenido de carbono en su capa superficial.

En la carburización la pieza se calienta cuando se mantiene rodeada de carbón vegetal, coque o de gases de carbono como metano o monóxido de carbono. La cianurización consiste en endurecer el metal en un baño de sales de cianuro fundidas para formar carburos y nitruros. La nitrurización se emplea para endurecer aceros de composición especial mediante su calentamiento en amoníaco gaseoso para formar nitruros de aleación.

## **1.6 El proceso de diseño con el uso de herramientas CAD-CAE.**

La planeación de procesos es la creación de un método particular de fabricación que generalmente comprende cierto número de pasos u operaciones+ según Curtis [6].

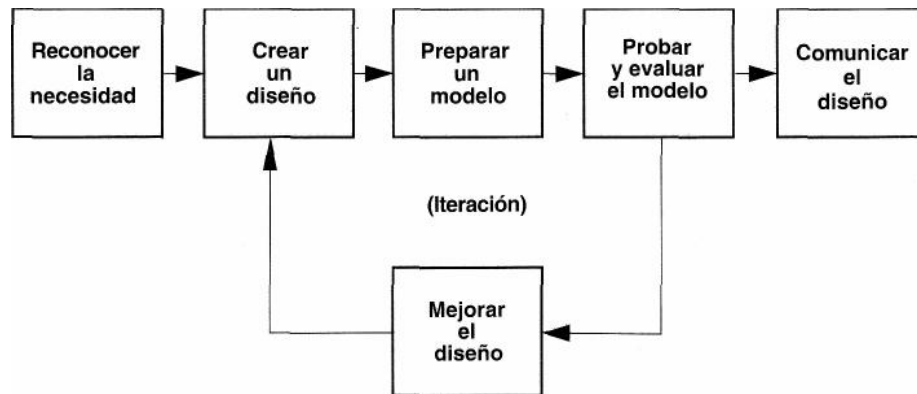
El trabajo de la planeación de un proceso se inicia típicamente con un análisis de los dibujos de ingeniería. El plan del proceso que se obtiene de esta revisión preliminar se considera por lo general como un estimado de costo. Si el estimado



del costo, está dentro de los lineamientos económicos y presupuestarios aprobados, se generará un plan formal y muy detallado del proceso.

En relación al diseño se plantea que es probable que los enfoques en cuanto a diseño tengan que adaptarse para hacerlos compatibles con ciertas industrias y mercados. Por ejemplo, los dispositivos que se incorporan en aeronaves deben ser ligeros, mientras que una pieza de una máquina en una planta de fabricación por lo general no está sujeta a restricciones en cuanto a peso y en relación a los ferrocarriles se toman en consideración en gran medida la seguridad y durabilidad de sus elementos. Las restricciones de este tipo pueden tener consecuencias asombrosas en el proceso de diseño.

Para Spotts [28], es importante que un método racional de diseño sea entendido por los ingenieros. Hay dos razones para esto. La primera es que un método así ayuda a los ingenieros a controlar sus tareas confrontándolas con una vasta información de entrada. La segunda razón es que el uso de un procedimiento común para diseño facilita bastante la interacción entre ingenieros. Si bien el contenido de cada problema de diseño ingenieril es único, la metodología para resolver esos problemas es universal y puede describirse de manera específica. Aunque varias autoridades sobre metodología del diseño han presentado descripciones del proceso, la mayoría de esas descripciones tienden a ser similares. El proceso de diseño, según esas descripciones, implica los seis pasos contenidos en el diagrama de la Figura 1.3.



### 1.6.1 Herramientas CAD.

Los paquetes CAD son la herramienta para la creación de entidades geométricas, isométricas y volumétricas variables enmarcadas dentro de los procesos de administración del ciclo de vida de productos (**Product Lifecycle Management**).

Estos sistemas CAD son básicamente bases de datos de entidades geométricas con la que se puede operar y accionar a través de una interfaz gráfica y variable. Las bases de datos asocian a cada entidad una serie de propiedades como color usuario, capa, estilo de línea, nombre, definición geométrica, entre otros., que permiten manejar la información de forma lógica y vectorial. Además pueden asociarse a las entidades o conjuntos de estas otros tipos de atributos como el costo y tipo de material que permiten enlazar el CAD a los sistemas de gestión y

producción. De los modelos confeccionados se pueden obtener planos con cotas y anotaciones para generar la documentación técnica específica de cada proyecto. En el mercado existen actualmente un numeroso grupo de sistemas CAD de los cuales se hizo un análisis pormenorizado de sus ventajas y desventajas como se muestra en el anexo 5.

### **1.6.2 Herramientas CAE.**

Problemas complejos tales como la difusión del calor, la mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones, el campo electromagnético o la resistencia de materiales no pueden ser resueltos de forma analítica, para formas complejas del objeto o de la aplicación de las cargas. En estos casos los métodos numéricos, y en particular los elementos finitos se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Típicamente el método de los elementos finitos, se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y posteriormente a través de relaciones constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Una importante propiedad del método es la convergencia, si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas la solución numérica calculada, por regla, converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

Para el caso de la evaluación de elementos mecánicos se hace una división del cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos formará una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se va a distinguir una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, además un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos, el conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla. Los cálculos se realizarán sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se va a escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas), la matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema será proporcional al número de nodos.

### **1.7 Proceso de fabricación.**

Los diseños de piezas deben materializarse mediante el empleo de procesos tecnológicos de fabricación. Entre estos procesos se encuentra el maquinado por arranque de virutas el cual se caracteriza principalmente por su alto grado de

flexibilidad y razonable productividad lo cual permite usarlo tanto para producciones individuales como masivas.

Cualquiera que sea el proceso utilizado es necesario garantizar que las desviaciones geométricas y dimensionales obtenidas durante la elaboración se mantengan en un rango de valores que permita una correcta funcionalidad del elemento fabricado según UPIICSA [31]. En este empeño es trascendental la rugosidad superficial obtenida sobre todo por la comprobada influencia que ejerce en la vida útil de piezas sometidas a cargas cíclicas. Para garantizarla es frecuente ejercer un estricto control sobre las siguientes variables: material de la pieza a maquinar, dimensiones y forma de la misma, herramientas y fluido de corte, valores de la velocidad, el avance y profundidad de corte.

Con estas siete variables, se puede obtener un patrón de respuesta que permita indicar cuáles de éstas inciden en el acabado superficial de manera significativa tal como lo plantea en sus estudios generales sobre manufactura, Alting [1], se pueden conseguir las condiciones, individuales o de interacción con las que se logre una superficie que cumpla con los requisitos de diseño.

Durante el proceso de diseño, al no aplicar las reglas de la Ingeniería Concurrente, por lo general no se tiene en cuenta el grado de maquinabilidad de los metales escogidos para fabricar las piezas. Esto en no pocas ocasiones origina que la rugosidad superficial u otro parámetro de salida del proceso de corte no es alcanzable o lo es a un costo inaceptable.

Según Boon [4], el CNC (Control Numérico Computarizado) tuvo su origen a principios de los años cincuenta en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), en donde se automatizó por primera vez una gran fresadora.

Para Martino [18], la Fabricación Asistida por Ordenador ofrece significativas ventajas con respecto a los métodos más tradicionales de controlar equipos de fabricación con operadores humanos. Los equipos CNC (Control Numérico Computarizado) conllevan a la eliminación de los errores del operador y la reducción de los costes de mano de obra. Sin embargo, la precisión constante y el uso óptimo previsto del equipo representan ventajas aún mayores. Por ejemplo, las cuchillas y herramientas de corte se desgastarán más lentamente y se estropearían con menos frecuencia, lo que reduciría todavía más los costes de fabricación. Frente a este ahorro pueden aducirse los mayores costes de bienes de capital o las posibles implicaciones sociales de elevar la productividad con una reducción de la fuerza de trabajo.

La dirección de los equipos CNC se basan en una serie de códigos numéricos, almacenados en archivos informáticos, para controlar las tareas de fabricación. Este Control Numérico por Computadora (CNC) se obtiene describiendo las operaciones de la máquina en términos de los códigos especiales y de la geometría de formas de los componentes, creando archivos informáticos especializados o programas de piezas.

La creación de estos programas de piezas es una tarea que, en gran medida, se realiza hoy día por programas informáticos especiales que crean el vínculo entre los sistemas CAD y CAM.

Según trabajo publicado de Ingeniería Industrial (UPIICSA - IPN) [31], las características de los sistemas CAD/CAM son aprovechadas por los diseñadores, ingenieros y fabricantes para adaptarlas a las necesidades específicas de sus situaciones. Por ejemplo, un diseñador puede utilizar el sistema para crear rápidamente un primer prototipo y analizar la viabilidad de un producto, mientras que un fabricante quizá emplee el sistema porque es el único modo de poder fabricar con precisión un componente complejo.

Para la fabricación de piezas en equipos CNC se encuentran múltiples y variadas herramientas CAM. En el anexo 6 se muestra una gama amplia de estos sistemas así como sus propiedades más notables.

En cuanto al número de piezas a maquinar el control numérico será especialmente interesante cuando las fabricaciones se mantengan en series comprendidas entre 5 y 1.000 piezas que deberán ser repetidas varias veces durante el año.

### **Conclusiones del Capítulo1**

1. El sustituir los cálculos a la fatiga, por la opción de multiplicar por tres o por cuatro los coeficientes de seguridad, comúnmente empleados, trae consigo aumentos innecesarios de los costos y el peso de las piezas.
2. La obtención de los factores de concentración de tensiones por medio de ensayos de foto-elasticidad o termo-elasticidad radiométrico son métodos demasiados costosos, pero aun así se usan en casos de importancia superlativa. Es más común efectuar modelos computacionales de elementos finitos y correlacionarlos con modelos de foto elasticidad a escala o de tamaño real.

3. En la práctica, suele ser complejo y hasta a veces imposible idear experimentos que puedan cubrir cada detalle y cada particular combinación de tensiones. Por tal razón se necesitan modelos o teorías que permitan evaluar, comparar y relacionar las tensiones tridimensionales con los resultados experimentales como el ensayo de tracción típico, cuyo costo es relativamente muy bajo.
4. La especificación y fabricación de superficies de alta calidad requiere la comprensión de la interrelación entre metalurgia, maquinabilidad y ensayos mecánicos.
5. Las dos vías más usadas para mejorar la resistencia de las piezas sometidas a fatiga son el mejoramiento de la rugosidad superficial y los tratamientos térmicos.
6. El esquema de desarrollo mostrado en la figura 1.3 tiene el inconveniente que no tiene en cuenta los aspectos relacionados con los métodos de fabricación.
7. El uso de CNC incide favorablemente en los costos de producción al propiciar la baja de costes de fabricación de muchas máquinas, manteniendo o mejorando su calidad.
8. Los software SolidWorks, CosmoWorks y SurfCam, satisfacen los requisitos para el diseño de piezas cilíndricas.



**CAPITULO II.**

**EVALUACIÓN CAD-CAE DEL DISEÑO Y**

**TECNOLOGÍA CNC DE FABRICACIÓN DEL EJE**

**SOPORTE DEL MOTOR DE TRACCIÓN DE LOS**

**TRENES DE III GENERACIÓN DE LA C.A. METRO**

**DE CARACAS.**

## 2. EVALUACIÓN CAD-CAE DEL DISEÑO Y TECNOLOGÍA CNC DE FABRICACIÓN DEL EJE SOPORTE DEL MOTOR DE TRACCIÓN DE LOS TRENES DE III GENERACIÓN DE LA C.A. METRO DE CARACAS.

Para la elaboración CAD-CAE del diseño y desarrollo de una tecnología CNC es necesario desde el inicio conocer las características del objeto de estudio. En el caso del presente trabajo el objeto de estudio se muestra en la figura 2.1

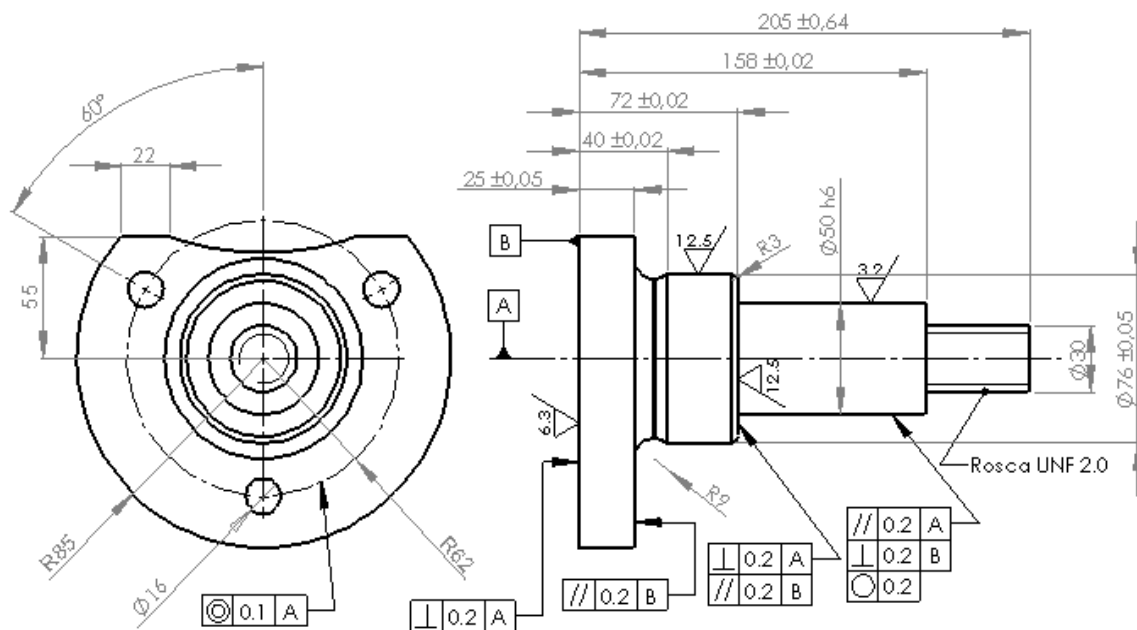


Figura 2.1 Diseño de la pieza y sus atributos.

Para determinar la ubicación y funciones que cumple dentro del sistema el eje soporte se puede observar la figura 2.2, así como en los anexos 7,8 y 9 se dan

más detalles de la ubicación del eje soporte y con ello poder realizar las observaciones pertinentes que para el estudio del eje soporte se deban realizar.

El destino de servicio de este eje soporte puede ser resumido en las funciones siguientes:

- Colaborar en la alineación del motor de tracción; En esta función se puede destacar que por las dimensiones del motor, se hace complicado mantener la alineación del motor por ello se hace necesario la incorporación del eje para mantenerla y de esta forma garantizar el funcionamiento de este.
- Soportar parte del peso del motor de tracción; El motor por su envergadura y posición en el conjunto, es necesario colocarle el mayor número de puntos de apoyos para soportar el peso de éste, pero como se visualiza en el conjunto sólo es posible la colocación de dos, uno en cada uno de sus extremos y el eje soporte es uno de ellos.

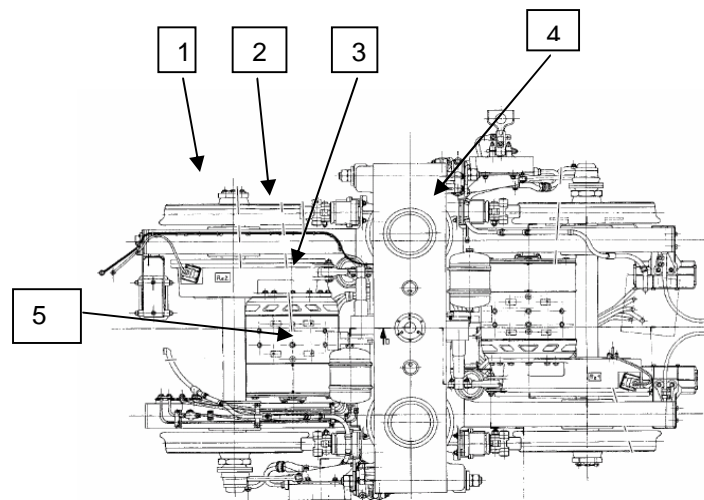


Figura 2.2 Esquema del Boguie de tracción: 1.- Chasis del Boguie; 2.- Caja de transmisión; 3.- Motor Eléctrico de Tracción; 4.- Base para acoplar el Vagón; 5.- Eje Soporte del Motor de Tracción.

- Ayudar a mejorar las condiciones de trabajo del motor; Esta función se deriva de las anteriores, ya que, al colaborar con la alineación y soportar parte de el peso del motor en uno de sus extremos, se puede garantizar que el funcionamiento de este se hará de manera concéntrica, garantizando así que el motor mantenga sus parámetros de trabajo.

#### **Condiciones a las que se encuentra sometido el Eje Soporte:**

- Esfuerzos Estáticos Verticales: Producto del peso físico del motor.
- Esfuerzos Cíclicos: Producto del movimiento del vagón.
- Acción Corrosiva: producto de estar dicho eje instalado en un ambiente abierto.

Las características físicas-geométricas del eje soporte del motor en líneas generales son las siguientes:

Eje con tres escalones con diámetros de 170mm, 76mm, 50mm y 40mm.

- Tiene una longitud total de 205 mm.
- Su cara de acople con el motor cuenta con tres agujeros de 16 mm a 120° uno del otro, partiendo uno de ellos del eje central de coordenadas.
- En su extremo va roscado con rosca diámetro 30 mm paso 2 UNF.
- El material de construcción es acero AISI 1045.

Para el análisis de este elemento se tomó como punto de partida los 6 pasos propuestos en la página 25. En el presente trabajo aunque ya existe el diseño y el modelo, no se conocen los resultados de las pruebas del mismo por lo que esta será la primera tarea. Por otra parte antes de dar por aprobado el diseño se incorpora otro paso que es la verificación preliminar para garantizar que la

propuesta es viable desde el punto de vista del proceso de fabricación. Por lo anterior la propuesta es la mostrada en la figura 2.3.

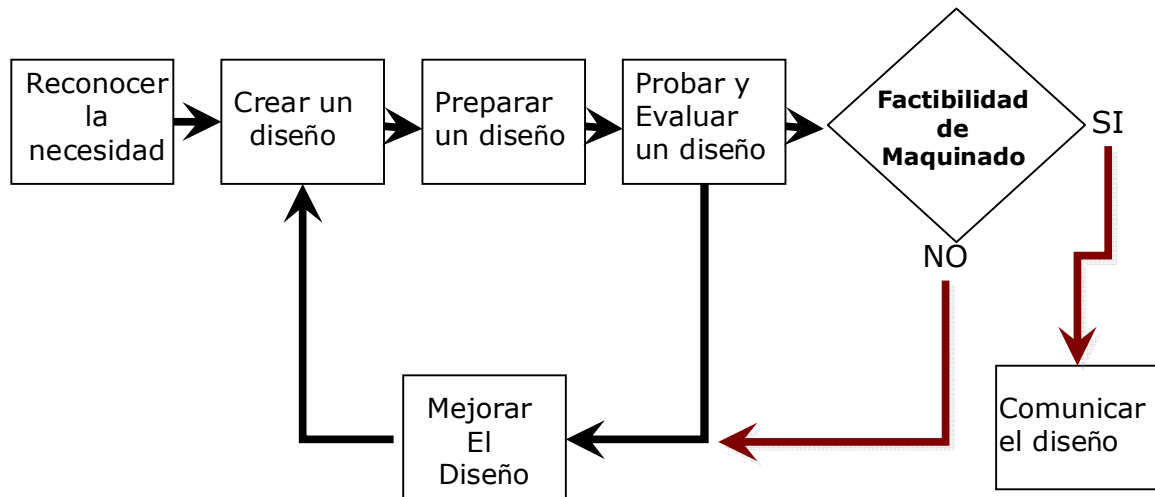


Figura 2.3 Pasos para el proceso de diseño

## 2.1 Evaluación CAD-CAE.

Todo proceso de diseño requiere del conocimiento de las restricciones y criterios de evaluación que sirven de guía para la toma de decisiones para lograr si no el mejor diseño el que más se le aproxime con el fin de maximizar los beneficios y reducir al mínimo las desventajas.

Para el caso del análisis del eje soporte se estableció la siguiente lista de restricciones y criterios evaluativos los cuales serán tenidos en cuenta en el mismo orden de aparición:

- Seguridad.
- Rendimiento (el grado en el que el diseño satisface el destino de servicio).

- Confiabilidad (una alta probabilidad de que el diseño cumplirá con la vida útil o la excederá).
- Facilidad para fabricar.
- Disponibilidad de servicio o reemplazo de componentes.
- Facilidad en cuanto a operación.
- Costo inicial bajo.
- Costos de operación y mantenimiento bajos.
- Tamaño reducido y de poco peso.
- Uso de materiales accesibles y facilidad de compra de componentes.
- Que su aspecto resulte atractivo y adecuado para su aplicación.

Del análisis efectuado en el Capítulo 1 se pone de manifiesto que los diversos paquetes CAE existente en el mercado son capaces de ejecutar con similar eficiencia los cálculos por elementos finitos. Esto conduce al hecho de que la selección del sistema a usar queda subordinado a dos factores fundamentales; profesionalidad en el uso del sistema y autorización legal para usarlo. En el caso de este trabajo estas dos condiciones están dadas en los paquetes SolidWorks y CosmoWorks.

En este caso se tienen las características geométricas, del material y el destino de servicio del Eje Soporte del Motor de la III Generación de los trenes de Metro de Caracas con lo cual, podemos iniciar con el estudio bajo el método por Elemento Finitos, utilizando el paquete CAD/CAE SolidWorks / CosmoWorks, para ello se establecerán ciertos parámetros como lo es el modelado del Eje Soporte con todas sus características geométricas, material según lo especificado en el diseño,

también realizar un análisis del montaje de la pieza para inferir las condiciones a las que se encuentra sometido. Con estos elementos y aplicando el método por elemento finitos se podrá determinar, con cierto grado de exactitud, el comportamiento del Eje Soporte al momento en que éste se encuentre cumpliendo con su destino de servicio.

Para la determinación de las cargas actuantes sobre el soporte del eje soporte del motor de tracción, se realiza el diagrama del cuerpo libre del mismo, se presenta un esquema del montaje del eje soporte para así poder determinar los esfuerzos a los que está sometido el eje así como las reacciones que a ese esfuerzo se oponen.

Para confeccionar el diagrama de cuerpo libre se tomó las distancias de cada elemento para poder resolver la ecuación de equilibrio que se obtiene a partir del mismo, que a continuación se presenta. Ver Figura 2.4.

Datos:

- Longitud del Motor de Tracción = 600 mm (tomado directamente sobre el montaje del motor de tracción y caja reductora).
- Peso del Motor de Tracción = 665 Kg. Ver anexo 10
- Distancia entre el punto de acople del motor con el eje soporte y el punto de acople con la caja de Transmisión = 645 mm (tomado directamente sobre el montaje del motor de tracción y caja reductora)
- Distancia entre la cara de acople del eje soporte con el motor de tracción y el centro del soporte del eje = 114 mm. Ver figura 2.1

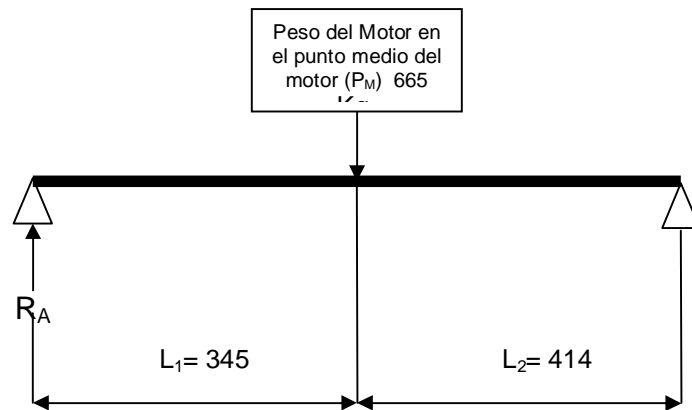


Fig.2.4 Esquema de análisis del sistema eje soporte . motor

La ecuación que determinará la reacción  $R_A$  (Punto de acople de la caja con el motor) que se genera en el diagrama de cuerpo libre que se presenta es:

$$R_A (L_1 + L_2) - P_M (L_2) = 0 \Rightarrow R_A = P_M (L_2) / (L_1 + L_2) \quad (1)$$

Obteniéndose:

$$R_A = 665 \text{ Kg} \times 414 \text{ mm} / 345 \text{ mm} + 414 \text{ mm} \Rightarrow R_A = 362.72 \text{ kgf}$$

## 2.2 Confección del modelo de análisis por elementos finitos sometido a cargas estáticas.

Para la confección del modelo de análisis por elementos finitos se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de análisis: El análisis utilizado para el modelo del eje soporte del motor es un análisis de carga estática, para con ello iniciar la evaluación del diseño e ir conformando el análisis por elementos finitos del eje soporte del motor de tracción.
- Tipo de elemento finito: El tipo de elemento finito seleccionado es del tipo sólido tetraédrico, esta selección es la más adecuada para el modelo que se está



evaluando, ya que éste tipo de elemento es el previsto para la evaluación de sólidos.

- Asignación del material: el material seleccionado para el modelo es el indicado en el plano el cual es un acero al carbono AISI 1045, tipo de modelo del material es Isotrópico elástico lineal y las características mecánicas del material se presentarán a continuación. Ver tabla 2.1.
- Colocación de las cargas y restricciones: Luego de la presentación del montaje del eje soporte del motor de tracción y la presentación del diagrama de cuerpo libre donde se asignan las cargas, las reacciones y puntos de apoyo, ver figura 2.4 y 2.5, es posible asignar las cargas y restricciones, donde la carga está determinada por el peso del motor de tracción, la reacción a esta carga ( $R_A$ ) está determinada por el acoplamiento con la caja reductora, el estudio se hace al comportamiento del eje, el cual está sometido a las cargas del peso del motor y a las vibraciones que dicho carga ejerce en el momento en que el tren está en movimiento, la opción indicada para realizar este estudio es el de cargas del tipo remota, que posee el software CosmoWorks, definidas por las distancias a las cuales están dispuestas. La restricción al modelo está determinada por el soporte al cual esta acoplado el eje lo cual la restricción es del tipo inamovible sin traslación, este soporte por su configuración permite cierto grado de rotación pero no permite su traslación, todo ello nos permite asignar los parámetros a los que se debe evaluar el diseño para distinguir lo antes expuesto Ver tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características mecánicas del material.

Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	2.05e+011	N/m <sup>2</sup>	Constante
Coeficiente de Poisson	0.29	NA	Constante
Módulo cortante	8e+010	N/m <sup>2</sup>	Constante
Densidad	7850	kg/m <sup>3</sup>	Constante
Límite de tracción	6.25e+008	N/m <sup>2</sup>	Constante
Límite elástico	5.3e+008	N/m <sup>2</sup>	Constante
Coeficiente de dilatación térmica	1.15e-005	Kelvin	Constante
Conductividad térmica	49.8	W/(m.K)	Constante
Calor específico	486	J/(kg.K)	Constante

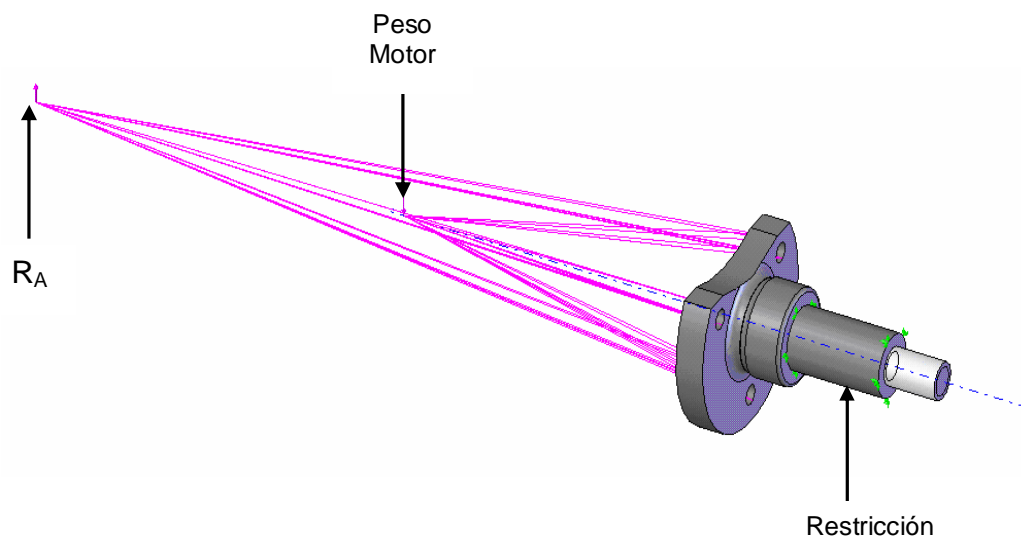


Figura 2.5 Colocación de cargas y restricciones

- Mallado del modelo: Para la discretización del modelo se asumieron los siguientes criterios
- Tipo de malla: malla con elementos sólidos tetraédricos de alto orden con 10 nodos por elemento, este tipo de elemento es el más idóneo para mallar un elemento sólido con variaciones curvas en su geometría. La información general

de la malla y las consideraciones que para ella se asumieron se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Detalles del mallado del modelo del soporte.

Tipo de malla:	Malla con elementos sólidos tetraédricos
Mallador utilizado:	Estándar
Transición automática:	Activar
Superficie suave:	Activar
Verificación jacobiana:	4 Puntos
Tamaño de elementos:	9.5172 mm
Tolerancia:	0.47586 mm
Calidad:	Alta
Número de elementos:	16957
Número de nodos:	25881

En la Figura 2.6 se muestra el modelo del soporte mallado.

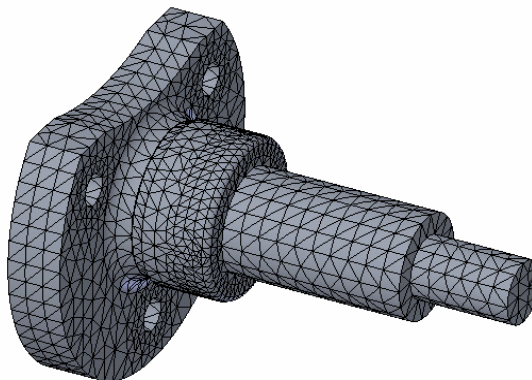


Figura 2.6. Discretización del modelo del Eje Soporte del Motor de Tracción

Una vez aplicadas al modelo las condiciones de bordes correspondientes se procede a ejecutar el análisis estático del mismo, utilizándose el revolvedor de sistemas de ecuaciones FFEPlus que viene incluido en el paquete de CosmoWorks, obteniéndose la distribución isocromática de la tensiones de Von Mises ver figura 2.7.

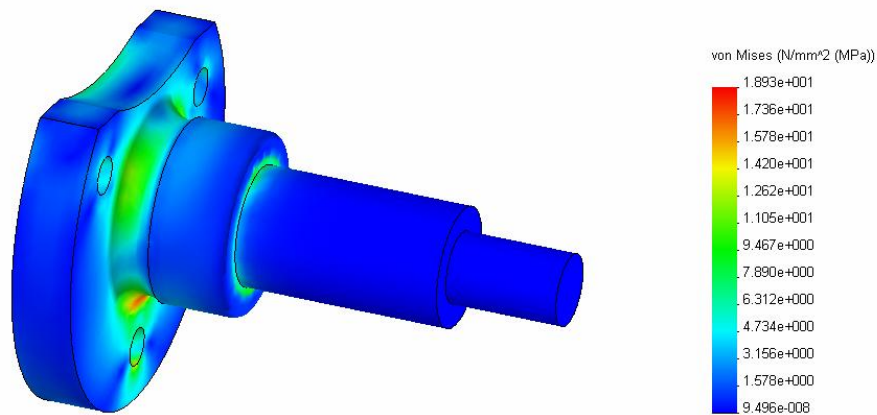


Figura 2.7 Distribución isocromática de las tensiones estáticas de Von Mises.

La representación de los desplazamientos resultantes producto a las cargas actuantes puede apreciarse en la figura 2. 8

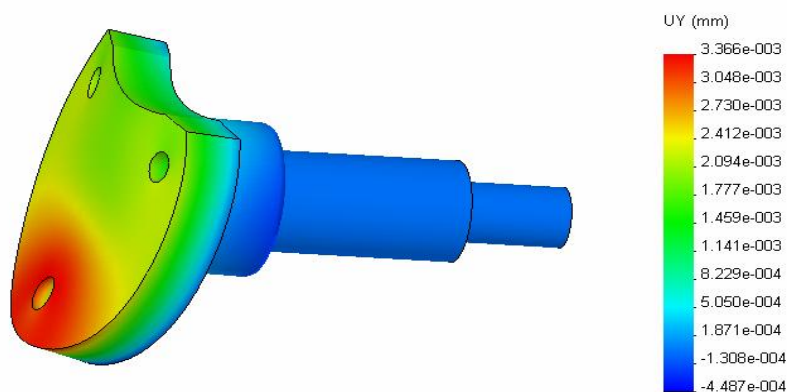


Figura 2.8 Desplazamientos resultantes en el eje soporte del motor de tracción.

La convergencia del mallado se efectuó variando el tamaño del elemento desde 9,51 mm (predeterminado), a la mitad del tamaño del elemento verificando el resultado de las tensiones máximas para cada caso ver figura 2.9 a y b. En la tabla 2.3 se recogen estos valores numéricos.

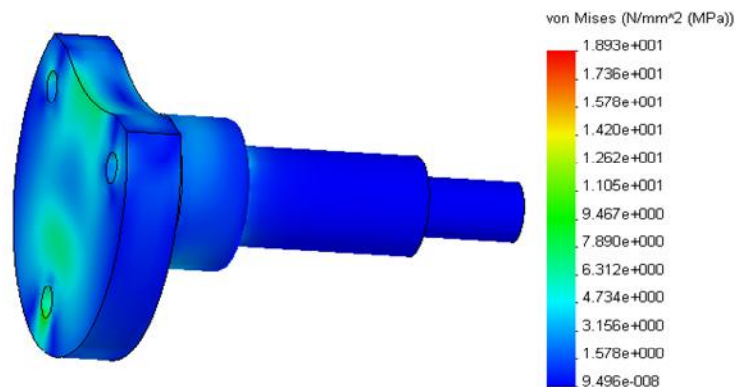


Figura 2. 9 a Tamaño de los elementos en la malla 9,51mm.

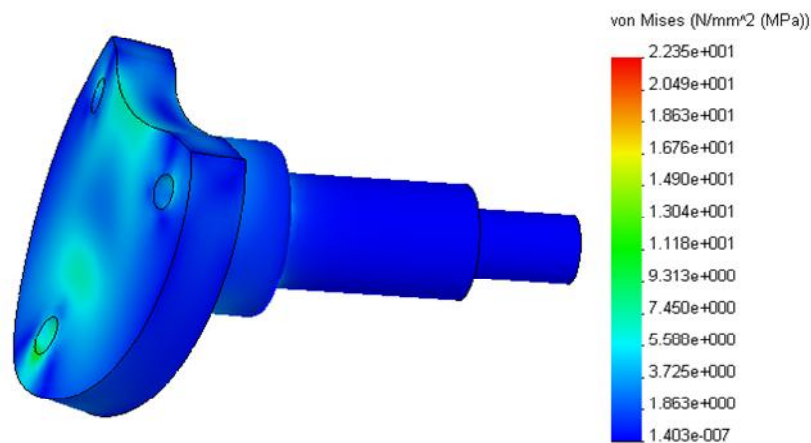


Figura 2. 9b Tamaño de los elementos en la malla 4,755 mm

Tabla 2.3 Valor de las tensiones máximas con diferente tamaño en el mallado.

Tamaño del elemento (mm)	Tensión máxima (MPa)
9,51 (con transición automática del mallado)	18,93
4,755 (con transición automática del mallado)	22,35

Para realizar la validación del modelo es necesario además realizar el cálculo de las reacciones en los apoyos para el modelo con diferente tamaño de malla, resultados que pueden apreciarse en la Tabla 2.4

Tabla 2.4 Valor de las reacciones respecto a la variación del tamaño del elemento.

Tamaño elemento (mm)	Reacción resultante (kgf)
9,51	302,27
4,755	302,44

### 2.3 Análisis de las tensiones pseudodinámicas

Para la valoración de la resistencia y la rigidez de los nuevos modelos desde las etapas tempranas de diseño, es necesaria la introducción en los modelos físico-matemáticos de análisis, las cargas estáticas multiplicadas por los respectivos coeficientes dinámicos, obtenidos de las evaluaciones experimentales de modelos de máquinas análogos según Estrada [10].

El coeficiente dinámico de las cargas se determina por la expresión

$$K_{din}^{max} = \frac{a_{max}}{a_{est}} \quad (2)$$

En el caso de las aceleraciones verticales

$$a_{max} = a_{est} + a_{din}^{max}$$

donde:

$a_{est}$  - valor estático de las aceleraciones ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).

$a_{din}^{max}$  - valor instantáneo máximo de la aceleración obtenida durante las pruebas extensométricas de campo. Dato obtenido del informe de análisis dinámico de la vía férrea línea I de C.A. Metro de Caracas (2004), en la investigación: extensométrica donde se utilizó un sistema de adquisición de datos para ruedas con placas instrumentadas versión 4.3.0 de T.T.C.I. [21], determinándose el valor máximo de las aceleraciones que se producían en el sistema de rodaje del Bogue igual a **5 g**.

El coeficiente dinámico máximo según la expresión (2) será igual a 6g.

Por lo que al despejar de la ecuación (1) se obtiene el valor de las cargas máximas

$$Q_{max} = K_{din}^{max} \circ Q_{est}$$

Con lo cual el peso del motor y la reacción en A quedan multiplicados por este coeficiente dinámico.

El análisis de las tensiones pseudodinámicas del modelo en función de las tensiones de Von Mises presenta los siguientes resultados: tensión máxima de 134,1 MPa y una tensión mínima de 16,67 MPa (ver figura 2.10)

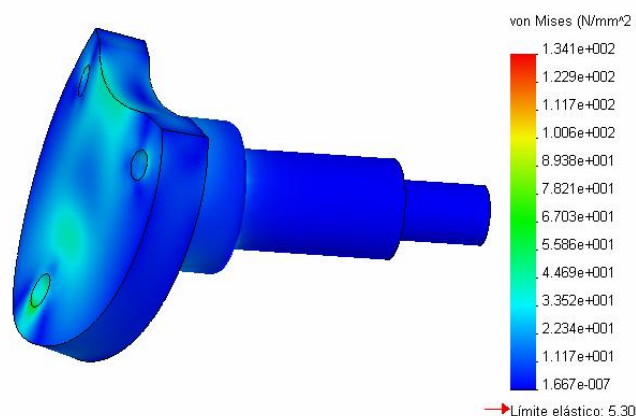


Figura: 2.10 Estado tensional en el eje soporte del motor bajo cargas máximas.



Los desplazamientos resultantes que se producen en el soporte bajo la acción de las cargas dinámicas son de 0,062 mm. Ver Figura 2.11.

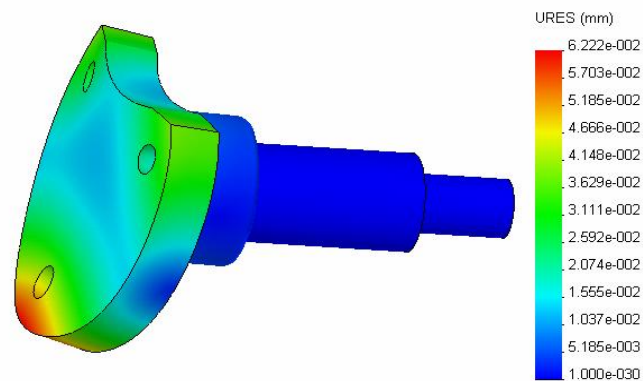


Figura 2.11 Desplazamiento en el Eje Soporte del Motor bajo cargas dinámicas.

## 2.4 Clasificación de las Superficies según su Designación

A continuación se presenta la clasificación de las diferentes superficies de la pieza según su designación en consecuencia del destino de servicio del eje soporte para ello se utiliza la clasificación de la superficie, en fundamental, auxiliar, ejecutiva o libre. En la figura 2.12 las superficies del eje soporte del motor según su designación son:

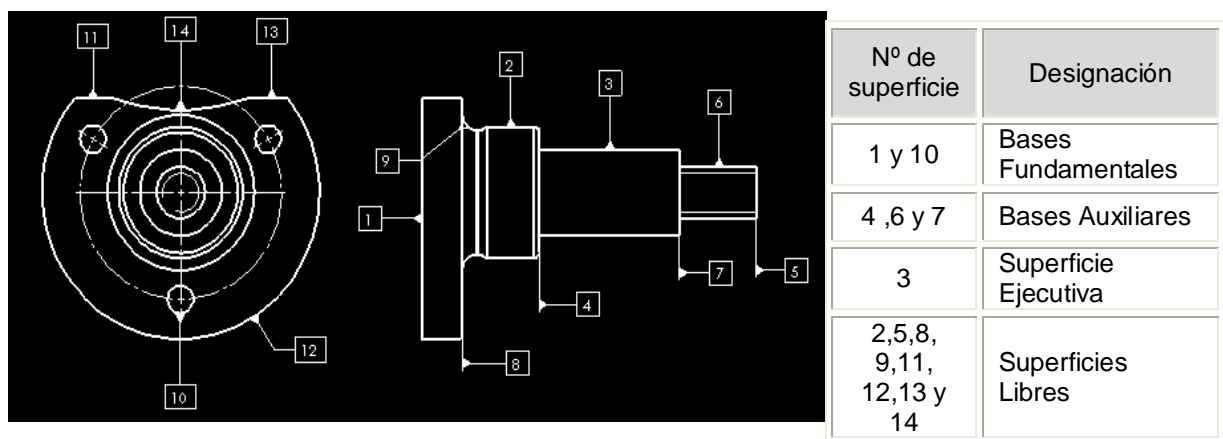


Figura 2.12 Clasificación de las superficies según su designación



## 2.5 Clasificación de las bases atendiendo a la cantidad de grados de libertad que eliminan

En la figura 2.13 se muestran la forma de eliminación de los grados de libertad tanto para el montaje del eje en el motor (color rojo) como en el torno (color verde) para su maquinado.

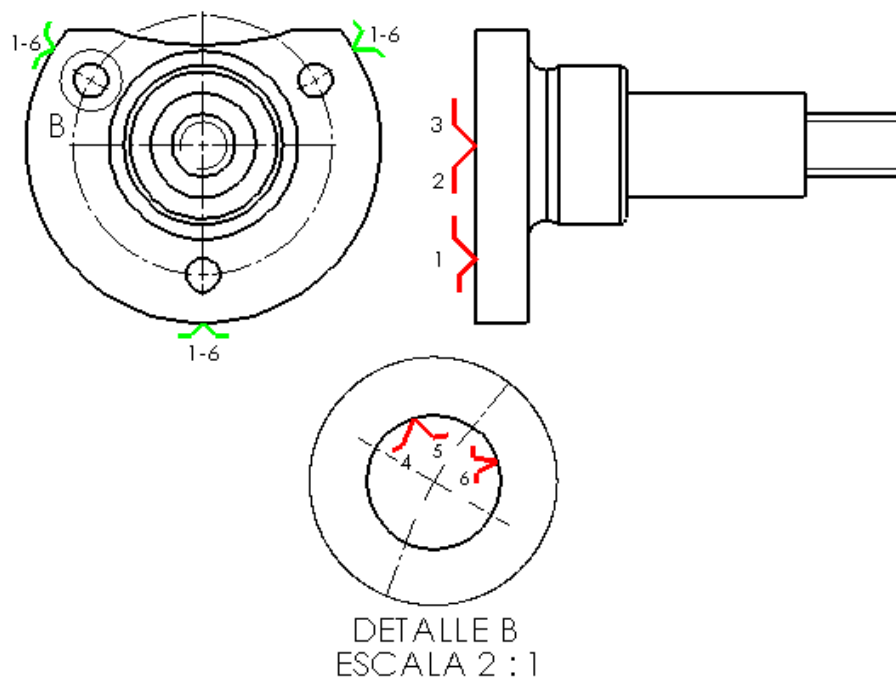


Figura 2.13 Clasificación de las bases de construcción.

En el caso del montaje de la pieza para su maquinado en el torno usando como dispositivo el plato autocentrante de tres mordazas la eliminación de la rotación en el eje longitudinal del torno se considera eliminada, aunque la pieza rote, pues la pieza con respecto al plato queda inmóvil.

## **2.6 Procesos tecnológicos empleados para la obtención de la pieza en bruto, para la fabricación del Eje Soporte del Motor.**

La selección del proceso tecnológico es un factor importante para la funcionalidad y factibilidad de manufactura a bajo costo de cualquier producto. Se debe establecer una división entre los requisitos funcionales, por un lado, y las consideraciones de costo, por el otro. Y con ello decidir tomar decisión sobre el proceso tecnológico más adecuado según sea el caso que se presente, siempre considerando la factibilidad de fabricación, según Bralla [5].

La cita anterior refuerza la apreciación que los procesos de fabricación son procesos técnicos económicos. En este sentido juega un papel primordial la selección de la pieza en bruto como lo son la soldadura, fundición, deformación de metales sea con presión en frío o en calor, entre otros.

Existen diversos métodos de obtención de las piezas en bruto. Para definir el método de obtención más conveniente para este caso se establece los siguientes criterios:

- Material de la pieza
- Tipo de producción.
- Forma, dimensiones, peso y exactitud de las superficies.
- Esfuerzos a los que está sometida la pieza y condiciones de trabajo.
- Coeficiente de aprovechamiento del material de la pieza en bruto.

Los resultados arrojaron que no obstante lo bajo del coeficiente de aprovechamiento del material la variante recomendable es la pieza en bruto

laminada dado fundamentalmente porque la cantidad de piezas a fabricar no justifican económicamente la construcción de moldes o matrices y la naturaleza del material no es aconsejable para la fundición de piezas tan pequeñas y con sección tan diferentes en magnitud.

## 2.7 Determinación de la pieza.

Según las dimensiones aportadas por el vendedor el diámetro de la pieza en bruto es de 170 mm. La longitud se determina por las dimensiones del plano más el sobre material para el refrentado. Longitud = 205 + 10 = 210 mm.

Para determinar el volumen de la pieza en bruto se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_p = S \cdot L = (\pi \cdot r^2) \cdot L \quad (3)$$

donde: S = sección transversal de la pieza

L = longitud de la pieza que para este caso es de 210 mm

r = 85 mm

$$V_p = \pi \times 85^2 \times 210 = 4766592.6 \text{ mm}^3 = 4.77 \text{ dm}^3$$

Densidad para los aceros ( ) = 7.85 kg /dm<sup>3</sup>

$$M_{pb} = 4.77 \text{ dm}^3 \times 7.85 \text{ kg/dm}^3 = 37.45 \text{ Kg}$$

donde: M<sub>pb</sub> = Masa de la pieza en bruto

Teniendo el peso de la pieza en bruto se determina el tamaño de la pieza a partir de la tabla 2.5, donde por el peso de la pieza en bruto del eje soporte y utilizando los parámetros indicados por la tabla se clasifica como tamaño de pieza grande.

Tabla 2.5 Clasificación de las piezas según su peso

Tamaño de las piezas		
Pequeñas	Medianas	Grandes
Hasta 3 kg	Hasta 10 kg	10 Kg en adelante

## 2.8 Determinación del tipo de Producción.

Para la determinación del tipo de producción juega un papel primordial la cantidad de piezas a fabricar que en este caso se calcula de la siguiente forma.

Los trenes de la Línea II son de seis (6) Vagones y cada vagón cuenta con dos (2) Bogue y cada Bogue lleva dos motores eléctricos, por lo tanto cada tren de la III generación lleva 24 motores de tracción y por ende cada motor necesita un Eje soporte. La Línea II del sistema Metro de Caracas cuenta con un total de 20 trenes, por lo tanto se puede deducir que para dicho tren se requieren de ciento cuarenta y cuatro (144) Ejes Soportes, si se supone que se haga la solicitud de fabricar un lote de ejes para todos los trenes de la línea que es de 144 piezas, se puede definir que la producción es una producción en serie grande, esto tomando en cuenta el peso de la pieza, ver la tabla 2.6

Tabla 2.6 Clasificación del tipo de producción según el tamaño de la pieza y el número de piezas a elaborar en un año.

Tipo de producción	Cantidad de piezas a elaborar en el año, de una misma denominación y dimensión.		
	Clasificación según su peso.		
	Grandes	Medianas	Pequeñas
Individual	5	10	100
En serie	5 . 1000	10 . 5000	100-50000
En masa	1000	5000	50000
Tipo de producción	Cantidad de piezas en lote.		
	Clasificación según su peso.		
	Grandes	Medianas	Pequeñas
<b>Pequeñas</b>	5-10	10-30	100-300
<b>Medianas</b>	11 . 50	31 . 200	301-1000
<b>Grandes</b>	50	200	1000

## 2.9 Cálculo de la Magnitud del Lote:

Para determinar la magnitud del lote a fabricar se utiliza la siguiente expresión:

$$N = V \cdot T \div D_T \quad (4)$$

Donde: V = volumen de producción

T = días de reserva en el almacén

D<sub>T</sub> = días de trabajo al año

Sabiendo que: V = 144 piezas

T = 30 días

D<sub>T</sub> = 281 días

Sustituyendo en la expresión (4):

$$N = 144 \cdot 30 / 281 = 15,37 \text{ piezas}$$

Redondeando el resultado anterior obtenemos que el tamaño del lote sea de quince (15) piezas. El tamaño del lote es una referencia para determinar la cantidad de piezas a fabricar en cada ajuste de la máquina garantizando, que satisfaga tanto las necesidades tecnológicas como las económicas del eje soporte de motor de tracción y con ello pudiésemos ofrecer un servicio que estaría cercano al justo a tiempo.

## 2.10 Coeficiente de Aprovechamiento del Material de la Pieza en Bruto (A):

Uno de los mejores indicadores económicos en el maquinado es el coeficiente de aprovechamiento del material de la pieza en bruto el cual se calcula según la siguiente expresión:

$$A = (M_{pt} \div M_{pb}) \cdot 100 \quad (5)$$

Donde:  $M_{pt}$ : masa de la pieza terminada.

$M_{pb}$ : masa de la pieza en bruto

$$M_{pt} = V_{pt} \cdot \rho \quad (6)$$

Donde:  $\rho$  = Densidad del acero

$V_{pt}$  = Volumen total de la pieza terminada y se determina por:

$$V_{pt} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (6a)$$

$V_1, V_2, V_3, V_4$  = volúmenes unitarios.

Los volúmenes unitarios se corresponden con los sectores mostrados en la figura

2.14

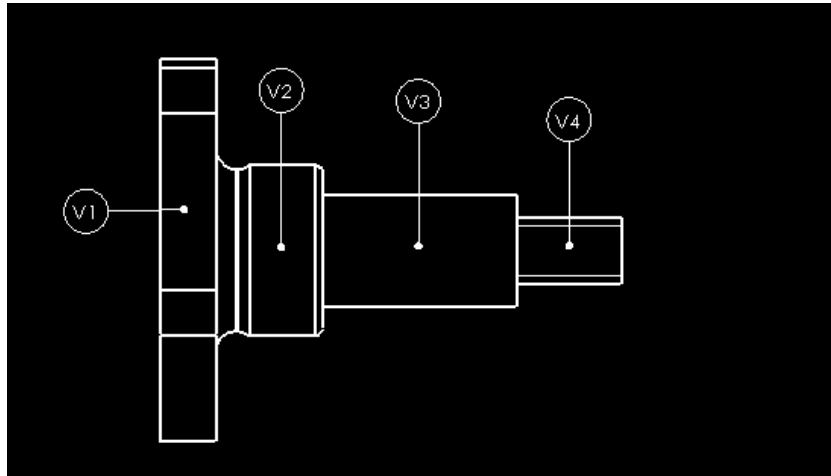


Figura 2.14 Distribución de las secciones de la pieza para calcular el volumen total de la pieza terminada

Para calcular los volúmenes (de un cilindro) unitarios se utiliza la ecuación (7):

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot l \quad (7)$$

Los valores para cada variable se tomaron de la figura 2.1.

Sustituyendo en (7) se obtienen los siguientes valores:

$$V_1 = 3,1416 \cdot 7225 \cdot 25 = 567451,5 \text{ mm}^3 = 0,57 \text{ dm}^3$$

$$V_2 = 3,1416 \cdot 1444 \cdot 47 = 213214,1 \text{ mm}^3 = 0,21 \text{ dm}^3$$

$$V_3 = 3,1416 \cdot 625 \cdot 86 = 168861 \text{ mm}^3 = 0,17 \text{ dm}^3$$

$$V_4 = 3,1416 \cdot 225 \cdot 47 = 33222,42 \text{ mm}^3 = 0,04 \text{ dm}^3$$

Sustituyendo en (6a), (6) y (5) obtenemos:

$$V_{pt} = 0,99 \text{ dm}^3$$

$$M_{pt} = 0,99 \text{ dm}^3 \cdot 7,85 \text{ kg} / \text{dm}^3 = 7,77 \text{ kg}$$

$$A = (7,77 \div 37,45) \cdot 100 = 20,75 \%$$

El resultado obtenido indica que el coeficiente de aprovechamiento del material es el 20,75.

### **2.11 Pasos Tecnológicos para cada Superficie del Eje.**

Para determinar cuál será el paso tecnológico más adecuado para la elaboración de una superficie es necesario tener en cuenta varios aspectos como son: tipo de superficie según su geometría, IT de fabricación y la rugosidad superficial que se requiere para que esta pieza cumpla su destino de servicio. Teniendo en cuenta estos aspectos es necesario definir cuál es la máquina herramienta más adecuada para llevar a cabo la acción necesaria. Definidos estos aspectos se procede a decidir cuáles serán los pasos tecnológicos necesarios para alcanzar la meta propuesta en los planos de diseño. Estos pasos se muestran en la tabla 2.7.

Los pasos descritos en la tabla 2.7 son de vital importancia en la organización del proceso de maquinado pues permiten efectuar el balance de carga del taller en cuestión y además definir la posibilidad real de efectuar dicho trabajo.

La máquina que se utilizará será el Torno Gildemeister CTX 400 Serie 2 V3 ubicado en los patios y talleres del metro ~~%as~~ Adjuntas+ perteneciente al laboratorio de tecnologías de fabricación del IUTOMS.

### **2.12 Elección de las bases tecnológicas y establecimiento de las rutas tecnológicas**

Para ejecutar cada paso tecnológico es necesario la instalación de la pieza en la máquina herramienta por lo que se hace imprescindible la selección de la bases de las pieza que serán utilizadas para realizar esta función. Estas son las llamadas bases tecnológicas. La mejor variante de selección será aquella que cumpla con los dos principios básicos de los procesos de maquinado; unidad y coincidencia de las bases. En el caso del torneado esta base será la número 12.



En la tabla 2.7 se muestran los pasos tecnológicos necesarios para elaborar cada una de las superficies del eje soporte.

Tabla 2.7 Pasos Tecnológicos para cada Superficie del Eje.

No. Superficies.	Grado de Exactitud.	Rug. Superficial.	Tipo de Superf.	Método de Elaboración.
1	IT 10	6.3	PLANA	REFRENTADO DE DESBASTE REFRENTADO DE ACABADO
2 y 9	IT 12	12.5	CILINDRÍCA	TORNEADO DE DESBASTE TORNEADO DE ACABADO TORNEADO DE REDONDEO
3	IT 10	3.2	CILINDRÍCA	TORNEADO DE DESBASTE TORNEADO DE SEMIACABADO TORNEADO DE ACABADO
4, 7 y 8	IT 12	6.3	PLANA	REFRENTADO DE DESBASTE REFRENTADO DE ACABADO
5	IT 12	12.5	PLANA	REFRENTADO DE DESBASTE REFRENTADO DE ACABADO
6	IT 11	6.3	ROSCADA	TORNEADO DE DESBASTE ROSCA CON CUCHILLA
10	IT 12	12.5	AGUJERO	TALADRADO CON BROCA < DIA TALADRADO CON BROCA DE=DIA (REALIZADO EN FRESADORA)
11, 13 y 14	IT 12	12.5	PLANA	FRESADO DE DESBASTE FRESADO DE ACABADO
12	IT 14	25	CILINDRÍCA	SIN MECANIZADO

En la tabla 2.8 se muestra la ruta tecnológica de la fabricación del eje soporte. En ella está contenida la relación paso tecnológico-máquina y el orden real en que estas se ejecutaran.

Tabla 2.8 Establecimiento de la ruta tecnológica

<b>Material</b> <b>Ac</b> 1045 (calibrado)	<b>Carta de ruta</b>	<b>Eje Soporte</b> (motor de tracción)	<b>Masa (Kg.)</b> 7.77
<b>Operación</b>	<b>Denominación</b>	<b>Equipo</b>	
005	Torneado de desbaste Refrentar caras laterales Torneado de acabado refrentar caras laterales	Torno Gildemeister CTX 400 Serie 2 V3	
010	Taladrar orificio de centro	Torno Gildemeister CTX 400 Serie 2 V3	
015	Torneado desbaste cilindr Torneado de acabado cilindr	Torno Gildemeister CTX 400 Serie 2 V3	
020	Torneado acabado refrentar	Torno Gildemeister CTX 400 Serie 2 V3	
025	Torneado de acabado redondeo	Torno Gildemeister CTX 400 Serie 2 V3	
030	Torneado desbaste cilindr Torneado de semi acabado cilindr Torneado de acabado cilindr	Torno Gildemeister CTX 400 Serie 2 V3	
035	Torneado acabado refrentar	Torno Gildemeister CTX 400 Serie 2 V3	
040	Torneado de desbaste cilindr Torneado de acabado cilindr Roscado con cuchilla	Torno Gildemeister CTX 400 Serie 2 V3	
045	Taladrado de desbaste agujeros de fijación Taladrado de acabado agujeros de fijación	Centro de Mecanizado Deckel Maho DMC 103 V	
050	Fresado de desbaste de la semicircunferencia de la base Fresado de acabado de la semicircunferencia de la base	Centro de Mecanizado Deckel Maho DMC 103 V	
055	Perforado de desbaste de agujeros de fijación Perforado de acabado de agujeros de fijación	Centro de Mecanizado Deckel Maho DMC 103 V	

### 2.13 Elección de las Herramientas de Corte:

Uno de los elementos principales para determinar las herramientas de corte es el tipo de material y el tipo de paso tecnológico a realizar. El material, seleccionado, (AISI 1045) Las herramientas recomendadas para este material según la Norma ISO están identificadas por la letra **P** y el color azul, básicamente para torneado en general con materiales acero, acero fundido, fundición maleable, entre otras.

La geometría y calidad de plaquita se selecciona según el manual de Sandvik en base al material y a los pasos tecnológicos de la operación. Para el acero AISI 1045 estas son las palquitas recomendadas por Sandvik, utilizando el programa de selección CoroGuide, relacionadas directamente con el tipo de operación que se va a realizar. En este caso como la primera operación a realizar en el paso 005 es el refrentado, se hace la selección como indica el siguiente cuadro. Ver figura 2.15. En él se aprecia que primero es necesario elegir el área de mecanizado y dentro de cada una de ellas especificar la operación que se desea efectuar para luego definir el mango la plaquita y el modo de sujeción.

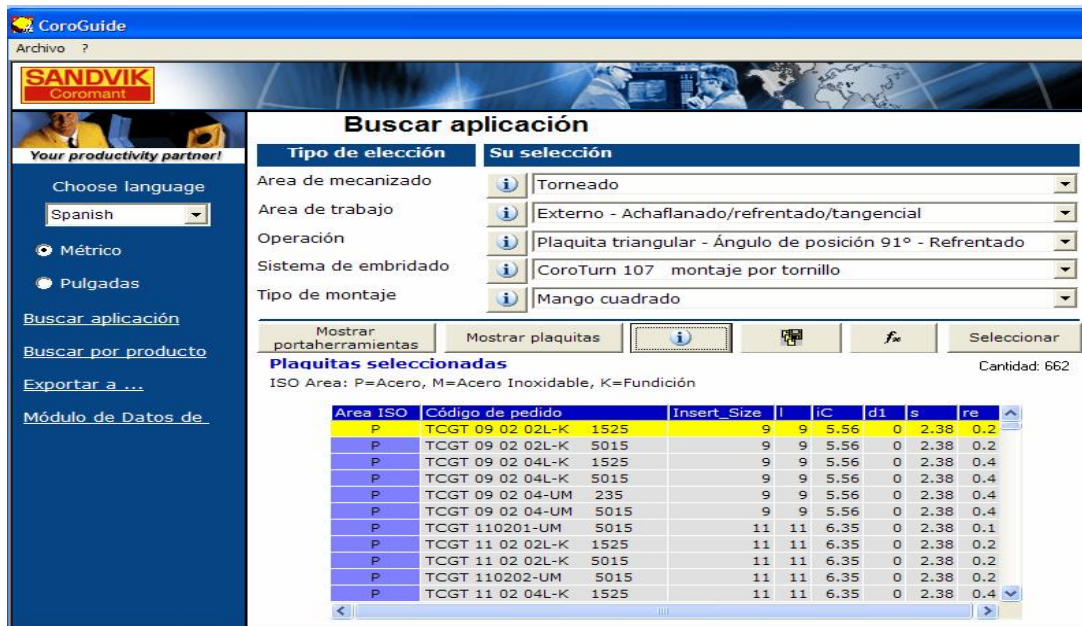


Figura 2.15. Selección de la plaquita según el material a maquinar.

En la figura 2.16 se muestra la plaquita obtenida y las características dimensionales y geométricas de la misma destacándose la longitud de los filos el espesor y el ángulo de posición .

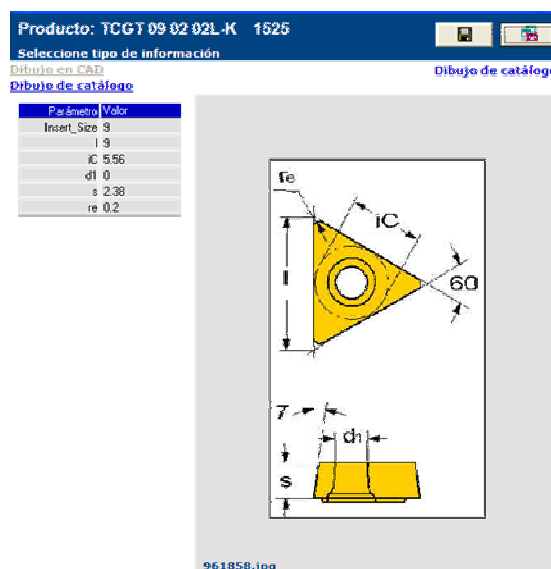


Figura 2.16 Geometría de la plaquita seleccionada.

De la misma forma se elige el portaherramientas según la recomendación de Sandvik. Ver figura 2.17.

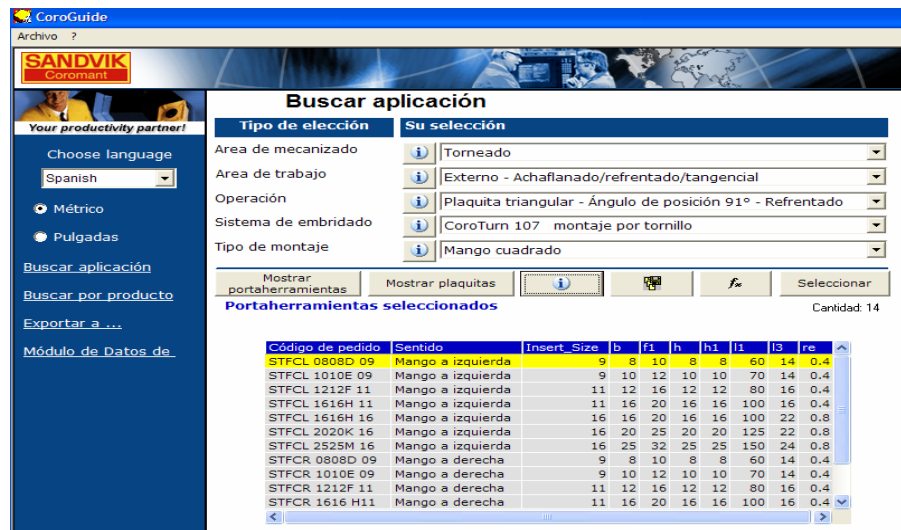


Figura 2.17 Características del portaherramientas

A continuación se muestra la geometría del portaherramientas. Ver figura 2.18.

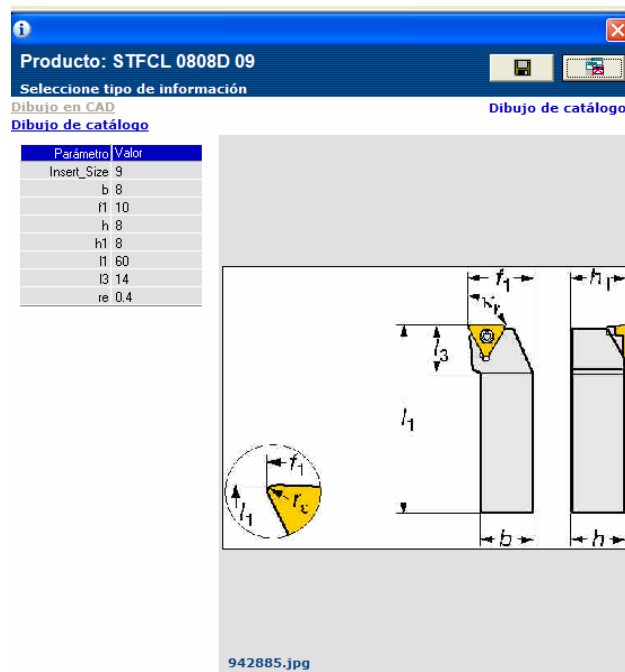


Figura 2.18 Geometría del porta herramienta.

A continuación las diferentes herramientas que fueron elegidas para el maquinado del eje. Ver tabla 2.9

Tabla 2.9 Selección de las herramientas para el maquinado del eje.

Herramienta N°	Especificación
1	Refrentado (como se indicó anteriormente)
2	Taladrado de centro (broca de centrado N° 6)
3	Torneado Externo longitudinal (herramienta para decoletaje 80° CCGT09T308-UM 5015 y portaherramientas izquierda SCACL 1616m09-S)
4	Torneado Externo Perfilado Longitudinal (plaquita en forma de $\frac{1}{4}$ ángulo 107° 30q portaherramientas izquierda C4SVHBL-27050-16, para dar acabado en la sección N° 3 y redondeo)
5	Torneado Externo Roscado (métrica 60°, plaquita p. L166.06 16mm01-200 225, portaherramientas R166 4.FG 2020-16)
6	Taladrado, Brocas Enterizas Soldadas (taladrado general, Coro Drill Delta . CR840 refrigerante externo, mango cilíndrico Códigos: R840-0800-50 AOA, R840-1210-50 AOA, R840-1600-30-AOA)
7	Fresado General en Escuadra, Fresa filo largo, T-Max Varilock (R 215.3-63 V80 76-23)

## 2.14 Cálculo de Régimen de Corte para Cada Herramienta.

En esta etapa del trabajo también es muy útil el software en línea de CoroGuide.

Una vez seleccionadas las herramientas correspondientes accedemos al módulo de cálculo de datos de corte. En la figura 2.19 se muestran las variables de entrada y de salida de este software como variable de entrada están el material, características de la plaquita así como de régimen de corte. Como resultado se obtienen un grupo significativo de informaciones relacionadas con el proceso de corte entre las que se encuentra potencia neta, velocidad de corte, rugosidad superficial, entre otros.

Figura 2.19. Datos para la operación de refrentado.

## 2.15 Cálculo del tiempo útil de trabajo y Potencia consumida.

Para el cálculo del tiempo por pasada ( $T_{PS}$ ) se utiliza la expresión (8) y esto se debe realizar para todos los pasos tecnológicos que se deben realizar para la fabricación del eje soporte, se presentará como ejemplo el mecanizado de desbaste de la superficie 2, en vista que es la más representativa por ser la que más pasadas hay que realizar, con el cálculo de este de este tiempo por pasada lo que se busca es deducir el tiempo principal ( $T_p$ ) que se lleva la ejecución de un paso tecnológico



$$T_{ps} = L \div (S \cdot \omega) \quad (8)$$

Donde: L = Longitud a mecanizar

S = Avance de la herramienta

= Velocidad angular (rpm)

Sustituyendo en (8)

$$T_{ps} = 76 \text{ mm} / 0,4 \text{ mm/min} \cdot 440 = 0.45 \text{ min}$$

Para calcular el tiempo principal ( $T_p$ ) se debe multiplicar el tiempo de pasada ( $T_{ps}$ ) por el número de pasadas. Ver tabla 2.10 y 2.11

Luego de calcular todos los parámetros anteriores se está en condiciones de definir con exactitud las condiciones reales para la fabricación del Eje Soporte y con ello poder transferir al SurfCam el modelo de la pieza donde éste hará un análisis del diseño Ver Anexo 11 y luego de introducir los datos obtenidos el software CAM va a desarrollar los códigos, que a posterior se le transferirán a la máquina CNC. Ver Anexo 12.

En las tablas 2.10 y 2.11 se muestran los resultados de los regímenes de corte y de los tiempos principales para el torneado y el fresado respectivamente



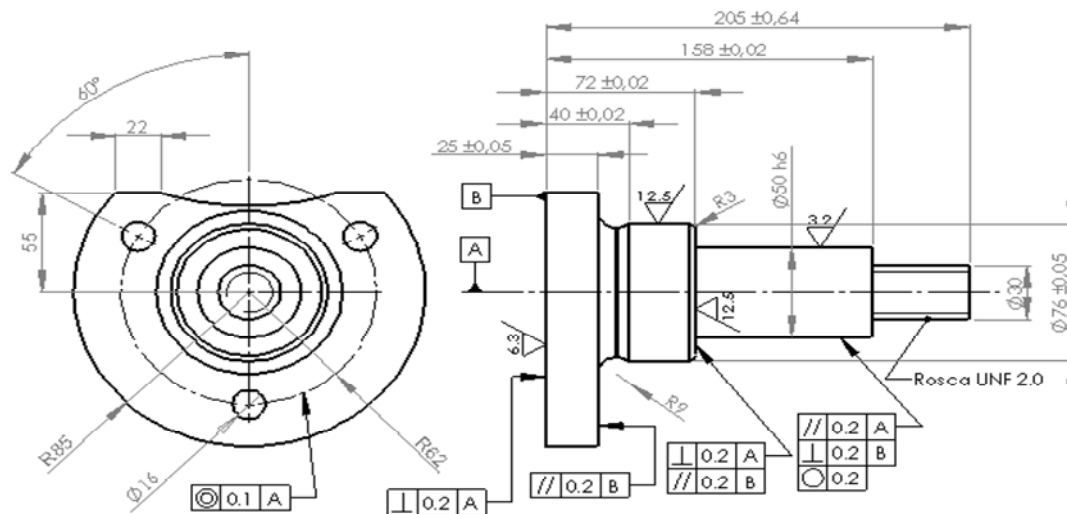


Tabla 2.10 Calculo del tiempo útil para el torneado.

Nombre de la Pieza: Eje soporte del Motor		Denominación: Torneado		Máquina-Herramienta: Torno Gildemeister CTX 400 Serie 2 V3				
Nº	Contenido de los pasos tecnológicos	Herramienta	Régimen de corte					Norma de tiempo
			l	t	s	n	Vc	T <sub>p</sub>
A	Pre Procesado							
005	Refrentado Superficie Nº 1 garantizando una long. de 207.5±0.63	1	1	2.5	0.25	243.41	130	0.16
B	Colocar la pieza							
010	Taladrado Superficie Nº 6	2	1	3	0.4	850	8	0.08
015	Desbaste Superficie Nº 2 garantizando Ø 78 ± 0.5	3	37	2.5	0.4	440	130	11.84
020	Acabado Superficie Nº 2 garantizando Ø 76 ± 0.5	3	1	1.5	0.2	540	130	0.44
025	Desbaste Superficie Nº 3 garantizando Ø 53 ± 0.5	3	9	2.5	0.4	780	130	2.52
030	Semiabado Superficie Nº 3 garantizando Ø 51 ± 0.5	3	1	2.5	0.2	810	130	0.53
035	Acabado Superficie Nº 3 garantizando Ø 50± 0.01	4	1	1	0.05	827	130	3.93
040	Desbaste Superficie Nº 4 garantizando Ø 40± 0.5	3	4	2.5	0.2	1034	130	0.92
045	Refrentado Superficie Nº 6 garantizando una long. de 205±0.63	1	1	2.5	0.2	1034	130	0.92
050	Roscado Superficie Nº 5	5	2	0.5	0.15	250	12	2.50

Tabla 2.11 Cálculo del tiempo útil para el Fresado.

Nombre de la Pieza: Eje soporte del Motor		Denominación: Fresado		Máquina-Herramienta: Centro de Mecanizado Deckel Maho DMC 103 V				
Nº	Contenido de los pasos tecnológicos	Herra mient a	Régimen de corte					Norma de tiempo
			l	t	s	n	Vc	Tp
C	Colocar la pieza							
055	Taladrado Superficie Nº 6	7	3	8	0.4	250	130	0.24
060	Desbaste Superficie Nº 2 garantizando Ø 78 ± 0.5	8	8	3	0.4	500	130	4.4

La suma de las columnas correspondientes a los tiempos principales tanto del torneado y del fresado se muestran a continuación:

Tiempo principal total para el torneado = 23, 84 min.

Tiempo principal total para el fresado = 4.64 min

Tiempo total de fabricación = 28.18 min = 30 min para asegurar el tiempo de cambio de herramienta.

## Conclusiones del Capítulo 2

1. En el proceso de diseño se hace indispensable la verificación de la factibilidad preliminar del proceso de fabricación como se muestra en la figura 2.3.
2. El empleo de las herramientas de diseño en 3D y de análisis por elementos finitos, permiten realizar una evaluación del comportamiento resistivo del eje soporte del motor de tracción de los trenes de la tercera generación de la C.A. Metro de Caracas, determinando los valores máximos de las tensiones y

desplazamientos que se producen en el mismo por la acción de las cargas actuantes, así como las zonas donde se producen las mismas posibilitando modificaciones y el perfeccionamiento de este.

3. La región donde aparecen los valores máximos de las tensiones coincide con la zona donde aparecen las roturas en el eje soporte fabricado, lo cual corrobora también la validez del modelo de análisis confeccionado.

4. El valor máximo de las tensiones que aparecen en el modelo es de 134, 1 MPa. Este valor de tensiones es inferior en un 78, 5 % el valor de las tensiones últimas del Acero AISI 1045, igual a 625 MPa, lo cual es indicativo de que las roturas que se producen en el eje soporte no son bruscas, concluyéndose que la rotura ocurre por el proceso de fatiga.



**PDF**  
Complete

*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

## **CAPITULO III.**

### **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### **3. Análisis de los resultados.**

#### **3.1 Validación del modelo numérico del eje soporte del motor de tracción.**

Para garantizar que los resultados de la aplicación de un método CAE sea válido es necesario que el modelo físico . matemático que se construya, se corresponde lo más exactamente posible con el objeto real. Existen diferentes parámetros que son necesarios evaluar para poder validar el modelo de cálculo por elementos finitos, uno de ellos es la convergencia del mallado. Existen diferentes vías para lograr la convergencia del mallado o discretización del modelo, esto puede realizarse de modo manual o utilizando, los métodos H Adaptativo, P Adaptativo o una combinación de estos.

En este caso de manera manual se procedió a la disminución del tamaño a partir de un modelo con 9,51 mm y otro con 4,75 mm, los resultados de las tensiones de von Mises para cada caso aparecen en la Tabla 2.3, donde para un tamaño de elemento 9,51mm se obtuvo un tensión máxima de 18,93 MPa y para un tamaño de elemento de 4,755 mm se obtuvo una tensión máxima de 22,35 MPa, obteniéndose un error relativo entre los resultados igual a un 15,3 %.

Otro de los parámetros que es necesario analizar para comprobar la validez del modelo, es la correspondencia entre los valores de la resultante de las cargas, o su componente en cada eje, y las correspondientes reacciones sumatorias que surgen en los nodos de apoyo, estos resultados pueden apreciarse en la Tabla

2.3, obteniéndose un error relativo máximo de un 0,05 %, lo que según, Ichenko [13], Luconin [16] y Miachenkov [20], es aceptable para la utilización de elementos tetraédricos de los modelos por elementos finitos de equipos móviles.

Con estos resultados se considera válido el modelo y se pasó a realizar el análisis resistivo del eje soporte con un tamaño del elemento finito original de 4,75 mm, de esta forma se obtuvo un modelo con 351.221 nodos y 256.756 elementos.

### **3.2 Resultados del análisis de la resistencia y rigidez del eje soporte del motor de tracción**

Las tensiones máximas de Von Mises que se producen en el eje soporte del motor de tracción producto a la acción de las cargas actuantes multiplicadas por el coeficiente dinámico tienen un valor de 134, 1 MPa localizadas en la zona del radio de acuerdo de la parte estrecha del eje soporte a la placa del eje donde se colocan los tornillos de sujeción del motor de tracción (Ver Figura 3.1).

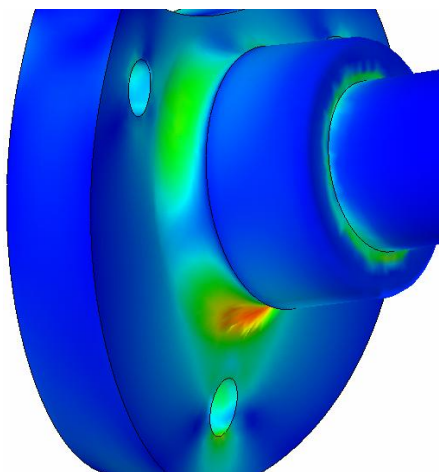


Fig. 3.1 Zona de tensiones máximas en el eje soporte del motor.

La región donde aparecen los valores máximos de las tensiones coincide con la zona donde ocurren las roturas en dicho eje soporte (Ver figura 3.2)



Figura 3.2 Imagen de zona de roturas que aparecen en el eje soporte.

El valor de tensiones máximas obtenidas es de 134.1 MPa, este valor de tensiones es inferior en un 78, 5 % al valor de las tensiones últimas del Acero AISI 1045, igual a 625 MPa, lo cual es indicativo de que las roturas que se producen en el eje soporte no son bruscas, concluyéndose que la rotura ocurre por el proceso de fatiga, apareciendo una grieta progresiva que irá creciendo y al alcanzar su tamaño crítico producirá la rotura del eje soporte

El valor máximo de los desplazamientos vertical en el eje z que se produce en el soporte es de 0,062 mm, valor considerado lo suficientemente pequeño, muestra de la rigidez del eje.

Está vigente por tanto la necesidad de tomar diferentes medidas para mejorar la resistencia a la fatiga del soporte, con vistas a alargar su vida útil, pudiendo ser estas medidas metalúrgicas de deformaciones plásticas, mejoramiento de la rugosidad superficial recubrimiento metálicos y otros.

### **3.3 Resultados del análisis de la tecnología de fabricación del eje soporte del motor de tracción.**

Para la selección de la pieza en bruto se hizo el análisis de las diferentes variantes tecnológicas que para el objeto de estudio se conocen, como lo son el método del conformado de metales por presión, la fundición y la soldadura.

En el caso del conformado de metales por presión, existen numerosos métodos pero en el análisis preliminar que se efectuó se excluyen varios de ellos por impracticables como es el caso del trefilado y la extracción, quedando como variantes más probables el estampado y la forja libre.

En el caso de la forja libre se desestimó como variante para la obtención de la pieza en bruto por que en este proceso no es posible garantizar las tolerancias dimensionales necesarias.

Quedando como variante posible el estampado, al observar la geometría de la pieza, como se muestra en la figura 3.3



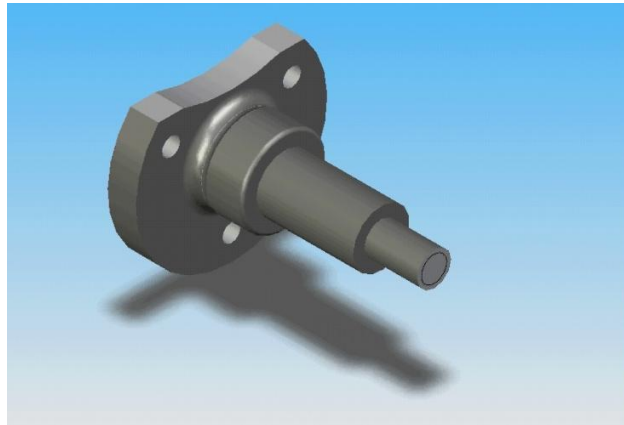


Figura 3.3 Geometría del eje soporte del motor

Se determina que la pieza en bruto requerida para la fabricación del eje soporte debe tener una geometría aproximada a la presentada en la figura 3.4.

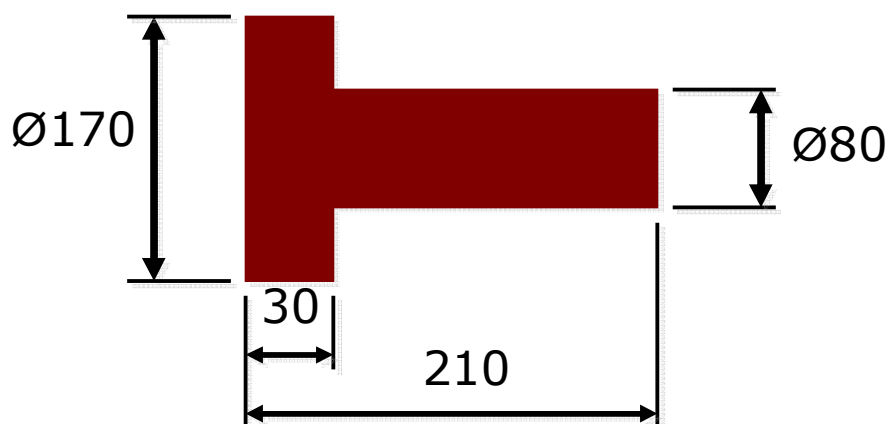


Figura 3.4 Geometría de la pieza en bruto obtenida del estampado

La revisión preliminar arroja la necesidad de al menos 3 pasos para la obtención de dicha pieza desde un material base aproximadamente con un diámetro de 178 mm por una longitud que se debe calcular.

De la búsqueda en Internet y las cotizaciones solicitadas en empresas ubicadas en Caracas que se dedican al ramo de la fabricación de moldes, se obtuvo que

estas estampas no se fabrican nacionalmente y que similares no costarían menos de \$12.000, 00 por cada una.

Análisis similares se ejecutaron para los procesos tecnológicos de fundición y soldadura los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Comparación entre los diferentes métodos de obtención de la pieza en bruto	
MÉTODO	RESULTADO
Laminado	$C_4 = 4 * 449,40 = 1.797,60 \text{ BsF}$ $C_{144} = 144 * 449,4 = 64.713,60 \text{ BsF}$
Estampado	\$ 36.000,00 = 77.400,00 BsF
Fundición	Tecnológicamente impracticable
Soldadura	El modelo difiere radicalmente

Como conclusión de los análisis antes expuestos la variante más adecuada es la obtención de la pieza en bruto laminada

La selección de la superficie número 12 como superficie tecnológica garantiza el cumplimiento de los dos principios fundamentales del proceso tecnológico por arranque de virutas, como son la unidad y coincidencia de las bases.

La utilización del software SurfCam garantizó la obtención del programa CNC correspondiente el cual se ejecutó satisfactoriamente. Las líneas de programación se encuentran en el anexo 12.

Otra herramienta computacional que fue de gran ayuda es el software en línea para la selección de la herramienta y parámetros de corte de la firma Sandvik denominado CoroGuide.

### 3.4 Análisis económico de la fabricación del eje soporte del motor

Los costos asociados a la fabricación del eje soporte de motor de tracción de los trenes de III generación de la C.A. Metro de Caracas lo se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$C_{Fab} = C_{Mp} + C_{mo} + C_{Acc} \quad (9)$$

Donde:  $C_{Fab}$  = Costo de fabricación

$C_{Mp}$  = Costo de la materia prima

$C_{mo}$  = Costo mano de obra

$C_{Acc}$  = Costo accesorios

Se conoce que la pieza en bruto se obtiene a partir de una sección de barra laminada de  $\phi$  170 x 210 mm de acero 1045, con una masa de  **$M_{pb} = 37.45$  kg** obtenida de la ecuación (4).

Se calculará el costo de fabricación para una (01) pieza.

Con la siguiente ecuación se calcula el costo de la materia prima ( $C_{Mp}$ )

$$C_{Mp} = M_{pb} \times C_{Mat} \quad (10)$$

$$C_{Mp} = 37.45 \text{ Kg.} \times 12.0 \text{ BsF/Kg.} \Rightarrow$$

$$C_{Mp} = 449.4 \text{ BsF}$$

Donde:  $C_{Mat}$ : Costo por kg de material de acero AISI 1045 es de 12,0 BsF/Kg. Obtenido de lista de precio de proveedor nacional

Para determinar los costos por concepto de mano de obra ( $C_{mo}$ ) es necesario conocer el proceso tecnológico de maquinado de forma detallada. El operario de la Máquina Herramienta CNC será un Técnico Superior Universitario (TSU), y el valor del tiempo unitario ( $T_u$ ) utilizado para la fabricación de la pieza es de 30 min. O lo que es igual a 0,5 horas.

$$C_{mo} = C_{hh} \times T_u \times N_H \quad (11)$$

Donde:  $C_{hh}$  = Costo hora hombre

$N_H$  = Número de hombre a utilizar para el trabajo

Tomando en cuenta el costo de la hora hombre para un TSU es de 9.09 Bs/hr

$$C_{mo} = 0.5 \times 9,09 \Rightarrow$$

$$C_{mo} = 4,54 \text{ BsF}$$

Los costos accesorios ( $C_{Acc}$ ) comprenden básicamente el consumo de herramientas de corte, dispositivos elaborados o adquiridos especialmente para la fabricación de la pieza, consumo energético y otros. Por esta razón el  $C_{Acc}$  se puede expresar bajo la siguiente ecuación:

$$C_{Acc} = C_H + C_D + C_E \quad (12)$$

Donde:  $C_H$ : Costo de herramientas de corte

$C_D$ : Costo en dispositivos para fijar la pieza en bruto

$C_E$ : Costo por consumo energético de la máquina

Para calcular el costo de herramientas de corte, se calcula el número de piezas que se pueden maquinar con cada una de ellas, posteriormente se divide el costo entre el número de piezas maquinadas y ese será que se cargue al costo final.

$$C_H = C_{H1} + C_{H2} + C_{H3} + \dots + C_{Hn} \quad (13)$$

Los costos se muestran en la tabla 2.12.

Tabla 2.12 Costos de la herramientas de corte.

Nº	Descripción de la Herramienta	P/U (BsF)	% de desgaste por pieza	BsF Por pieza
C <sub>H1</sub>	Porta Inserto refrentado y desbaste exterior	322,89	0.01	3,23
C <sub>H2</sub>	Inserto para desbaste exterior	36,89	100	36,89
C <sub>H3</sub>	Porta Inserta para acabado exterior	374,57	0.01	3,75
C <sub>H4</sub>	Insertos para acabado exterior	73,78	26.2	19,33
C <sub>H5</sub>	Porta Inserta para roscado exterior	427,32	0.01	4,27
C <sub>H6</sub>	Insertos Paso 2.0 ER	49,55	16,66	8,25
C <sub>H7</sub>	Broca de centro	30,00	0,02	0,06
C <sub>H8</sub>	Fresa de vástago de $\phi$ 14	560,00	4,3	18,48
C <sub>H9</sub>	Broca de $\phi$ 16	48,00	2,3	1,11

Costo total en herramientas para cada eje soporte = 91,26 BsF

El porcentaje de desgaste de las herramientas se determinó, aplicando la regla de duración de su filo que determina el fabricante, en este caso en particular la duración del filo es de 15 min. Por lo tanto al saber el tiempo principal total ( $T_p$ ) de cada una de ellas, se puede determinar el porcentaje de desgaste así como al tener el costo unitario, se calcula cuánto es el porcentaje en BsF asignado a la fabricación de un eje soporte de motor.

El costo de dispositivos para la fijación ( $C_D$ ) correspondiente a la pieza se considera igual cero, por no necesitar dispositivos especiales para la fijación.

El costo por consumo eléctrico ( $C_E$ ) se determina de la manera siguiente:

$$\text{Potencia neta } P_c = (V_c \cdot s \cdot t \cdot K_{c0,4} / 60 \cdot 10^3) (0,4/s \cdot \text{sen } k_r)^{0,29}$$

$K_{c0,4}$  = Fuerza específica de corte para un espesor de viruta de 0,4 para cada material según tablas de Sandvik para el acero 1045  $K_{c0,4} = 2100 \text{ Nw/mm}^2$

$$P_c = (301,44 \cdot 0,25 \cdot 3 \cdot 2100 / 60 \cdot 10^3) (0,4 / 0,25 \cdot \sin 93^\circ)^{0,29} = 4.65 \text{ KW}$$

$$C_E = P_c \times P_{Ene} \times T_u \quad (14)$$

$$C_E = 4.65 \times 0,45 \times 0.5$$

$$C_E = 1,05 \text{ BsF}$$

donde:  $P_c$ : Potencia consumida en el proceso de maquinado del eje en la variante de mayor consumo.

$P_{Ene}$ : Precio de un kw/h de energía;  $P_{Ene} = 0,45 \text{ BsF/Kw.h}$

$T_u$ : Tiempo unitario invertido para la pieza;  $T_u = 0.5 \text{ h}$

Según la ecuación (10) el  $C_{Acc}$  será:

$$C_{Acc} = 91,26 + 0 + 1,05 \Rightarrow C_{Acc} = 92,31 \text{ BsF}$$

Entonces, finalmente el Costo asociado a la fabricación del eje soporte del motor

$$C_{Fab} = C_{Mp} + C_{mo} + C_{Acc} \quad (8):$$

$$C_{Fab} = 449.4 + 4,54 + 92,31 \Rightarrow$$

$$C_{Fab} = 546,25 \text{ BsF}$$

## CONCLUSIONES

1. El empleo de las herramientas de diseño en 3D y de análisis por elementos finitos, permiten realizar una evaluación del comportamiento resistivo del eje soporte del motor de tracción de los trenes de la tercera generación de la C.A. Metro de Caracas, determinando los valores máximos de las tensiones y desplazamientos que se producen en el mismo por la acción de las cargas actuantes, así como las zonas donde se producen las mismas posibilitando modificaciones y el perfeccionamiento de este.
2. La región donde aparecen los valores máximos de las tensiones coincide con la zona donde aparecen las roturas en el eje soporte, lo cual corrobora también la validez del modelo de análisis confeccionado.
3. El valor máximo de las tensiones que aparecen en el modelo es de 134, 1 MPa. Este valor de tensiones es inferior en un 78, 5 % el valor de las tensiones últimas del Acero AISI 1045, igual a 625 MPa, lo cual es indicativo de que las roturas que se producen en el eje soporte no son bruscas, concluyéndose que la rotura ocurre por el proceso de fatiga, apareciendo una grieta progresiva que irá creciendo y al alcanzar su tamaño crítico producirá la rotura del eje soporte.
4. El precio de fabricación en Venezuela es más económico que el importado.
5. La posibilidad de fabricación nacional permite la vinculación de la Universidad con la industria.
6. Quedó demostrado que aunque el coeficiente de aprovechamiento es bajo, (20,75), la pieza en bruto laminada es la variante más económica.

## RECOMENDACIONES

Con vistas a mejorar la resistencia a la fatiga del eje soporte y prolongar su vida útil se recomiendan las siguientes acciones:

1. Estudiar la influencia de los siguientes factores en el incremento de la resistencia a la fatiga del eje soporte:

- el valor del radio de acuerdo en los cambios de sección del eje soporte.
- el acabado superficial.
- endurecimiento Superficial

2. Dado el bajo coeficiente de aprovechamiento del material evaluar otros procesos de fabricación como es el fabricar la pieza en dos partes (disco y eje).

3. Evaluar la sustitución del material original por fundiciones nodulares austemperizadas.

4. Determinar las aceleraciones transversales producidas por las deformaciones en la vía.





**PDF**  
Complete

*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Alting, L.** *Procesos de Manufactura para Ingenieros*+, Editorial McGraw Hill, México, 1996.
2. **American Society for Metals.** "Metals Handbook" Vol 9. 8<sup>th</sup> edición. 1974.
3. **Askeland, D.** *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*+, Paraninfo, España, 2001.
4. **Boon, G.K., Mercado, A.;** *Automatización Flexible en la Industria*+, LIMUSA. 1991.
5. **Bralla, James,** *Manual de diseño de producto para manufactura*+, McGraw-Hill, México, 1996
6. **Curtis, Mark A.,** *Planeación de Procesos*+, LIMUSA (1996)
7. **Correa, M de J Ramírez y J.R. Alique,** *Factores que Influyen en el Acabado Superficial en los procesos de Mecanizado: Técnicas de Análisis y Modelos*+, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México, 2005.
8. **Doyle, L., Keyser, C., Leach, J., Schrader, G., Singer, M.** *Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros*+, Prentice Hall, Mexico, 2002.
9. **Dupinian, Ch.** *Curso de Diseño y Fabricación de Piezas Metálicas*+, Editorial Limusa, S.A., Mexico, 2005.

10. **Estrada, C. Í** Estudio de la capacidad de carga del bastidor principal de la cosechadora KTP+ Tesis presentada para optar por el Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Holguín, 1999.
11. **Groover, M.P.** Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, Procesos y Sistemas+, 1<sup>ra</sup>, Ed. Prentice Hall, Hispanoamericana S.A., México, de C.V. Capitulo 18, 1997.
12. **Hamrock, B.J., Jacobson, B. y Schmid, S.R.**, "Elementos de Máquinas", McGraw Hill 2000.
13. **Ichenko, R.I.** Sobre la cuestión de la valoración de las cargas por los métodos numéricos, de los bastidores de las máquinas+ Revista Dinámica y resistencia de las máquinas agrícolas. Rostov del Don, 1986, pág. 43...49.
14. **LAUFGANG, S.**, Conocimiento de Materiales 1+ Facultad de Ingeniería- U.B.A (2004).
15. **Léger, D., E. Mathieu and J.C. Perrin**, Optical surface roughness determination using speckle correlation technique, Appl. Opt. 14, 872-877(1975).
16. **Luconin, Y.A, y Spichenkov, B.B.** Síntesis de la construcción portante de las cosechadoras de trigo+ Revista Dinámica, resistencia y fiabilidad de las máquinas agrícolas. Rostov del Don, 1987, pág. 74...78.
17. **Mangonon, P.**, Ciencia de Materiales Selección y Diseño+, 1<sup>ra</sup>, Ed. Prentice Hall, Hispanoamericana S.A., México, 2001.
18. **Martino, R.L.**; Sistemas Integrados de Fabricación+ Ed. LIMUSA-Noriega, México, 1990.

19. **Meyers, F.**, «Estudios de Tiempos y Movimientos para la Manufactura Ágil»  
 2<sup>da</sup>, Ed. Prentice Hall, Hispanoamericana S.A., México, 2000.
20. **Miachenkov, V.I.**, Manual de cálculo de las construcciones de máquinas por  
 el método de los elementos finitos (en Ruso). Editorial Construcción de  
 Maquinaria, 1989, 500 pág.
21. **Mott, R.**, «Diseño de Elementos de Máquinas» Prentice Hall, México, 1998.
22. **Mott, R.**, «Resistencia de Materiales Aplicada», 3<sup>ra</sup>, Ed. Prentice Hall,  
 Hispanoamericana S.A., México, 1996.
23. **Piovan, M. T.**, «Elementos de Máquinas» UTN-FRBB (2004).
24. **Rebollo, M.A.** Estudio de superficies rugosas mediante el análisis del valor  
 medio de la intensidad dispersada y la correlación de speckles; Tesis de  
 Doctorado UNLP, 1995.J.
25. **Shackelford, J.** «Ciencia de Materiales para Ingenieros», Prentice Hall  
 1995.
26. **Shigley, J.E. y Mischke, C.R.**, "Diseño en Ingeniería Mecánica", McGraw  
 Hill, México, 2002.
27. **Schey, J.**, «Proceso de Manufactura», McGraw Hill, México, 2002.
28. **Spotts, M.F. y Shoup, T.E.**, "Elementos de Máquinas", Prentice Hall 1998.
29. **Suresh, PVS, Rao PV, Deshmukh SG. 2002.** A Genetic algorithmic  
 approach for optimization of surface roughness prediction models.  
 International Journal of machine tools & Manufacture. 675-680.
30. **T.T.C.I.** «Informe de Análisis Dinámico de la Vía Férrea, Línea I, C.A. Metro  
 de Caracas» 2004, Caracas.

31. **Trabajo Publicados de Ingeniería Industrial (UPIICSA - IPN** Ingeniería de Métodos del trabajo).
32. **Zuperl U.** Optimization of cutting conditions during cutting by using neural networks. Robotics and Computer integrated Manufacturing. 19: 189-19. . 2003.
33. <http://www.monografias.com/trabajos12/ingdemet/ingdemet.shtm>.  
(Revisado el 27 Mayo de 2006)
34. <http://solidworks.galeon.com/cvitae1553653.html>. (Revisado el 27 Julio de 2006)
35. <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/Articulo.asp?A=8525>  
(Revisado el 12 Agosto de 2007)
36. [http://es.wikipedia.org/wiki/Control\\_num%C3%A9rico\\_por\\_computadora](http://es.wikipedia.org/wiki/Control_num%C3%A9rico_por_computadora)  
(Revisado el 17 Agosto de 2007)
37. [http://es.wikipedia.org/wiki/Control\\_num%C3%A9rico\\_por\\_computadora](http://es.wikipedia.org/wiki/Control_num%C3%A9rico_por_computadora).  
(Revisado el 10 Septiembre de 2007)
38. <http://www.monografias.com/trabajos14/manufaccomput/manufaccomput.shtml>  
(Revisado el 10 Septiembre de 2007)
39. <http://www.monografias.com/trabajos12/ingdemet/ingdemet.shtml>.  
(Revisado el 10 Septiembre de 2007)
40. <http://www.monografias.com/trabajos12/medtrab/medtrab.shtml> (Revisado el 18 Noviembre de 2008)
41. <http://www.monografias.com/trabajos11/primdep/primdep.shtml> (Revisado el 18 Noviembre de 2008)

42. <http://www.monografias.com/trabajos11/invmerc/invmerc.shtml> (Revisado el 18 Noviembre de 2008)
43. <http://www.monografias.com/trabajos12/andeprod/andeprod.shtml>  
(Revisado el 18 Noviembre de 2008)
44. <http://www.monografias.com/trabajos12/ingdemeti/ingdemeti.shtml>  
(Revisado el 18 Noviembre de 2008)
45. <http://www.monografias.com/trabajos12/atomo/atomo.shtml> (Revisado el 25 Noviembre de 2008)
46. <http://www.monografias.com/trabajos12/distpla/distpla.shtml> (Revisado el 25 Noviembre de 2008)
47. <http://www.monografias.com/trabajos12/henerg/henerg.shtml> (Revisado el 25 Noviembre de 2008)

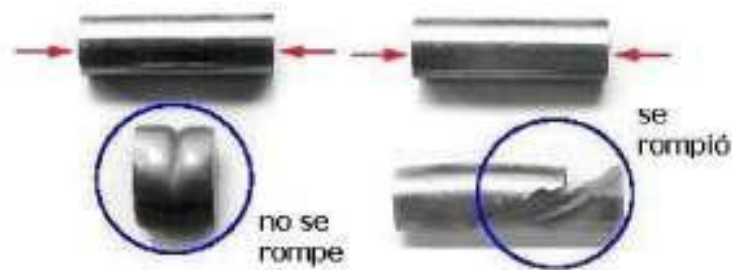
**PDF**  
Complete

*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

## ANEXOS

## Anexo 1



Distinción del proceso de falla y de rotura

## Anexo 2



Multiplicidad de efectos de falla en una misma pieza

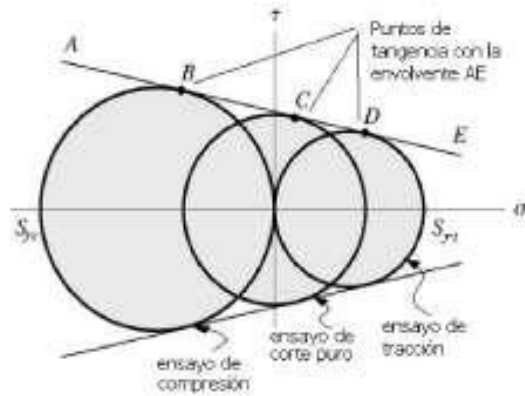
Orígenes más comunes de las fallas.

1. Deformación inducida por fuerzas y/o Temperatura
2. Desplazamientos inducidos por fuerzas o temperatura (pandeo)
3. Límite de Fluencia
4. Rotura Dúctil



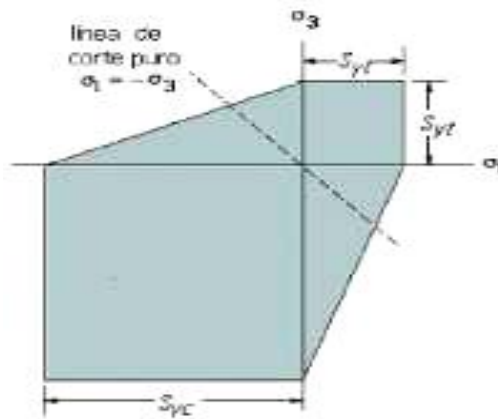
5. Rotura Frágil
6. Fatiga estructural
7. Fatiga Superficial
8. Impacto o falla dinámica
9. Desgaste por fricción
10. Endurecimiento parcial
11. Daño por Radiación: típico en materiales como los plásticos.
12. Corrosión
13. Desgaste por Corrosión
14. Fatiga por Corrosión
15. Fatiga por "Fretting"
16. Desgaste por "Fretting"
17. Relajación Térmica.
18. Rotura por tensiones térmicas: Efectos concentradores de tensiones
19. Falla por efectos Creep: presencia de deformaciones sostenidas en el tiempo
20. Fatiga Térmica:
21. Shock o Golpe Térmico: modificación estructural por efecto térmico
22. Spalling
23. Debonding: Pérdida de contacto entre fibras y resina en materiales compuestos
24. Delamination Pérdida de contacto entre laminas de materiales compuestos

### Anexo 3



Círculos tangentes de compresión, tracción y corte.

### Anexo 4



Teoría de la fricción interna (dúctiles).

## Anexo 5

### Resumen de los sistemas CAD.

Algunos paquetes CAD que se encuentran en el mercado:

- ARRIS CAD
- BuildersCAD
- DataCAD
- CADKEY
- CYCAS
- Auto CAD, Autodesk Inventor, Auto sketch, programas de la compañía AutoDesk.
- CATIA
- Tekla Structures
- Pro/Engineer
- Microstation
- IntelliCAD
- QCad
- Rhinoceros 3D
- Solid Edge
- SolidWorks
- Unigraphics, NX4
- ArchiCAD
- FreeCAD

A continuación se presentarán características de algunos de los paquetes CAD con mayor presencia en el mercado de la industria del diseño y la fabricación:

**Autodesk Inventor** es un paquete de modelado paramétrico de sólidos en 3D producido por la empresa de software - Autodesk. Compite con otros software de CAD como SolidWorks, Pro/ENGINEER y CATIA. Entró en el mercado en 1999, muchos años después que los antes mencionados y se agregó a las Series de Diseño Mecánico de Autodesk como una respuesta de la empresa a la creciente migración de su base de clientes de Diseño Mecánico en 2D hacia la competencia, permitiendo que los ordenadores personales ordinarios, puedan construir y probar montajes de modelos extensos y complejos.

El inventor utiliza los formatos específicos del archivo para las opiniones de las piezas (.IPT), de los montajes (.IAM) y del dibujo (.IDW) pero el formato del archivo de Auto CAD DWG puede ser importado/ser exportado.

El inventor de Autodesk también incluye construido en la herramienta de gerencia de datos llamada cámara acorazada de Autodesk y una biblioteca extensa de piezas estándares.

**Pro/ENGINEER** es el estándar en diseño de productos 3D, incluyendo herramientas de productividad líderes del sector que promueven prácticas recomendadas de diseño a la vez que aseguran la compatibilidad con los estándares de su compañía y su sector.

Pro-Engineer es un producto de CAD/CAM/CAE de PTC corporation (Massachusetts). Actualmente la versión más nueva es Wildfire 3.0. Es un software de diseño paramétrico. Es muy popular entre diseñadores mecánicos aunque un poco costoso pero más económico que otros de su mismo rango como CATIA o Unigraphics. Una de las fortalezas de Pro-E es la implementación de una suite para diseño mecánico, análisis de comportamiento (esfuerzos, térmicos, fatiga, eléctrico) y creación de archivos para CAM.

Ventajas:

- Las insuperables prestaciones de creación de geometría proporcionan una diferenciación y fabricación superior de los productos.
- Las aplicaciones totalmente integradas permiten desarrollar todo el proceso desde la concepción hasta la fabricación en una aplicación.
- La propagación automática de los cambios de diseño a todos los componentes de la cadena le permite diseñar con confianza.
- Las completas prestaciones de simulación virtual le permiten mejorar el rendimiento de los productos y superar los objetivos de calidad de los productos.

- La generación automática de diseño de herramientas asociativas, instrucciones de montaje y código máquina permiten aumentar al máximo la eficacia de la producción.

Incluye el intercambio de datos asociativos y formatos de datos según los estándares del sector.

Completa simulación estructural, termal, de fatiga y dinámica de herramientas y fabricación.

Amplía el diseño conceptual e industrial, creación de superficies de formas libres, creación de planos de producción, diseño de marcos de trabajo, diagramas esquemáticos y sistemas 3D distribuidos.

**Pro/ENGINEER** es el estándar en diseño de productos 3D, incluyendo herramientas de productividad líderes del sector que promueven prácticas recomendadas de diseño a la vez que aseguran la compatibilidad con los estándares de su compañía y su sector. Las soluciones CAD/CAM/CAE integradas de **Pro/ENGINEER** permiten diseñar más rápido que nunca a la vez que maximizar la innovación y calidad para crear en último término productos excepcionales.

**SolidWorks** es un programa de CAD para modelado mecánico que corre bajo el sistema operativo Microsoft Windows y es desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una subsidiaria de Dassault Systemes (Suresnes, Francia). Es un modelador de sólidos paramétrico, que usa el kernel de modelado geométrico Parasolid. Fue introducido en el mercado en 1995 para competir con otros programas CAD como Pro/ENGINEER, I-DEAS, Unigraphics, CATIA, y Autodesk



Mechanical Desktop y es actualmente el líder del mercado del modelado mecánico en CAD.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona en base a las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

SolidWorks es el software estándar de diseño mecánico en 3D. SolidWorks ofrece un valor y un rendimiento únicos, es líder en innovación y posee la mayor comunidad de usuarios. Ningún otro sistema de CAD permite diseñar productos de forma tan rápida y precisa.

El software de diseño mecánico SolidWorks® ofrece un rendimiento incomparable, facilidad de uso y funciones que le permitirán ahorrar mucho tiempo. Posee innovaciones y cientos de mejoras solicitadas por los clientes que le permitirán diseñar productos con mayor rapidez y precisión.

Trabaje más rápidamente gracias al inigualable rendimiento de este programa, que incluye funciones conocidas de Windows® como arrastrar y soltar, señalar y hacer clic, al igual que cortar y pegar. Con el software SolidWorks 2006, los datos de diseño son 100% editables y las relaciones entre las piezas, los ensamblajes y los dibujos están siempre actualizados.

## Integración y transición de datos 2D a 3D

Edita y mantiene los archivos DWG en su formato nativo con DWGEditor<sup>®</sup>, una herramienta de edición que brinda una interfaz con la que están familiarizados los usuarios de Auto CAD<sup>®</sup>. Conserve el valor de los datos heredados con las mejores herramientas disponibles para convertir datos 2D a datos 3D, adecuar la geometría 2D reutilizable y habilitar una transición perfecta a 3D, incluida la documentación completa de ayuda para los usuarios de Auto CAD.

## Funciones única

Aprovecha las ventajas de una amplia gama de herramientas integradas y funciones innovadoras ofrecidas sólo por el software de diseño mecánico SolidWorks:

- Diseño de piezas integrado: confirme la integridad del diseño fácilmente con COSMOSXpress<sup>®</sup>, la primera herramienta de validación de diseños integrada disponible para probar diseños de piezas rápida y fácilmente en un sistema de diseño mecánico en 3D.
- Comunicación de diseños: comparte conceptos de diseño fácilmente con eDrawings<sup>®</sup>, la primera herramienta habilitada para correo electrónico que facilita enormemente la colaboración en el diseño de productos.
- Herramientas para el diseño de máquinas: utilice un conjunto completo de herramientas de diseño de piezas soldadas y documentación. Obtenga las mejores funciones de chapa metálica totalmente asociativas, que permiten pasar rápidamente de la fase de diseño a los dibujos finales de fabricación. Ahorre tiempo con una biblioteca de operaciones de diseño de máquinas.

- Herramientas de diseño de moldes: automatice la creación de núcleos y cavidades con herramientas integradas de diseño de moldes. Utilice MoldflowXpress, una herramienta de validación de diseños basada en un asistente, para probar rápida y fácilmente la posibilidad de fabricación de piezas moldeadas por inyección de plástico.
- Herramientas para el diseño de productos de consumo: acelere el diseño de productos de consumo con herramientas mejoradas para una fácil manipulación de superficies; automatice la creación de elementos de diseño de piezas de plástico que se utilizan frecuentemente como, por ejemplo, salientes de montaje y ganchos de mosquetón; y desarrolle conceptos en diseños detallados más rápidamente con la posibilidad de importar archivos de Adobe® Illustrator®.
- Acceso en línea a componentes ya preparados: ahorre tiempo con 3D Content-CentralSM , el primer recurso Web integrado que proporciona a los usuarios de sistemas de CAD en 3D acceso a componentes ya preparados mediante catálogos en línea de primer orden.
- Gestión de la configuración: simplifique la reutilización del diseño y las iteraciones creando múltiples variaciones del diseño de un modelo de pieza o ensamblaje en un solo documento.
- Crea fácilmente diseños con extrusiones, revoluciones, operaciones lámina, vaciados avanzados, patrones de relleno de áreas y taladros aprovechando las funciones únicas del modelado de piezas basado en operaciones.
- Acelera el modelado de piezas con el exclusivo control de nivel de operaciones sobre varios sólidos.



- Realiza cambios de diseño en tiempo real con la facilidad de la función arrastrar y soltar mediante la edición dinámica de operaciones y croquis.
- Relaciona otras piezas directamente y mantenga sus relaciones al crear piezas nuevas. Obtenga un rendimiento inigualable en el diseño de ensamblajes grandes con decenas de miles de piezas. Trabaje más rápidamente en el modo aligerado sin sacrificar las funciones de documentación y diseño. Arrastre y coloque piezas y operaciones en su sitio.
- Acelera el diseño de ensamblajes con el enganche automático de SmartMates y los componentes inteligentes reutilizables, cuyo tamaño se reajusta automáticamente a otros componentes del diseño. Simule movimiento real e interacción mecánica entre sólidos con las funciones exclusivas de simulación física.
- Revisa diversas variaciones de un producto rápido e interactivamente con la función Estados de visualización, que permite visualizar fácilmente diferentes colores, texturas y otras características en la pantalla. Combine las pantallas sombreadas y de estructuras alámbricas como desee.
- Desarrolla dibujos de ingeniería completos y preparados para la fase de producción sin dibujar ni una sola línea o arco. Haga dibujos totalmente asociativos. Las vistas de dibujos y las listas de materiales se actualizan cada vez que se modifica el diseño de las piezas o del ensamblaje. Cree automáticamente varias vistas con dimensiones precisas y completas.
- Genera listas de materiales para un proyecto entero con un solo clic. Agregue globos automáticamente a cada componente en una vista de dibujo y alinéelos

fácilmente. Ajuste el tamaño, pase el corrector ortográfico y reutilice las anotaciones con total facilidad. Produzca tablas de revisión ya preparadas, tablas de taladros y otros tipos de tablas estándar, así como tablas definidas por el usuario.

- Compara dibujos fácilmente para resaltar las diferencias y ver qué cambios se han realizado de una versión a otra. Aproveche la exclusiva función de vista de dibujo 3D que permite ver piezas y ensamblajes en 3D sin abandonar el entorno de dibujo. Croquice diseños con bloques de presentación innovadores que permiten diseñar y manipular rápidamente mecanismos en 2D antes de generar ensamblajes en 3D.
- Captura y modifica la intención del diseño con las exclusivas funciones de croquis 3D. Genere superficies complejas utilizando recubrimientos y barridos con curvas guía y asas de arrastre para controlar la tangencia fácilmente, y una función de relleno innovadora. Recorte, extienda, redondee y cosa superficies intuitivamente. Traslade, gire, copie y cree superficies simétricas para poder manipularlas mejor.

CATIA es un programa de CAD/CAM/CAE comercial realizado por Dassault Systemes, Francia. El programa está desarrollado para proporcionar apoyo desde la concepción del diseño (CAD) hasta la producción (CAM) y el análisis (CAE) de productos. Actualmente se está trabajando en la versión V5, que en éstos últimos años ha sustituido a la versión CATIA V4 basada en AIX, y también disponible para Solaris, IRIX y HP-UX, debido a la posibilidad de trabajar sobre Microsoft Windows.

Provee una arquitectura abierta para el desarrollo de aplicaciones o para personalizar el programa. Los APIs se pueden programar en Visual Basic y C++. Estos APIs se llaman CAA2 (o CAA V5).

Programa inicialmente desarrollado para servir en la industria aeronáutica, se ha hecho un gran hincapié en el manejo de superficies complejas. CATIA también es ampliamente usado en la industria del automóvil para el diseño y desarrollo de componentes de carrocería. Concretamente empresas como el Grupo VW (Volkswagen, Audi, SEAT y Skoda), BMW, Renault, Peugeot, DaimlerChrysler, Smart y Porsche hacen un amplio uso del programa. La industria de la construcción también ha incorporado el uso del software para desarrollar edificios de gran complejidad formal; el museo de la fundación Guggenheim en Bilbao, España, es un hito arquitectónico que ejemplifica el uso de esta tecnología.

## Anexo 6

### Resumen de los sistemas CAM.

SurfCam es un paquete de software de diseño CAD/CAM que funciona sobre Windows 2000/XP.

Tiene la certificación de SolidWorks Certified CAM Product, por lo que enlaza directamente con SolidWorks para extraer la geometría de trabajo y desarrollar estrategias de mecanizado para máquinas de control numérico CNC como Tornos, Centro de mecanizado 2, 3, 4 y 5 ejes, así como también Electroerosionadoras de corte por hilo EDM hasta 4 ejes. Funciona como producto independiente y viene equipado con una Licencia SolidWorks PDO (SolidWorks Parts Design Only).

SolidWorks PDO incluye todas funcionalidades de diseño en 2D y 3D para diseño de partes.

- Posee el Simulador de mecanizado más rápido y potente desarrollado por %Machine Works+.
- Gran velocidad para el cálculo de las estrategias de mecanizado en componentes complejos con tecnología %TrueMill+.
- Estabilidad de resultados con calidad garantizada.
- Excelente control en la generación de los recorridos de CN. Regeneración automática de los recorridos cuando se realizan cambios.
- Crea hojas de ruta de las operaciones.
- Creación y manipulación de superficies NURBS reales.
- SurfCam puede trabajar en multitarea, haciendo innecesario trabajar en batch.
- Muy fácil de usar y gráficamente puede utilizar funciones de librería de herramientas, materiales y control de operaciones.
- SurfCam guarda los últimos valores entrados. Esto ahorra tiempo cuando se programan operaciones similares. Otros productos de CAM ponen a cero los valores para cada operación con la consiguiente pérdida de tiempo.
- SurfCam une y junta superficies para crear una única superficie.
- El traductor de IGES de SurfCam es muy potente pudiéndose configurar. Esto lo hace superior a otros traductores de IGES del mercado actual.
- Disponibilidad de traductor de Catia. SurfCam traduce virtualmente cualquier fichero del mercado.

- Generador de pos procesadores muy potente y customizable, escrito por personal experto, con muchos años de experiencia.
- SurfCam ha sido desarrollado en un taller de moldes por tres generaciones de ingenieros que han trabajado realizado mecanizados complejos.
- El corte %pencil cut+con 4 y 5 ejes está disponible con SurfCam 2 Axis Plus para que se puedan generar programas de CN de corte con el mínimo de gasto en software. Muy empleado en aplicaciones de corte por láser.
- Los programas de 4 y 5 ejes de SurfCam son los únicos sistemas de PC que están preparados para manejar 4 y 5 ejes a través de su software y no como otros que utilizan programas externos. Las operaciones como fronteras, etc. no son posibles con los otros sistemas citados.
- Disponibilidad de la nueva funcionalidad "Rest Machining" es decir el programa tiene la inteligencia necesaria para que la herramienta que trabaja "sepa" donde queda material, evitando que la herramienta se "pasee" innecesariamente.
- Nueva funcionalidad patentada SRM: pensada para eliminación efectiva y rápida de grandes porciones de material. Calcula de una sola vez todas las pasadas con la herramienta mayor posible, luego pasa a la inferior y repite la operación, se consiguen reducciones del tiempo de hasta un 30%.

Otro paquete CAM es WorkNC es el software líder en la generación automática de sendas para el mecanizado de moldes, matrices y formas complejas en modelos de superficies o sólidos.



WorkNC es un producto de software CAM que mejora los sistemas de diseño y fabricación al proporcionar mejoras sobresalientes en funciones automáticas, fiabilidad y facilidad de uso.

Las funciones automáticas de WorkNC permiten que los nuevos usuarios de CAM preparen automáticamente sendas en cuestión de pocos minutos. Los usuarios experimentados de sistemas CAM rápidamente aprecian las ventajas excepcionales proporcionadas por WorkNC. Tanto en la oficina técnica como en el taller a pie de máquina, la fiabilidad y calidad de WorkNC es insuperable!

La inversión en un sistema de CAM es una decisión importante a nivel de empresa. La selección de un buen sistema tiene influencia directa en la ingeniería y la eliminación de material en el mecanizado, que frecuentemente determinan la productividad y margen de beneficio de una empresa.

En SESCOI estamos constantemente orientados al futuro para aportar soluciones a sus necesidades crecientes en fabricación, proporcionando un producto CAM/CAD fiable y consistente, funciones innovadoras y un soporte técnico de máxima calidad

Así mismo encontramos un número importante de paquetes CAM en el mercado y se puede nombrar como otra alternativa hyperMILL V9.5 es un salto de cuántum genuino en aspectos tales como facilidad de la programación, ahorros del tiempo y optimización de épocas mecanizadas. En el resultado final, sus ahorros del tiempo son enormes - ambos durante la programación y el mecanizado real. La base para estas ventajas incluye las características siguientes:

En el diseño de elementos que requieren para su conformado de procesos de mecanizado con arranque de material, es imprescindible tener en cuenta las desviaciones originadas por estos.

Dentro de la gama de paquetes CAM dirigidos específicamente a la industria metalmecánica existen muchas variantes pero en el caso específico del objeto de estudio de esta investigación se debe escoger un paquete que no sólo cubra las expectativas del autor como el conocimiento en el manejo del mismo, sino también que sea lo más adecuado para relacionarse con el paquete CAD elegido para la simulación del modelo del eje soporte del motor y por ello, con todo lo antes expuesto podemos concluir que para el objeto de investigación se utilizará como herramienta CAD el SolidWorks, para la evaluación de la resistencia del Eje Soporte del Motor a los esfuerzos al que está sometido la evaluación por Elementos Finitos obtenido del Cosmos/Works y como herramienta para la manufactura en máquinas CNC el SURFCAM/Teksof, este último se eligió debido a que dicho software trabaja interconectado con el SolidWorks.

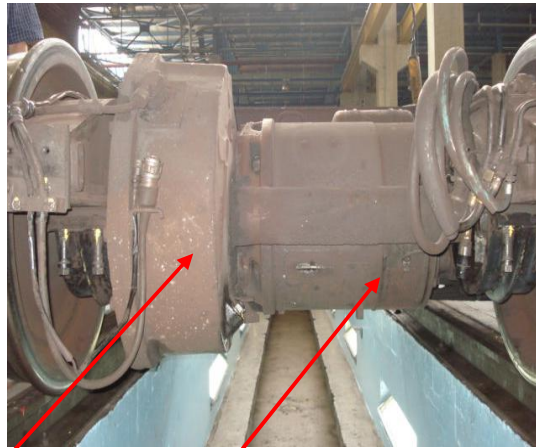
#### Anexo 7



Motor eléctrico con el eje soporte acoplado



## Anexo 8

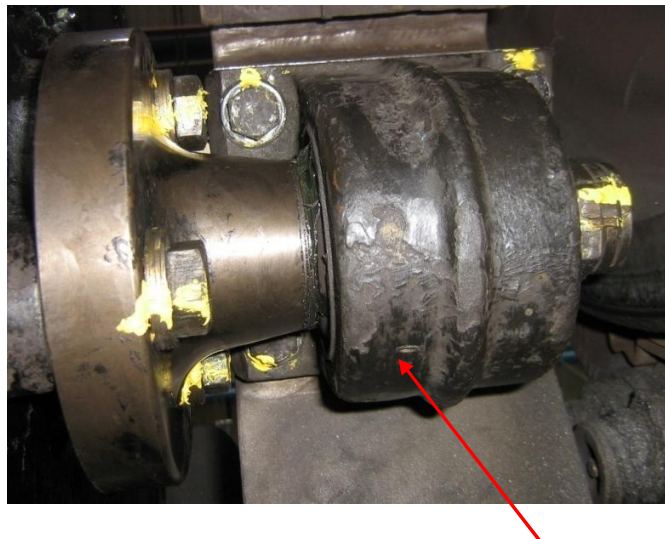


Caja de transmisión

Motor Eléctrico

Sistema completo acoplado al vagón y eje soporte

## Anexo 9



Acoplamiento del eje soporte con el motor y el chasis del vagón



Anexo 10. Placa de identificación del motor eléctrico de tracción de los trenes de III generación.



Placa Identificación del Motor

Anexo 11.

Resultado del análisis del diseño del Eje Soporte para elaborar Códigos CNC

IGES2DSN -- Convert an IGES file to a SURFCAM 2002 design file.

Copyright (c) Surf ware Inc. 2002. All rights reserved.

Reading configuration file: C:\SURFCAM\igs\igs2dsn.cfg

Finished Configuration.

Record size: 82

Record count S: 1 G: 6 D: 1212 P: 1945

Start Section:

SolidWorks IGES file using analytic representation for surfaces

Delimiters - Parameter:"," End of Record:","

Product ID: Copia de Eje soporte Motor (rev 3) 12 Julio,

File Name: D:\Tesis de Maestria CAD/CAM\Planos Maestria\Eje soporte Motor para mecanizar (rev 1) 12 Julio.IGS

System ID: SolidWorks 2006 by SolidWorks Corporation

Translator Version: SolidWorks 2006 by SolidWorks Corporation

Precision Info: 32 308 15 308 15

Receiving System: Copia de Eje soporte Motor (rev 3) 12 Julio

Scale 1.000000, Units MM, Unit code 2,  
Resolution 0.000000  
Dated 02/01/08  
Author: Oscar Richards\_2,

Reading section: System\_Id "SolidWorks"  
Pass 1

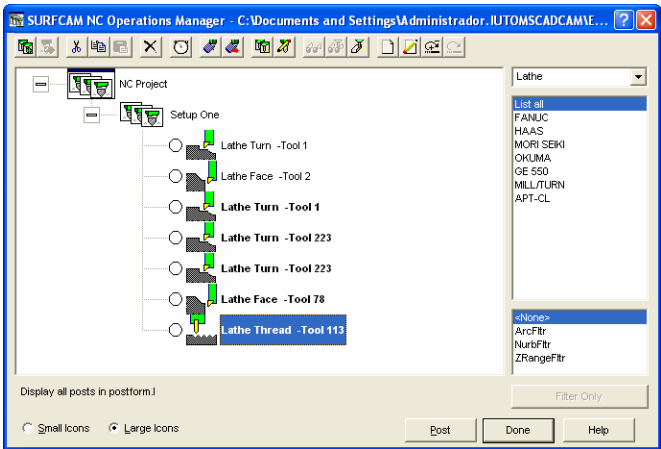
\*\*\*\*\*  
\*\*\* Translation Complete. \*\*\*  
\*\*\*\*\*

I read the following:  
IGES   Translated   Discarded   Description  
Type form

-----			
100	0	96	0 Circular Arc
102	0	78	0 Composite Curve
110	0	84	0 Line
120	0	18	0 Surface of Revolution
124	0	96	0 Transformation Matrix - Right Handed Triple
126	0	148	0 Rational B-Spline Curve
128	0	13	0 Rational B-Spline Surface
142	0	39	0 Curve on a Parametric Surface
144	0	31	0 Trimmed (Parametric) Surface
314	0	3	0 Color Definition
Total number of entities in file: 606			
-----			

Translation Successful  
Elapsed Time 0.911000 seconds.  
Display Time 0.150000 seconds.

Anexo 12





**PDF**  
Complete

*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

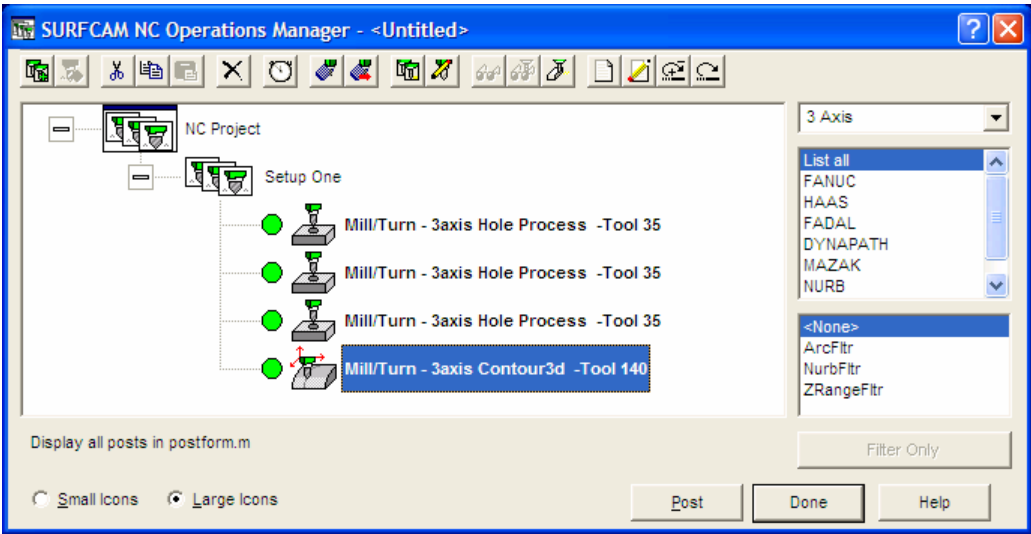
[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

## PROGRAMA PARA EL TORNEADO DEL EJE SOPORTE %

T0101	Z28.45 F19.65	Z28.45 F19.65
G98 G96 S131 M3	X-129.205	X-97.205
G0 X-181.946 Z204.6	G0 X-134.205	G0 X-102.205
M8	Z204.6	Z204.6
G0 X-170.205	X-126.205	X-94.205
G1 X-165.205 F9.825	G1 X-121.205 F9.825	G1 X-89.205 F9.825
Z28.45 F19.65	Z28.45 F19.65	Z28.6768 F19.65
X-169.2	X-125.205	G2 X-93. Z28. 45 R8.05
G0 X-174.2	G0 X-130.205	G1 X-93.205
Z204.6	Z204.6	G0 X-98. 205
X-166.205	X-122.205	Z204.6
G1 X-161.205 F9.825	G1 X-117.205 F9.825	X-90.205
Z28.45 F19.65	Z28.45 F19.65	G1 X-85.205 F9.825
X-165.205	X-121.205	Z29.4564 F19.65
G0 X-170.205	G0 X-126.205	G2 X-89.205 Z28.6768
Z204.6	Z204.6	R8.05
X-162.205	X-118.205	G0 X-94.205
G1 X-157.205 F9.825	G1 X-113.205 F9.825	Z204.6
Z28.45 F19.65	Z28.45 F19.65	X-86.205
X-161.205	X-117.205	G1 X-81.205 F9.825
G0 X-166.205	G0 X-122.205	Z31.0207 F19.65
Z204.6	Z204.6	G2 X-85.205 Z29.4564
X-158.205	X-114.205	R8.05
G1 X-153.205 F9.825	G1 X-109.205 F9.825	G0 X-90.205
Z28.45 F19.65	G3 X-76. 9 Z71.6 R.85	X-50.205
X-157.205	G1 Z36. 5	G1 X-45.205 F9.825
G0 X-162.205	G2 X-77. 205 Z34.9403	Z158.45 F19.65
Z204.6	R8.05	X-49.2
X-154.205	G0 X-82.205	X-49.205
G1 X-149.205 F9.825	Z204.6	G0 X-54.205
Z28.45 F19.65	X-74.205	Z204.6
X-153.205	G1 X-69.205 F9.825	X-46.205
G0 X-158.205	Z72.45 F19.65	G1 X-41.205 F9.825
Z204.6	X-73.205	Z158.45 F19.65
X-150.205	G0 X-78.205	X-45.205
G1 X-145.205 F9.825	Z204.6	G0 X-50.205
Z28.45 F19.65	X-70.205	Z204.6
X-149.205	G1 X-65.205 F9.825	X-45.9
G0 X-154.205	Z72.45 F19.65	G1 X-40.9 F9.825
Z204.6	X-69.205	Z158.45 F19.65
X-146.205	G0 X-74.205	X-41.205
G1 X-141.205 F9.825	Z204.6	G0 X-181.946
Z28.45 F19.65	X-66.205	Z204.6
X-145.205	G1 X-61.205 F9.825	X-45.5

G0 X-150.205 Z204.6 X-142.205 G1 X-137.205 F9.825 Z28.45 F19.65 Y11.9238 Z84.1595 Y7.9638 Z84.6261 Y3.9863 Z84.9065 Y0 Z85. G00 Z159. Y55. Z45.3074 G01 Z42.8074 F163.7 Z204.6 X-82.205 G1 X-77.205 F9.825 Z34.9403 F19.65 G2 X-81. 205 Z31.0207 R8.05 G0 X-86. 205 Z204. 6 X-78. 205 G1 X-73. 205 F9.825 Z72.45 F19.65 X-75.2	Z72.45 F19.65 X-65.205 G0 X-70.205 Z204.6 X-62.205 G1 X-57.205 F9.825 Z72.45 F19.65 X-61.205 G0 X-66.205 Z204.6 X-58.205 G1 X-53.205 F9.825 Z72.45 F19.65 X-57.205 G0 X-62.205 Z204.6 X-54.205 G1 X-49.205 F9.825 Z158.45 F19.65 G3 X-50.9 Z157.6 R.85 G1 Z72.45 X-53.205 G0 X-58.205 Z204.6	G1 X-40.5 F9.825 Z158.25 F19.65 X-49.2 G3 X-50.5 Z157.6 R.65 G1 Z72.25 X-75.2 G3 X-76.5 Z71.6 R.65 G1 Z36.5 G2 X-93. Z28.25 R8.25 G1 X-169.2 G0 X-181.946 M5 M9 M30 %
--	---	--

Programa para el fresado y taladrado del Eje Soporte %





**PDF**  
Complete

*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

O1 (Surfware, Inc.) (5703 Corsa Ave) (Westlake, Ca. 91362) G17 G40 G80 G90 T140 M6 M3 S682 G00 G54 X25. Y55. G43 Z159. H140 M8 G00 Z67.3074 G01 Z64.8074 F163.7 Y51.9002 Z67.3155 F327.4 Y48.6861 Z69.6754 Y45.365 Z71.882 Y41.944 Z73.9304 Y38.4307 Z75.8161 Y34.8328 Z77.535 Y31.1583 Z79.0833 Y27.4152 Z80.4575 Y23.6118 Z81.6547 Y19.7564 Z82.6721 Y15.8575 Z83.5077 Y11.9238 Z84.1595 Y7.9638 Z84.6261 Y3.9863 Z84.9065 Y0 Z85. G00 Z159.	Y55. Z45.3074 G01 Z42.8074 F163.7 Z64.8074 F327.4 G00 Z159. Z45.3074 G01 Z42.8074 F163.7 Y53.4445 Z37.922 F327.4 Y52.0784 Z32.9804 Y50.9037 Z27.9897 Y49.9221 Z22.9576 Y49.135 Z17.8913 Y48.5437 Z12.7985 Y48.149 Z7.6867 Y47.9515 Z2.5635 Z-2.5635 Y48.149 Z-7.6867 Y48.5437 Z-12.7985 Y49.135 Z-17.8913 Y49.9221 Z-22.9576 Y50.9037 Z-27.9897 Y52.0784 Z-32.9804 Y53.4445 Z-37.922 Y55. Z-42.8074 G00 Z159. X0 Z-40.3074 G01 Z-42.8074 F163.7 Z-64.8074 F327.4 G00 Z159. M9 G90 G00 G49 Z0 M5 X0 Y0 M30 %
---	---