Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial
Centro de Investigaciones de Soldadura

Tesis presentada en opción al Título Académico de Ingeniero Mecánico

Trabajo de Diploma

Guía de selección de aceros para la fabricación de repuestos de árboles de transmisión

Autor: Yoelmis Castellanos Cazañas

Tutor: Dr. Rafael Fernández Fuentes

Curso 2016-2017

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

_____

Firma del Autor

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

_____

Firma del Tutor

_____

Firma del Jefe de Departamento donde se defiende el trabajo

_____

Firma del Responsable de Información Científico-Técnica

Índice

RESUMEN 4

ABSTRACT 4

INTRODUCCIÓN 5

1. FUNDAMENTOS TEÓRICO-TÉCNICOS 7

1.1 Consideraciones generales para el diseño de árboles de transmisión sometidos solo a flexión y torsión 7

1.2 El acero como material para la fabricación árboles de transmisión 12

1.3 La templabilidad como criterio de selección del acero para la fabricación de árboles de transmisión 15

2. Desarrollo de la guía para la selección de aceros para la fabricación de árboles de transmisión de repuesto 21

2.1 Estimación del límite de fluencia y de la dureza del árbol de transmisión, a partir de su geometría y condiciones de trabajo 21

2.2 Procedimiento para la selección del acero para la fabricación de repuestos de árboles de transmisión, basada en la templabilidad 24

2.3 Resumen de la secuencia de pasos de la guía propuesta para la selección de aceros para la fabricación de repuestos de árboles, basada en la templabilidad 27

3. Ejemplo de aplicación de la guía propuesta para la solución de un caso práctico de fabricación de repuesto de un árbol de transmisión 28

CONCLUSIONES 36

RECOMENDACIONES 37

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA 38

ANEXO 40

RESUMEN

En el presente trabajo se propone una secuencia de pasos que sirve como guía para la selección del acero necesario para la fabricación de repuestos de árboles de transmisión, partiendo del conocimiento de las condiciones de trabajo y las dimensiones del elemento y aplicando los postulados del diseño mecánico, a manera de ingeniería, y de la templabilidad del acero. Se ofrece una recopilación de expresiones que permitan realizar los cálculos correspondientes, para lo cual se confeccionó una propuesta automatizada soportada en el programa de computación Microsoft Excel que incluye una base de datos de aceros con su composición química.

PALABRAS CLAVE

Selección de aceros, árboles de transmisión, templabilidad

ABSTRACT

The present work proposes a sequence of steps that serves as a guide for the selection of steel needed for the manufacture of spare parts of transmission trees, starting from the knowledge of the working conditions and the dimensions of the element and applying the postulates of the mechanical design, using inverse engineering, and the steel´s hardenability concept. It offers a collection of expressions that allow performing the corresponding calculations, for which an automated tool was made supported in the computer program Microsoft Excel that includes a database of steels with their chemical composition.

INTRODUCCIÓN

En la industria metal-mecánica de nuestro país existen sectores en los que una cantidad significativa de equipos y elementos, ya sea de manera prematura o por haber alcanzado el tiempo de vida útil, fallan y requieren de reparación o sustitución. En correspondencia con esta situación en el lineamiento 220 de la política económica y social del Partido y la Revolución se indica la necesidad de priorizar la reactivación del mantenimiento industrial, incluyendo la producción y recuperación de partes, piezas de repuesto y herramentales [1].

Entre los componentes que se destacan por su incidencia desde el punto de vista de las fallas en elementos de máquinas se identifican aquellos del tipo ejes o árboles de transmisión, los que a su vez representan una parte importante en la ingeniería mecánica tanto por su cantidad y diversidad, así como por sus funciones [2].

Algunos tipos de fallas en los ejes y árboles de transmisión, por ejemplo, pérdida dimensional por desgaste, posibilitan la recuperación de los mismos mediante relleno superficial; mientras que en otros casos por ejemplo la fractura no queda más alternativa que la fabricación de repuestos de los mismos. Tanto para la recuperación como para la sustitución se debe proceder a la caracterización del material, desde el punto de vista de la composición química, la microestructura y las propiedades mecánicas [3].

La caracterización del material requiere la aplicación de técnicas experimentales que demandan de un tiempo significativo para su realización y no están disponibles en la mayoría de las empresas del país. Ante tal dificultad generalmente se recurre a la experiencia profesional y se aplican alternativas empíricas o de prueba-error. Una solución alternativa ante esta dificultad sería la selección del acero adecuado partiendo de la geometría del eje aplicando lo que pudiera denominarse ingeniería de diseño inversa para estimar las propiedades mecánicas del material.

Dicha alternativa implicaría la determinación de las propiedades mecánicas sobre la base de los postulados del diseño mecánico y a partir de esto la selección del acero adecuado. En este sentido, el objetivo del presenta trabajo es confeccionar una guía que dé respuesta a la problemática antes descrita, permitiendo seleccionar el acero adecuado para la fabricación de árboles de transmisión macizos sometidos a flexión y torsión a partir de dimensiones conocidas.

Para dar cumplimiento a este objetivo se plantea como hipótesis que no solo la resistencia mecánica sino también la templabilidad del acero (en función de su composición química) y el tratamiento térmico (expresado fundamentalmente por la severidad del temple y la temperatura de revenido) han de ser los criterios a tener en cuenta para la selección del acero requerido en la fabricación de árboles de transmisión.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICO-TÉCNICOS

1.1 Consideraciones generales para el diseño de árboles de transmisión sometidos solo a flexión y torsión

Los árboles de transmisión son elementos de máquinas, generalmente de sección transversal circular, usados para sostener piezas que giran solidariamente o entorno a ellos. Algunos elementos que se montan sobre árboles de transmisión son ruedas dentadas, poleas, piñones para cadena, acoples y rotores. Este tipo de elemento de máquinas se caracteriza por girar soportando pares de torsión y transmitiendo potencia [2].

En la figura 1 se muestra un esquema de un reductor de velocidades horizontal de dos escalones cilíndricos donde se emplean dos árboles de transmisión para la transmisión de potencia mediante ruedas dentadas. En la figura 2 se muestran los diferentes tipos de árboles de transmisión según las condiciones de trabajo.

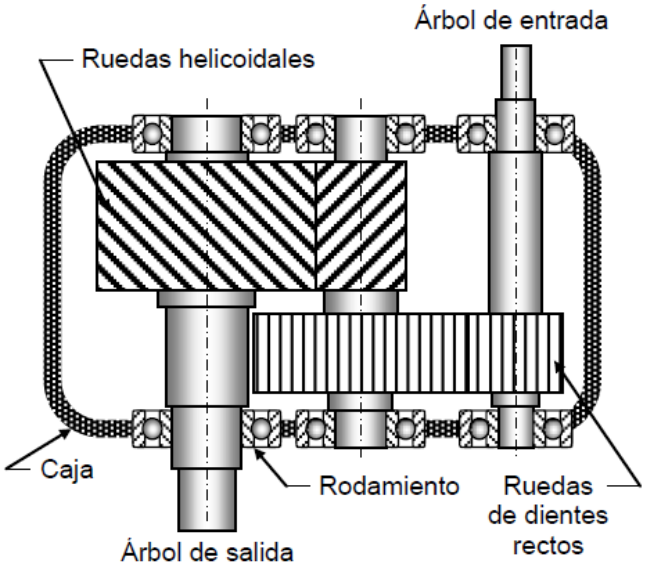


Figura 1. Esquema de un reductor de velocidades horizontal de dos escalones cilíndricos.

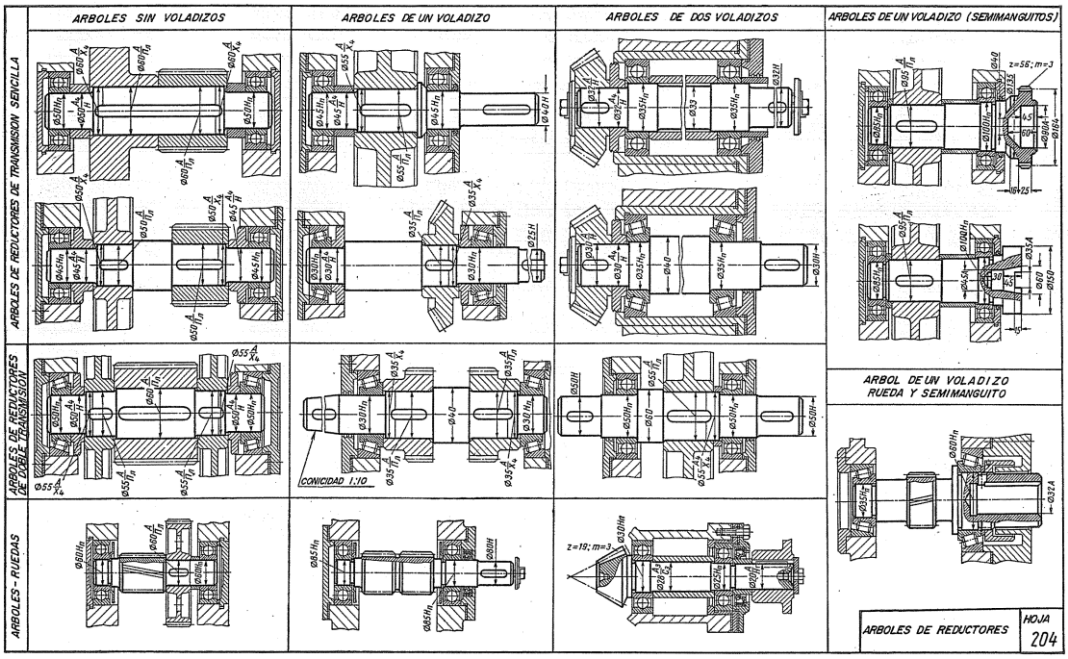


Figura 2. Esquema de diferentes tipos de árboles de transmisión de transmisión según sus condiciones de trabajo.

Los elementos de transmisión de potencia como las ruedas dentadas, poleas y estrellas transmiten a los árboles de transmisión fuerzas radiales, axiales y tangenciales. Debido a estos tipos de carga, en el árbol se producen generalmente esfuerzos por flexión, torsión, carga axial y cortante.

En la figura 3 se presenta un esquema de las cargas y la distribución de esfuerzos característicos de la sección transversal de un árbol [5]. La fuerza **F** produce un esfuerzo uniforme de compresión, el momento flector **M** produce una distribución lineal de esfuerzos, con los esfuerzos máximos en los puntos **A** y **B**, y el par de torsión **T** produce esfuerzos cortantes, los cuales son máximos en la periferia.

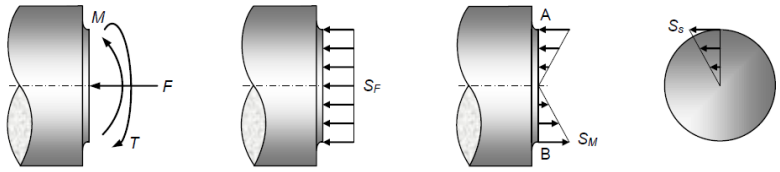


Figura 3. Cargas y distribución de esfuerzos en la sección transversal de un árbol.

El diseño de árboles de transmisión consta de las siguientes etapas [5]:

- Selección del material
- Diseño constructivo
- Cálculo de la resistencia a la fatiga
- Cálculo de la resistencia a las cargas dinámicas
- Análisis Modal (verificación de las frecuencias naturales del árbol)
- Cálculo de la rigidez

El diseño constructivo consiste en definir las dimensiones el árbol, como los diámetros de los escalones, las longitudes de los tramos y los radios de redondeo de los cambios de sección. Después de tener una forma constructiva definida para el árbol de transmisión, se procede con la verificación de la resistencia a la fatiga, en la cual se calcula un factor de seguridad con base en una ecuación de diseño para cargas variables combinadas. Puede continuarse con la revisión de la resistencia a las cargas dinámicas; este cálculo se hace mediante un procedimiento de diseño estático, a menos que se prevea que las cargas dinámicas se van a repetir muchas veces durante la vida esperada del árbol.

Una vez verificada la resistencia del árbol de transmisión, se puede proceder al cálculo de la rigidez, que consiste en verificar que las deformaciones por torsión, flexión y carga axial sean menores que las admisibles; esto con el fin de que elementos como rodamientos, cojinetes

de contacto deslizante, ruedas dentadas, estrellas y poleas no sean sobrecargados excesivamente.

Finalmente, debe hacerse un cálculo de las frecuencias críticas del árbol de transmisión, en el cual se verifica que la frecuencia de giro del árbol (y las frecuencias forzadas si las hay) difiera sustancialmente de las frecuencias naturales del sistema.

Para el caso de árboles de transmisión que cumplan las condiciones de par de torsión constante, flexión giratoria con momento constante, material dúctil y sección transversal circular sólida se puede utilizar la norma para el diseño de árboles de transmisión ANSI/ASME B106.1M-1985. Esta norma está basada en datos experimentales, por lo que constituye un método de cálculo adecuado. La norma establece que el diámetro en la sección de análisis puede calcularse con la ecuación 1.

$$\mathbf{d_{min}} = \left[\frac{32 \cdot \mathbf{N}}{\pi}\sqrt{\left(\frac{\mathbf{K_t M}}{\mathbf{S_n'}}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{\mathbf{T}}{\mathbf{Sy}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{3}} \ldots(1)$$

Donde:

Sy →Límite de fluencia del material de la pieza en MPa

T y M →Momentos torsor y flector respectivamente en $\mathrm{kN \cdot mm}$

$\mathbf{K_t}$ →Coeficiente teórico de concentración de tensiones

N →Factor de seguridad

$\mathbf{S_n'}$ →Resistencia real a la fatiga del material de la pieza.

Para la determinación del diámetro mínimo mediante la ecuación 1 se requiere previamente de los siguientes pasos [6]:

Pasos	Observaciones
Determinación de la velocidad de giro y la potencia del eje	La velocidad de giro y la potencia del eje dependen del motor que se le instale al mismo, de manera que la potencia del motor será la potencia total trasmitida al eje y sus componentes

Determinar el diseño de los componentes de transmisores.	Es importante especificar de qué manera se mantendrán los elementos transmisores de potencia, la polea recibe la potencia de un motor eléctrico, esta lo transmite al eje y este a su vez la pasa al engranaje cilíndrico, el cual la transmitirá a otro engranaje, para soportar estos componentes axialmente se puede recurrir al método de maquinar el eje haciéndoles hombros de apoyo para cada uno de los elementos y ranuras para instalar anillos de retención. Así se forma generalmente la geometría del eje
Especificar la ubicación de los cojinetes	Es necesario siempre usar dos rodamientos y deben colocarse, de ser posible, en cualquier extremo de los elementos que transmiten potencia para proporcionar soporte estable especificar de qué manera se mantendrán los elementos transmisores de potencia y los rodamientos en su posición axialmente.
Detalles geométricos para el eje considerando la forma de posición axial en que se mantendrá cada elemento sobre el eje	La configuración geométrica de un eje es la de una barra cilíndrica escalonada. Otra forma de configurar es la que se determina a partir de la experiencia y, a menudo, consiste simplemente en un repaso de modelos existentes en los que debe realizar un cierto número de cambios como el uso de un sello o un acoplamiento recién diseñado, un cambio en la potencia o velocidad, cojinetes de tamaño diferente.
Determinar el par tensional y las fuerzas que actúan en dirección radial y axial que se desarrolla en cada punto del eje	Para determinar el par tensional en cada punto del eje, y las fuerzas que actúan en dirección radial y axial hay que realizar un diagrama de cargas de fuerzas cortantes y momentos flectores.

Selección del material con que se fabricara, especificaciones de condiciones como estirado en frio, tratamiento térmico	En la selección del material con que se fabricara hay que tener en cuenta la resistencia necesaria para soportar esfuerzos y cargas, el tratamiento térmico y el alto nivel de aleación están garantizado el incremento significativo de la resistencia. Para determinar los diámetros mínimos se utiliza la siguiente ecuación.

1.2 El acero como material para la fabricación árboles de transmisión

La parte más importante para el diseño de árboles de transmisión o de cualquier pieza de las máquinas es la selección del material; para esto, entre las características que se deben tomar en cuenta son su resistencia, su facilidad de maquinado y tratamiento térmico, y también el factor económico ya que influye directamente en el costo de fabricación.

El acero es el material que se usa con más frecuencia para la construcción de los árboles de transmisión. Variando adecuadamente la composición química y el tratamiento térmico pueden obtenerse propiedades mecánicas que se encuentren entre márgenes muy amplios.

Generalmente, los árboles de transmisión son fabricados con barras circulares de acero al carbono estirado en frío; mientras que son usadas barras de acero aleado cuando se requiere tenacidad, resistencia al impacto y alta resistencia en materiales disponibles de modo comercial. En estos casos, los árboles de transmisión pueden tratarse térmicamente para obtener las propiedades requeridas. Cuando la resistencia al desgaste en la superficie es un factor muy importante, puede usarse acero de cierto grado de carburación. Para disminuir el costo puede usarse un acero con bajo contenido de carbono, y posteriormente garantizar un endurecimiento local por tratamiento térmico o térmico-químico.

Las características mecánicas de los aceros son determinadas por el constructor y/o proveedor, mediante ensayos de los materiales empleados

y/o disponibles para la fabricación de los árboles de transmisión, con la intención de conocer exactamente los valores límites de resistencia y realizar cálculos precisos de los coeficientes de seguridad.

A modo de ejemplo a continuación se dan algunas recomendaciones de empleo de aceros denominación SAE [7] y por norma europea [8] para fabricación de árboles de transmisión:

SAE 1020 (0.20%C) para árboles de transmisión poco cargados donde sea deseable un bajo costo de fabricación o cuando algunas partes de los elementos deban ser endurecidas mediante cementación.

SAE 1045 (0.45%C) es el acero para árboles de transmisión más corrientemente usado, pues el mayor contenido de carbono le otorga una mayor dureza, mayor resistencia mecánica y un costo moderado.

SAE 4140 (1%Cr, 0.20%Mo, 0.40%C) es un acero al cromo molibdeno bonificado de alta resistencia que se emplea en ejes muy cargados y en donde se requiere alta resistencia mecánica.

SAE 4340 (1.85%Ni, 0.80%Cr, 0.25%Mo, 0.40%C) es un acero al cromo níquel molibdeno bonificado de máxima tenacidad, resistencia a la tracción y torsión que se aplica a los cálculos para el diseño de árboles de transmisión.

C35E, C35R, especiales (1.1181/80, EN10083-1); **C35**, de calidad (1.0501, EN 10083-2), Aceros de resistencia mediana, de templabilidad baja y buena tenacidad. Se puede templar en agua y se usa en piezas de pequeñas y medianas dimensiones moderadamente solicitadas (árboles, bielas, horquillas de cambio, bulones, tornillos, cremalleras).

C45E, C45R, especiales (1.1191/201, EN10083-1); **C45**, de calidad (1.0503, EN 10083-2) Acero de buena resistencia mecánica y resistencia al desgaste que mantiene una tenacidad razonable. En general se templa en agua (templabilidad baja y peligro de distorsiones) pero para pequeñas secciones (d<10 mm) también se templa en aceite. Se aplica a piezas de pequeñas dimensiones fuertemente solicitadas (árboles y ejes, palancas, bielas, tornillos, manguitos, engranajes).

37Cr4, 37CrS4 (1.7034/38, EN10083-1) Acero de resistencia y templabilidad mediana. Utilización habitual en la mecánica y en el automóvil (árboles, bulones, engranajes, balancines, palancas de dirección).

34CrMo4, 34CrMoS4 (1.7220/26, EN10083-1), Acero de buena resistencia y tenacidad. Gracias a su buena templabilidad, es muy utilizado para piezas bonificadas (temple en aceite y revenido) de secciones medianas y grandes, sometidas a fuertes solicitaciones (árboles, cigüeñales, ruedas dentadas y cremalleras, bielas, tornillos de alta resistencia).

34CrNiMo6 (1.6582, EN10083-1), Acero de una gran templabilidad (mayor que los anteriores) y una buena tenacidad. Se comporta bien a los choques y a los esfuerzos de torsión. Se usa en piezas de grandes dimensiones fuertemente solicitadas (árboles y cigüeñales, grandes ruedas dentadas con temple total, piezas sometidas a gran fatiga).

36NiCrMo16 (1.6773, EN10083-1), Acero de templabilidad excelente. Es adecuado para grandes piezas mecánicas sometidas a grandes esfuerzos de fatiga. Ofrece la máxima seguridad en piezas de la industria aeroespacial.

Los aceros para la fabricación de árboles de transmisión se someten a tratamiento térmico de temple y revenido alto. El régimen de temple se determina por la posición de los puntos críticos y por la aptitud de la austenita para subenfriarse.

El calentamiento para el temple se efectúa por regla general, hasta una temperatura un poco superior (en 30-50ºC).En la mayoría de las marcas de acero de construcción con bajo contenido de carbono esta temperatura se encuentra cerca de los 900 ºC, y en los contenidos medio, cerca de los 850 ºC.

Los aceros de baja aleación, lo mismo que los aceros al carbono, deben templarse en agua (y únicamente si sus dimensiones son pequeñas en aceite), ya que la poca estabilidad de la austenita subenfriada en la

región de la descomposición perlítica (cerca de los 600 ºC) hace necesario un enfriamiento rápido de temple [9].

El aumento del contenido de los elementos de aleación hace que aumente la estabilidad de la austenita subenfriada, resultando posible el temple en aceite. En ciertos aceros con varios elementos de aleación (al cromo-volframio o al cromo-níquel-molibdeno), la transformación de la austenita en perlita se retrasa tanto que con el enfriamiento a bajas velocidades de las piezas de grandes dimensiones se consigue el subenfriamiento de la austenita hasta las temperaturas de transformación martensítica.

Al estudiar las condiciones que es necesario crear para el enfriamiento de temple de los aceros aleados con elementos que forman carburos hay que considerar otra peculiaridad de la cinética de descomposición de la austenita. En estos aceros de bajo contenido de carbono la velocidad de transformación bainítica a 300-400 ºC resulta ser mucho mayor que la de la descomposición perlítica (500-600 ºC). Por eso durante el temple debe acelerarse el enfriamiento de la región inferior de temperaturas a (300-400 ºC), para evitar la transformación bainítica [9].

1.3 La templabilidad como criterio de selección del acero para la fabricación de árboles de transmisión

Como resultado del temple las piezas de acero no siempre se endurecen al mismo nivel a través de toda su sección, a menos que sean piezas de muy pequeño espesor o se trate de aceros con un contenido importante de elementos de aleación. En realidad se forma un gradiente de dureza desde la superficie al centro de las piezas y además, la dureza obtenida en la superficie será distinta, según sea el espesor, siendo mayor, para un mismo acero, en el caso de que la pieza sea de menor espesor (figura 4, [10]). Este comportamiento es el llamado efecto de masa.

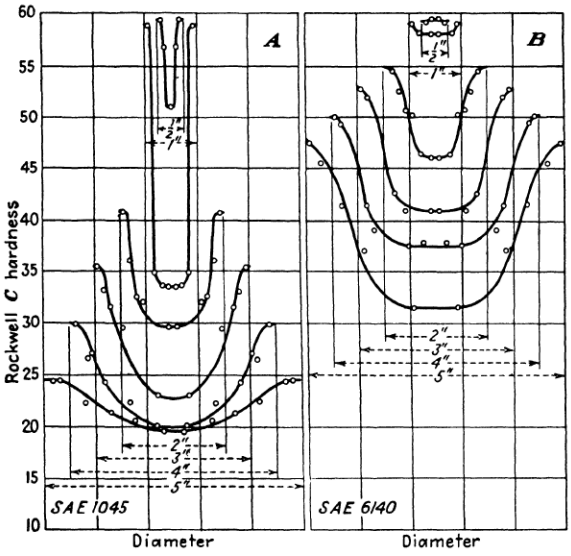


Figura 4. Distribución de la dureza en la sección transversal de barras de aceros SAE 1045 y SAE 6140 diferentes diámetros.

En la tabla 1 se aprecia cómo se pone de manifiesto el efecto de masa en varios aceros nomenclatura AISI. Asociada con este comportamiento de los aceros se tiene la característica conocida como templabilidad. La templabilidad es un término utilizado para describir la aptitud de un acero para endurecerse por la formación de martensita hasta determinada profundidad, como consecuencia del temple. Esta característica del acero depende de la composición química, y del tamaño de grano, siempre que quede fijado el medio de enfriamiento empleado en el temple.

En términos de profundidad de endurecimiento para definir la templabilidad se establece aquella distancia a la cual se garantiza una determinada cantidad de martensita; generalmente se acepta un 99,9 % ó un 50 % de este constituyente microestructural [11].

Tabla 1 Variación de la dureza superficie-centro de aceros nomenclatura AISI.

Tipo	Composición en %						Dureza HRc en la superficie y en el (centro) para diferentes diámetros			
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	12.5 mm	25 mm	50 mm	100 mm
Aceros al carbono										
1015	0.15	0.53	0.17	0.00	0.00	0.00	36.5(22.0)	Rb99.0(90.0)	Rb98.0(82.0)	Rb97.0(78.0)
1020	0.19	0.48	0.18				40.5(28.0)	29.5(Rb93.0)	Rb95.0(83.0)	Rb94.0(77.0)
1022	0.22	0.82	0.20				45.0(27.0)	41.0(Rb92.0)	38.0(Rb84.0)	34.0(Rb81.0)
1030	0.31	0.65	0.14				50.0(23.0)	46.9(21.0	30.0(Rb90.0)	Rb97.0(85.0)
1040 (aceite)	0.34	0.71	0.15				28.0(21.0)	23.0(18.0)	Rb93.0(91.0)	Rb91.0(89.0)
1050	0.54	0.69	0.19				64.0(57.0)	60.0(33.0)	50.0(25.0)	33.0(20.0)
1050 (aceite)	0.54	0.69	0.19				57.0(34.0)	33.0(26.0)	27.0(21.0)	Rb98.0(91.0)
1060 (aceite)	0.60	0.66	0.17				59.0(35.0)	34.0(30.0)	30.5(25.0)	29.0(24.0)
1080 (aceite)	0.85	0.76	0.13				60.0(40.0)	45.0(39.0)	43.0(37.0)	39.0(32.0)
1095	0.96	0.40	0.20				65.0(48.0)	64.0(44.0)	63.0(40.0)	63.0(30.0)
1095 (aceite)	0.96	0.40	0.20				60.0(41.0)	46.0(40.0)	43.0(37.0)	40.0(30.0)
1117	0.19	1.10	0.11				42.0(29.5)	37.0(Rb93.0)	33.0(Rb86.0)	32.0(Rb81.0)
1118	0.20	1.34	0.09				43.0(33.0)	36.0(Rb96.5)	34.0(Rb87.0)	32.0(Rb82.0)
1137	0.37	1.40	0.17				57.0(50.0)	56.0(Rb45.0)	52.0(24.0)	48.0(20.0)
1137 (aceite)	0.37	1.40	0.17				48.0(42.0)	34.0(Rb23.0)	28.0(18.0)	21.0(16.0)
1141 (aceite)	0.39	1.58	0.19				52.0(46.0)	48.0(38.0)	36.0(22.0)	27.0(18.0)
1147 (aceite)	0.46	1.37	0.05				39.0(28.0)	36.0(24.0)	30.0(22.0)	27.0(Rb97.0)
Aceros Aleados										
3310 (aceite)	0.09	0.50	0.27	3.45	1.55	0.06	38.0(37.0)	37.0(32.0)	32.0(29.0)	30.0(28.0)
9310 (aceite)	0.09	0.57	0.32	3.11	1.23	0.13	40.0(38.0)	40.0(37.0)	38.0(32.0)	31.0(29.0)
4320 (aceite)	0.20	0.59	0.25	1.77	0.47	0.23	44.5(44.5)	39.0(36.0)	35.0(27.0)	25.0(24.0)
4520 (aceite)	0.18	0.57	0.28	0.03	0.01	0.52	Rb96.0(93.0)	Rb94.0(89.0)	Rb94.0(88.0)	Rb93.0(82.0)
4620 (aceite)	0.17	0.52	0.26	1.81	0.10	0.21	40.0(31.0)	27.0(Rb97.0)	24.0(Rb91.0)	Rb96.0(88.0)
4820 (aceite)	0.20	0.61	0.29	3.47	0.07	0.22	45.0(44.0)	43.0(37.0)	36.0(27.0)	27.0(24.0)
8620 (aceite)	0.23	0.81	0.28	0.56	0.43	0.19	43.0(43.0)	29.0(25.0)	23.0(Rb97.0)	22.0(Rb93.0)
4130	0.30	0.48	0.20	0.12	0.91	0.20	51.0(50.0)	51.0(44.0)	47.0(31.0)	45.5(24.5)
8630	0.29	0.85	0.25	0.62	0.44	0.19	52.0(47.0)	52.0(43.0)	51.0(30.0)	47.0(22.0)
1340 (aceite)	0.40	1.77	0.25	0.10	0.12	0.01	58.0(57.0)	57.0(50.0)	39.0(32.0)	32.0(26.0)
3140 (aceite)	0.40	0.99	0.27	1.21	0.62	0.02	57.0(57.0)	55.0(55.0)	46.0(40.0)	34.0(33.5)
4140 (aceite)	0.40	0.83	0.26	0.11	0.94	0.21	57.0(55.0)	55.0(50.0)	49.0(38.0)	36.0(34.0)

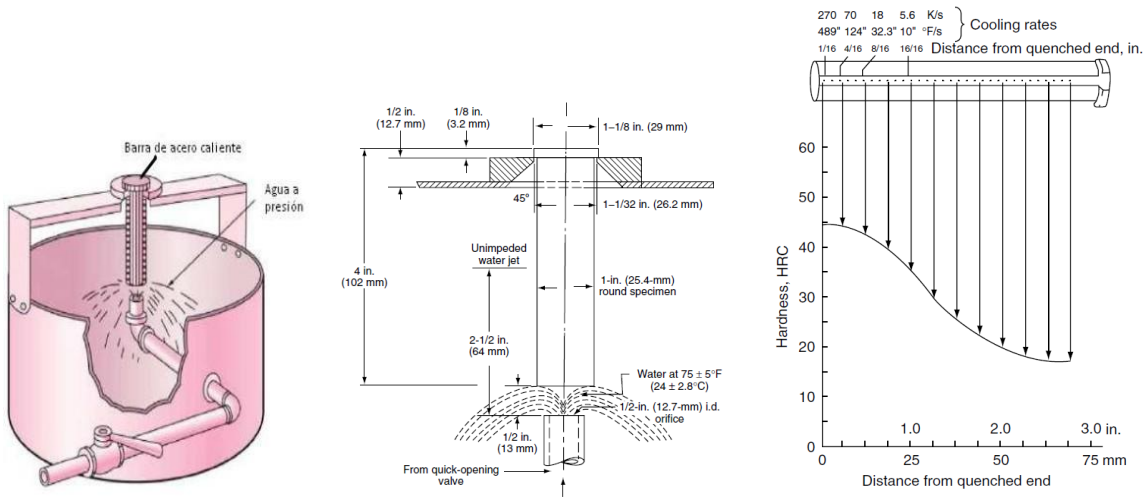
El método de mayor aplicación para la determinación de la templabilidad de manera experimental, entre otros, es el conocido como ensayo Jominy [12], mientras que la estimación no experimental de la

misma se puede realizar mediante el método analítico, entre los que se pueden citar a los métodos propuestos por Grossman [13] y por Just [14].

La realización del ensayo Jominy ha sido normalizada; aunque, a pesar de que diferentes países han establecido su propio documento en esencia no se encuentran diferencias significativas entre los mismos. En el caso de la norma ASTM A 255-02 se presentan ambos métodos de determinación de la templabilidad, lo que denota el grado de aceptación de los mismos [15].

En esencia el ensayo Jominy consiste en templar una probeta estandarizada del acero estudiado (figura 5b). Primero se calienta a la temperatura de austenización, enfriándola posteriormente mediante un chorro de agua, con una velocidad de flujo y a una temperatura especificadas por norma, de manera que sólo se enfría su cara inferior (figura 5a). Dicha cara actúa como superficie templante y enfría la probeta de forma longitudinal hacia su extremo superior sólo por conducción, apareciendo un gradiente de velocidades de enfriamiento desde la máxima velocidad en el extremo templado (inferior), a la mínima en el extremo superior.

Una vez que la probeta se ha enfriado a temperatura ambiente, se desbasta una tira de 0,4 milímetros de espesor y se determina la dureza a lo largo de los 50 mm primeros de la probeta. En los primeros 12,5 mm las lecturas de dureza se toman a intervalos de 1,6 mm y en los 37,5 mm siguientes cada 3,2 mm. Después se traza una curva de templabilidad representando los valores de dureza en función de la distancia al extremo templado (figura 5c). Tanto la dureza como la miscroestructura en cada punto de la probeta del ensayo Jominy se dependen de la velocidad de enfriamiento en el mismo y están en correspondencia con el diagrama de descomposición de la austenita para el acero estudiado (figura 6).



a b c

Figura 5. Representación esquematizada del ensayo Jominy

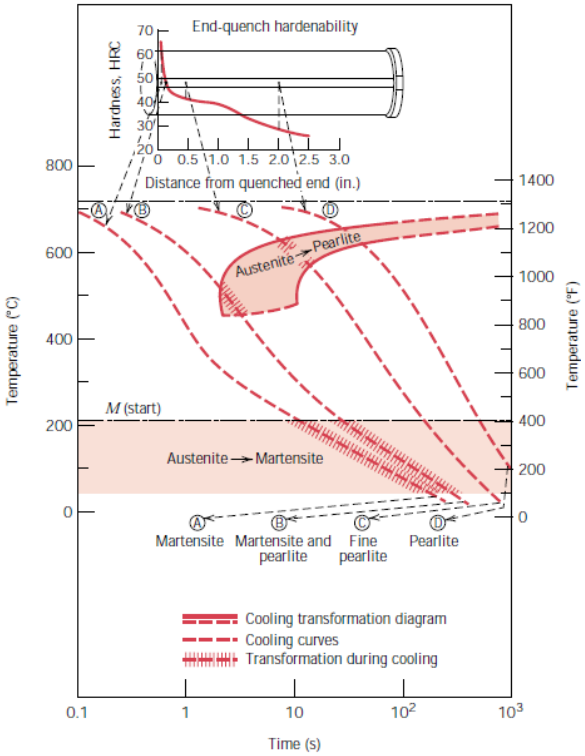


Figura 6. Esquema que ilustra la correspondencia entre la posición de los diferentes punto de la probeta del ensayo Jominy y el diagrama de descomposición de la austenita.

La determinación de la templabilidad mediante el ensayo Jominy, aunque sea sencilla y reproductible, implica la necesidad de preparar una

probeta y disponer de condiciones de laboratorio para desarrollar el ensayo. Es por ello que en muchos casos se intenta evitar realizar el ensayo, sobre todo teniéndose en cuenta que se ha visto que la templabilidad depende, para un enfriamiento dado, de la composición química y del tamaño de grano austenítico del acero.

El método de Grossman, asumido en la norma ASTM 255-02 [15], se basa en la determinación del llamado diámetro crítico ideal (**DI**) (mediante la ecuación 2, que incluye una serie de factores que se obtienen de manera tabular y dependen del tamaño de grano y de la composición química del acero), determinación la dureza máxima (de manera tabular, en función del contenido de carbono) y finalmente la determinación de la dureza para diferentes distancias de la probeta Jominy (dividiendo la dureza máxima entere factores que se obtienen de manera tabular y dependen del diámetro crítico ideal y la distancia Jominy). El método de Just se basa en ecuaciones de regresión que relacionan la dureza con la composición química del acero, el tamaño de grano y la distancia Jominy (ecuación 3).

$$D_I = F_C * F_{Mn} * F_{Si} * F_{Ni} * F_{Cr} * F_{Mo} * F_{Cu} \quad \ldots(2)$$

Donde:

D_I – diámetro crítico ideal

F_x – factor dependiente de la composición química del acero

$$J_E = 95\sqrt{C} - 0.00276 * E^2\sqrt{C} + 20C_r + 38M_o + 14M_n + 5.5N_i + 6.1S_i + 39V + 96P - 0.81k - 12.28\sqrt{E} + 0.898 - 13 \ldots(3)$$

Donde:

J_E – dureza HRc a la distancia Jominy **E** para diferentes contenidos de elementos de aleación

2. Desarrollo de la guía para la selección de aceros para la fabricación de árboles de transmisión de repuesto

Como ha sido expuesto en el epígrafe 1.1, en el diseño de árboles de transmisión para la determinación del diámetro mínimo en una sección se parte del conocimiento de las condiciones de trabajo del elemento y de las propiedades mecánicas de un acero seleccionado a priori. La esencia de la guía que se propone en el presente trabajo radica en la aplicación de un análisis tipo de ingeniería de diseño inverso, en el que primeramente se estiman las propiedades mecánicas del árbol de transmisión, a partir de la geometría y las condiciones de trabajo ya conocidas, y posteriormente se procede a la selección del acero sobre la base de los criterios de templabilidad.

2.1 Estimación del límite de fluencia y de la dureza del árbol de transmisión, a partir de su geometría y condiciones de trabajo

Para estimar el límite de fluencia de una pieza tipo árbol de transmisión, sometido solo a flexión y torsión, conocidas sus dimensiones; se propone aplicar la ecuación (1), empleada durante el diseño para determinar los diámetros de este tipo de elemento de máquinas. El análisis de ingeniería inversa consiste en que si se conocen las condiciones de trabajo del árbol y su geometría, entonces resulta conocido un grupo de variables de la ecuación (1), mientras que quedarían solamente como incógnita las variables relacionadas con las propiedades mecánicas del material, como son el límite de fluencia ($\mathbf{S_y}$) y la resistencia a la fatiga ($\mathbf{S'_n}$), de esta manera, para determinar ambas incógnitas bastaría con establecer el sistema de dos ecuaciones (4 y 5).

$$\mathbf{d_1}^3 = \frac{32 \cdot N}{\pi}\sqrt{\left(\frac{K_{t1} M_1}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{T1}{Sy}\right)^2} \ldots(4)$$

$$\mathbf{d_2}^3 = \frac{32 \cdot N}{\pi}\sqrt{\left(\frac{K_{t_2} M_2}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{T2}{Sy}\right)^2} \ldots (5)$$

Seleccionando los diámetros en dos secciones del árbol en las que el momento torsor sea el mismo ($T_1=T_2$) - por ejemplo entre dos elementos de transmisión - o el momento flector sea igual a cero (**M)** – por ejemplo en un extremo libre - se simplifica la solución del sistema de ecuaciones formado y se resuelve fácilmente en función de la resistencia a la fluencia (S'_n) tal como se aprecia en la ecuación 6 para el primer ejemplo o en función de la resistencia a la fatiga como se aprecia en la ecuación 7 para el segundo ejemplo. Una vez determinada cualquier una de estas variables se procede a determinar la otra por despeje y sustitución en la ecuación 4 ó 5, respectivamente.

$$S'_n = \sqrt{\frac{(K_{t_1} M_1)^2 - (K_{t_2} M_2)^2}{\frac{\pi^2 * d1^6}{32^2 * N^2} - \frac{\pi^2 * d2^6}{32^2 * N^2}}} \ldots (6)$$

$$Sy = \frac{T}{\sqrt{\frac{4}{3}\left(\frac{\pi^2 * d1^6}{32^2 * N^2}\right)}} \ldots\ldots (7)$$

El factor de seguridad (**N**) tiene valor de 2 para el diseño de piezas tipo ejes y árboles de transmisión, aunque, se deben manejar valores mayores para cargas de choque o impacto. El momento flector (**M**) se calcula sobre la base del análisis del diagrama de fuerzas actuantes que dependen de las condiciones de trabajo y las dimensiones de la pieza. El momento torsor (**T**) se calcula a partir de la potencia y la velocidad de giro que también dependen de las condiciones de trabajo.

Para poder aplicar los criterios de selección del acero en base a la templabilidad se hace necesaria la conversión del valor del límite de

fluencia en valor dureza. Para lograr esta conversión en la literatura se han publicado varias ecuaciones que tienen como sustento el análisis de regresión para establecer la relación entre dureza y límite de fluencia. La ecuación 8 es una de las que más se ajusta al caso objeto de estudio en el presente trabajo, además de tener un amplio espectro de aplicación [16].

$$\mathbf{Sy} = -\mathbf{90.7} + \mathbf{2.876} * \mathbf{HV} \ldots (8)$$

Donde:

Sy – límite de fluencia, MPa

HV – dureza Vickers

El valor de dureza de la ecuación (8) se puede convertir en valor de dureza HRc mediante la ecuación 9, obtenida por análisis de regresión aplicado a los valores tabulados en la norma ASTM E140-02 [17].

$$\mathbf{HRc} = -\mathbf{33.78341} + \mathbf{0.30557} * \mathbf{HV} - \mathbf{3.67049} * \mathbf{10^{-4}} * \mathbf{HV^2} + \mathbf{1.75} * \mathbf{10^{-7}} * \mathbf{HV^3} \ldots (9)$$

Las propiedades mecánicas estimadas, por ingeniería inversa, mediante las ecuaciones 6 a 9 se corresponden con los valores que debe tener el material del elemento objeto de estudio; las que han de corresponderse con la condición típica de tratamiento térmico que se aplica a los aceros de uso en la fabricación de árboles de transmisión: temple y revenido alto. Sin embargo, para la aplicación de los criterios de templabilidad se deben conocer los valores de dureza necesaria en la condición de temple solamente. Por esto se procede a convertir la dureza de temple y revenido, estimada mediante las ecuación 9, a dureza de temple, para lo cual se aplica la ecuación 10 [18].

$$\mathbf{H_h} = \left(\frac{\mathbf{T_t}}{\mathbf{167}} - \mathbf{1.2}\right) * \mathbf{H_T} - \mathbf{17} \ldots (10)$$

Donde:

H_h – dureza directamente del temple, unidades HRc

H_T – dureza de temple y revenido (resultado de las ecuaciones 8 y 9, unidades HRc

T_t – temperatura de revenido (entre 500 y 600 ^oC)

2.2 Procedimiento para la selección del acero para la fabricación de repuestos de árboles de transmisión, basada en la templabilidad

La selección del acero para la fabricación de repuestos de árboles de transmisión, en base a la templabilidad, busca definir un acero que por su composición química garantice la dureza requerida en la sección transversal del elemento que se fabricará; el valor de dicha dureza, que se estima de acuerdo al procedimiento descrito en el epígrafe 2.1, se refiere al valor que debe garantizarse en el centro del elemento; sin embargo, en la sección transversal del elemento se establece un gradiente de dureza, que va de un mayor valor en la superficie a otro menor en el centro.

El gradiente de dureza que se establece del centro a la superficie del de los árboles de transmisión, cuyo origen ha sido descrito en el epígrafe 1.3 y se sustenta en la templabilidad del acero, debe corresponderse con determinadas recomendaciones referidas a la cantidad de martensita que exista en dirección de la superficie al centro; en este sentido, se recomienda un 50 % de martensita en el núcleo, con 80 % a la mitad del radio [19]. En la superficie se obtendrá 100 % de martensita.

Para relacionar la cantidad recomendada de martensita con la dureza en la sección transversal del árbol de transmisión, primeramente se determina el grado de endurecimiento (**S** - razón entre de la dureza de un punto en el interior del elemento y la dureza máxima alcanzada en la

superficie) en el centro y a mitad de radio, como función de la cantidad de martensita (**S** y **M** respectivamente en la ecuación 11 [20]). Para 50 % y 80 % de martensita se obtiene un grado de endurecimiento de 0,72 y 0,89, respectivamente, lo cual se corresponde con recomendaciones de la literatura [11].

$$S = (M+80) / 180 \ldots (11)$$

Donde:

S – grado de endurecimiento

M – cantidad porcentual de martensita

Una vez establecidos los respectivos grados de endurecimiento se procede a determinar la dureza asociada con los mismos. Para esto se aplica la ecuación 12, que establece la relación entre el grado de endurecimiento **S**, la dureza en determinado punto del interior del elemento (H_x) y la máxima dureza alcanzada en la superficie (H_s) [11].

$$S = H_x / H_s \ldots (12)$$

Conocido el grado de endurecimiento y sobre la base de las ecuaciones 11 y 12 se llega a las ecuaciones 13 y 14 que representan la dureza de la superficie (H_s) y a medio radio de distancia del centro ($H_{r/2}$), respectivamente, en función de la dureza del centro (H_c). La dureza del material, estimada de acuerdo con el epígrafe 2.1, se corresponde con el mínimo valor de dureza a ser obtenido en el centro del elemento.

$$H_s = 1,40 * H_c \ldots (13)$$

$$H_{r/2} = 1,25 * H_c \ldots (14)$$

La dureza en la superficie (H_s) resulta ser la máxima dureza posible en el acero y depende únicamente de su contenido de carbono (**C**) (ecuación 15 [21]). Esto permite establecer el primer criterio de selección del acero: su contenido de carbono.

$$C = ((H_s - 18{,}7)/60)^2 \quad \ldots(15)$$

La distribución de la dureza en el interior del elemento de máquina depende de la templabilidad del acero, la que resulta ser determinada por los elementos de aleación presentes en el mismo. Este comportamiento del acero es el que da pie al segundo criterio para su selección: cantidad de elementos de aleación que garanticen la dureza necesaria en el centro y a mitad de radio del elemento de máquina.

Para aplicar este criterio se combina la ecuación 16, que establece la relación del diámetro del elemento (**D**) y la severidad de temple (**I**) con la distancia equivalente Jominy (**E**), con la ecuación 3, que establece la relación de la composición química, la distancia Jominy y el tamaño de grano con la dureza.

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{D}^{1.18}}{\mathbf{8.29} * \mathbf{I}^{0.44}} \ldots (\mathbf{16})$$

La severidad de temple depende del medio y del método de enfriamiento (tabla 2 [13]) y para el caso de árboles de transmisión con diámetros menores que 10 mm se recomienda aplicar el valor correspondiente al enfriamiento en agua con agitación leve, mientras para diámetros mayores se recomienda aplicar el valor correspondiente a aceite con agitación leve a moderada.

Tabla 2. Valores de la severidad de temple en dependencia del medio y el método de enfriamiento.

Método de enfriamiento	Medio de enfriamiento		
	Aceite	Agua	Salmuera
Sin agitación	0.25-0.30	1.0	2.0
Agitación leve	0.30-0.35	1.0-1.1	2.0-2.2
Agitación moderada	0.35-0.40	1.2-1.3	
Buena agitación	0.40-0.50	1.4-1.5	
Fuerte agitación	0.50-0.80	1.6-2.0	
Agitación violenta	0.80-1.10	4.0	5.0

Teniendo en cuenta la cantidad de cálculos necesarios para el desarrollo de la guía propuesta para la selección del acero para la fabricación de repuestos de árboles de transmisión, basada en la templabilidad; además de que la evaluación de cada acero disponible requiere de la repetición de estos cálculos, se ha desarrollado una herramienta digital que permite automatizar todo el procedimiento. Esta herramienta está soportada en el programa Microsoft Excel e incluye, además, una pequeña base de datos de aceros con los valores medios de su composición química.

2.3 Resumen de la secuencia de pasos de la guía propuesta para la selección de aceros para la fabricación de repuestos de árboles, basada en la templabilidad

1. Evaluación dimensional del árbol del cual se requiere fabricar su repuesto.
2. Cálculo del momento torsor y del momento flector.
3. Selección de dos secciones con igual momento torsor (cálculo del mismo) o con momento flector igual a cero.
4. Determinación del límite de fatiga para el primer caso de selección de las secciones o del límite de fluencia de para el segundo.
5. Determinación del límite de fatiga o del límite de fluencia, según corresponda de acuerdo al punto anterior.
6. Determinación de la dureza de revenido en unidades HV y HRc.

7. Determinación de la dureza HRc de temple, correspondiente al centro del elemento.
8. Determinación de la dureza de temple, correspondiente a la superficie H_s y a la mitad del radio del elemento $H_{r/2}$.
9. Determinación del contenido de carbono.
10. Selección de la severidad de temple.
11. Determinación de la distancia Jominy equivalente, correspondiente a la superficie y a la mitad del radio del elemento.
12. Determinación de la dureza a la distancia Jominy equivalente, correspondiente a la superficie, a la mitad del radio del elemento y al centro.
13. Comparación de los valores de dureza obtenidos en los puntos 6 y 7 con los obtenidos en el punto 11 y selección del acero.

3. Ejemplo de aplicación de la guía propuesta para la solución de un caso práctico de fabricación de repuesto de un árbol de transmisión

El árbol de transmisión mostrado en la figura (7) es parte de un sistema que suministra aire a un horno de fundición. El engrane **A** recibe una potencia de 149.14 kW del engrane **P** el cual esta acoplado a un motor. El engrane **C** entrega la potencia al engrane **Q** que es el que moverá las aspas del soplador. El eje gira a 600 rpm.

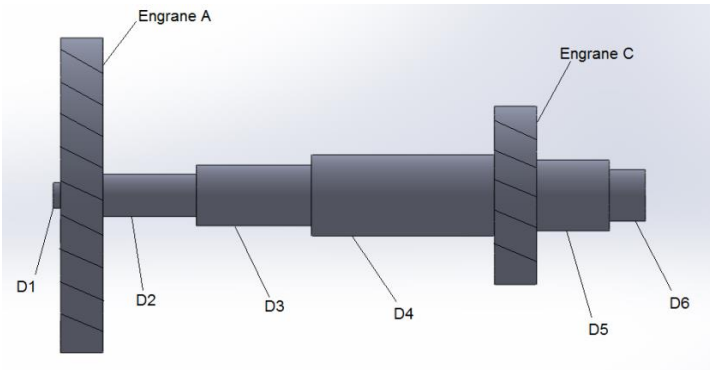


Figura 7. Esquema del árbol de transmisión objeto de análisis.

PASO1: Evaluación dimensional del árbol del cual se requiere fabricar su repuesto.

En la figura 8 se muestra el croquis con las dimensiones tomadas del árbol de transmisión objeto de análisis.

PASO2: Cálculo del momento torsor (T) y del momento flector (M).

Conociendo la potencia que le trasmite el motor al eje (**P**) y la velocidad a la cual gira (**n**) se calcula el par torsional por la siguiente expresión:

$$T = 9550 * 10^3 \frac{P}{n}$$

$$T_1 = 9550 * 10^3 \frac{149.14}{600} = 2373810 N \cdot mm$$

La figura (9) muestra los dos pares de engranes y las fuerzas que actúan sobre los mismos:

Los valores de estas fuerzas se calculan con las siguientes ecuaciones donde se necesita el torque calculado el diámetro que tiene el engrane y el ángulo de presión típico que es 20 o 25 grados.

Engrane A	**Engrane C**
$W_{tA} = T_A/(\frac{D_A}{2})$	$W_{tC} = \frac{T_C}{\frac{D_C}{2}}$
$W_{tA} = 2373.81/(\frac{508}{2})$	$W_{tC} = 23.73.8/(\frac{254}{2})$
$W_{tA} = 9.35\ kN$	$W_{tC} = 18.69\ kN$
$W_{rA} = W_{tA} * \tan(\phi)$	$W_{rC} = W_{tC} * \tan(\phi)$
$W_{rA} = 9.35 * \tan(20)$	$W_{rC} = 18.69 * \tan(20)$
$W_{rA} = 3.40\ kN$	$W_{rC} = 6.80\ kN$

Conocidas estas fuerzas se pasa a la construcción de un diagrama de fuerzas (figura 10) donde se colocan las reacciones a la que está sometido el eje.

$$\mathbf{M_B} = \sqrt{\mathbf{M_{Bx}^2 + M_{By}^2}}$$

$$\mathbf{M_B} = \sqrt{\mathbf{863.6^2 + 2374.9^2}}$$

$$\mathbf{M_B} = \mathbf{2527.04\ kN * mm}$$

$$\mathbf{M_B} = \mathbf{2527040\ N * mm}$$

$$\mathbf{M_c} = \sqrt{\mathbf{M_{cx}^2 + M_{cy}^2}}$$

$$\mathbf{M_c} = \sqrt{\mathbf{1381.76^2 + 1897.38^2}}$$

$$\mathbf{M_c} = \mathbf{2347.19\ kN * mm}$$

$$\mathbf{M_c} = \mathbf{2347190\ \ N * mm}$$

PASO 3: Selección de dos secciones con igual momento torsor (cálculo del mismo) o con momento flector igual a cero

Todas las secciones comprendidas entre los engranes A y C tienen igual momento torsor, por lo que se seleccionan las secciones 2 y 3, con diámetros de 81,8 y 90,17 mm respectivamente.

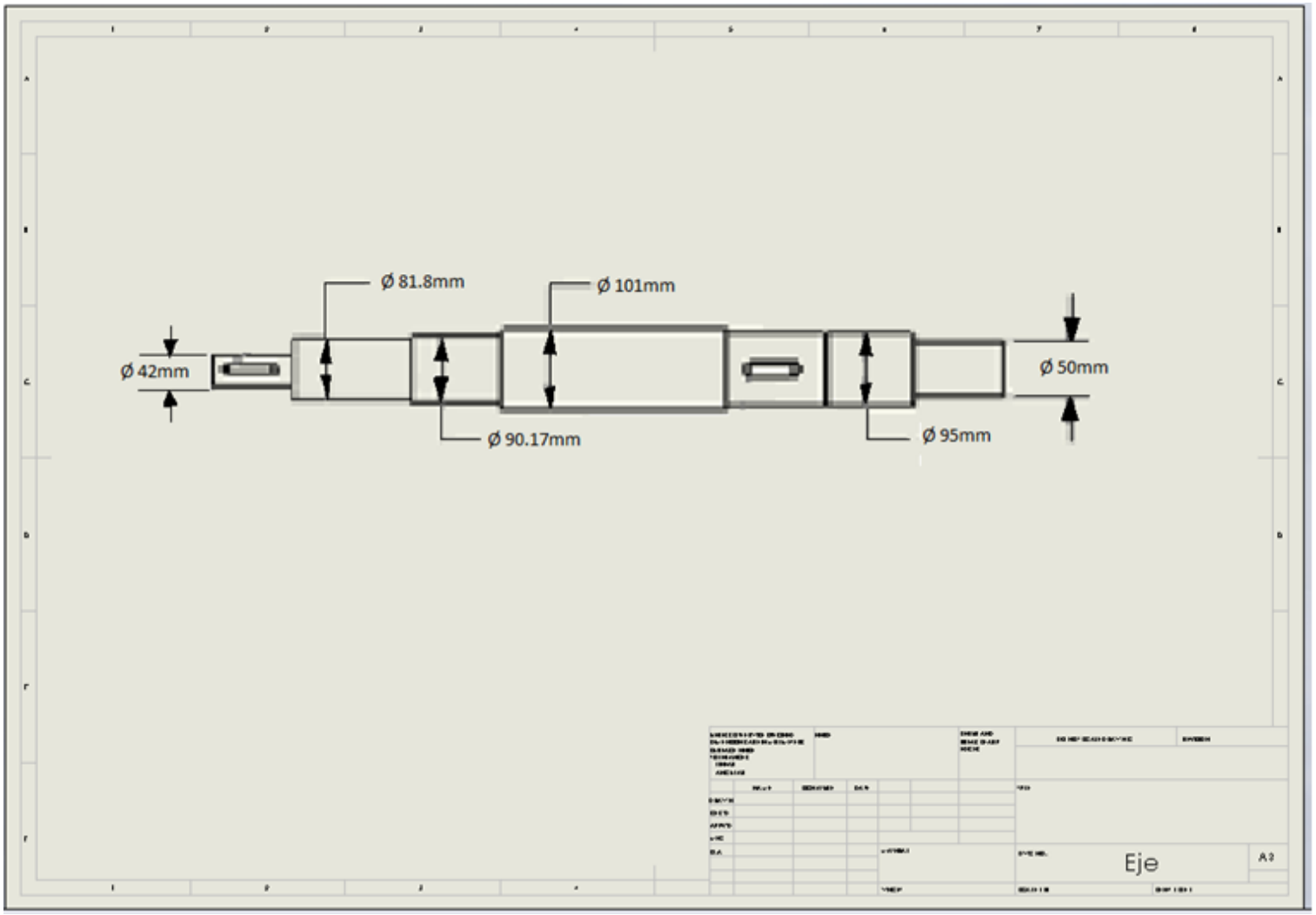


Figura 8. Croquis del árbol de transmisión objeto de análisis (creación propia).

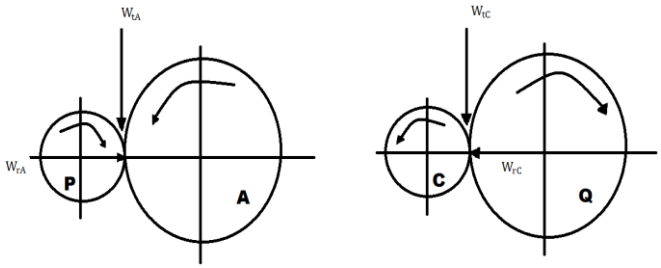


Figura 9. Esquema de las fuerzas actuantes en el sistema de transmisión.

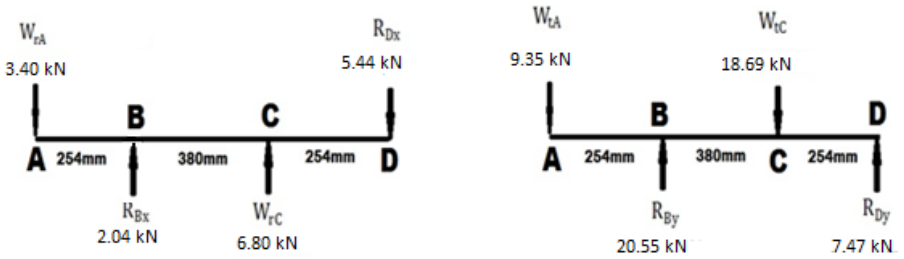


Figura 10. Diagrama de fuerzas actuantes en el sistema.

<u>PASO 4</u>: Determinación del límite de fatiga para el primer caso de selección de las secciones o del límite de fluencia de para el segundo.

$$S_n' = \sqrt{\frac{\left(K_{t_1} M_1\right)^2 - \left(K_{t_2} M_2\right)^2}{\frac{\pi^2 * d1^6}{32^2 * N^2} - \frac{\pi^2 * d2^6}{32^2 * N^2}}}$$

$$S_n' = \sqrt{\frac{(2.5 * 2527040)^2 - (2 * 2347190)^2}{\frac{3.14^2 * 90.17^6}{32^2 * 2^2} - \frac{3.14^2 * 81.8^6}{32^2 * 2^2}}}$$

$$S_n' = \sqrt{\frac{1.787486618 * 10^{13}}{57267445.17}}$$

$$S_n' = 176.6\ N/mm^2$$

$$S_n' = 176.6\ MPa$$

PASO 5: Determinación del límite de fatiga o del límite de fluencia, según corresponda de acuerdo al punto anterior.

$$S_y = \frac{T}{\sqrt{\frac{4}{3} * \left(\left(\frac{\pi^2 * d1^6}{32^2 * N^2} \right) - \left(\frac{K_{t_1} M_1}{S_n'} \right)^2 \right)}}$$

$$S_y = \frac{2373810}{\sqrt{\frac{4}{3} * \left(\left(\frac{3.14^2 * 90.17^6}{32^2 * 2^2} \right) - \left(\frac{2.5 * 2527040}{176.6} \right)^2 \right)}}$$

$$S_y = 548.7\ MPa$$

PASO 6: Determinación de la dureza de revenido en unidades HV y HRc.

$$HV = \frac{S_y + 90.7}{2.87}$$

$$HV = \frac{548.7 + 90.7}{2.87}$$

$$HV = 223$$

$$HRc = -33.78341 + 0.30557 * HV - 3.67049 * 10^{-4} * HV^2 + 1.75 * 10^{-7} * HV^3$$

$$HRc = -33.78341 + 68.1 - 18.25 + 1.94$$

$$HRc = 18,2$$

PASO 7: Determinación de la dureza HRc de temple, correspondiente al centro del elemento.

$$H_c = \left(\frac{T_T}{167} - 1.2\right) * H_T - 17$$

$$H_c = \left(\frac{650}{167} - 1.2\right) * 18 - 17$$

$$H_c = (2.392) * 18 - 17$$

$$H_c = 32,1\ HRc$$

PASO 8: Determinación de la dureza de temple, correspondiente a la superficie H_s y a la mitad del radio del elemento $H_{r/2}$.

$$H_s = 1,40 * H_c = 1,4 * 32,1 = 44,9\ HRc$$

$$H_{r/2} = 1,25 * H_c = 1,25 * 32,1 = 40,1\ HRc$$

PASO 9: Determinación del contenido de carbono.

$$C = ((H_s - 18,7)/60)^2 = ((44,9 - 18,7)/60)^2 = 0,19$$

PASO 10: Selección de la severidad de temple.

Se selecciona el valor de 0,35, correspondiente a un enfriamiento con agitación entre leve y moderada.

PASO 11: Determinación de la distancia Jominy equivalente, correspondiente a la superficie y a la mitad del radio del elemento.

$$\mathbf{Ec} = \frac{\mathbf{D}^{1.18}}{8.29 * \mathbf{I}^{0.44}} = \frac{101^{1.18}}{8.29 * 0{,}35^{0.44}} = \mathbf{44{,}4\ mm}$$

$$\mathbf{E\ r/2} = \frac{\mathbf{D}^{1.16}}{8.62 * \mathbf{I}^{0.51}} = \frac{101^{1.16}}{8.62 * 0{,}35^{0.51}} = \mathbf{38{,}2\ mm}$$

PASO 12: Determinación de la dureza a la distancia Jominy equivalente, correspondiente a la superficie, a la mitad del radio del elemento y al centro.

El cálculo correspondiente a este punto se realiza para cada acero y resulta muy tedioso hacerlo manualmente, por lo que se aplica la herramienta computacional preparada como parte del presente trabajo. Los resultados obtenidos, correspondientes a los pasos 1 al 11, se muestran en la tabla A1 (del anexo).

PASO 13: Comparación de los valores de dureza obtenidos en los puntos 6 y 7 con los obtenidos en el punto 11 y selección del acero

Sobre la base de los cálculos del punto 12, se comparan los valores obtenidos para cada acero en cada punto analizado (centro, mitad del radio y superficie) con los requeridos (obtenidos sobre la base de los cálculos de diseño en los pasos 7 y 8).

Como se parecía en la tabla A2 (del anexo), los aceros que satisfacen los valores mínimos de dureza en cada punto son 4320H y 4620H, con los cuales es posible fabricar el árbol objeto de análisis.

CONCLUSIONES

1. Se verifica que la templabilidad, en función de la composición química y de la severidad de temple, ha de ser el criterio fundamental a tener en cuenta para la selección del acero en la fabricación de repuestos de árboles de transmisión.
2. La aplicación de la ingeniería inversa a la fabricación de repuestos de árboles de transmisión se logra, satisfactoriamente, aplicando los siguientes pasos:

- Evaluación dimensional del árbol del cual se requiere fabricar su repuesto.
- Cálculo del momento torsor y del momento flector.
- Selección de dos secciones con igual momento torsor (cálculo del mismo) o con momento flector igual a cero.
- Determinación del límite de fatiga para el primer caso de selección de las secciones o del límite de fluencia de para el segundo.
- Determinación del límite de fatiga o del límite de fluencia, según corresponda de acuerdo al punto anterior.
- Determinación de la dureza de revenido en unidades HV y HRc.
- Determinación de la dureza HRc de temple, correspondiente al centro del elemento.
- Determinación de la dureza de temple, correspondiente a la superficie H_s y a la mitad del radio del elemento $H_{r/2}$.
- Determinación del contenido de carbono.
- Selección de la severidad de temple.
- Determinación de la distancia Jominy equivalente, correspondiente a la superficie y a la mitad del radio del elemento.
- Determinación de la dureza a la distancia Jominy equivalente, correspondiente a la superficie, a la mitad del radio del elemento y al centro.
- Comparación de los valores de dureza obtenidos en los puntos 6 y 7 con los obtenidos en el punto 11 y selección del acero.

RECOMENDACIONES

Verificar los resultados de la guía propuesta mediante la comprobación experimental basada en la caracterización del material.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA

1. Lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución. Ed. Comité Central PCC. Cuba. 2011.
2. Mott, R. Diseño de elementos de máquinas. v.2. Ed. Félix Varela. 2010.
3. Rodríguez P. M. Reacondicionamiento de piezas y estructuras metálicas. Folleto. UCLV. 2015.
4. Reshetov D. Atlas de Diseño de Elementos de máquinas. Ed. Pueblo y Educación. 1986.
5. ANSI B106. 1M-85. Design of transmission shafting. American society of mechanical engeneers. New York. 1985.
6. Mott, R. Diseño de elementos de máquinas. V.2. Ed. Félix Varela. 2010.
7. ASM Metals Handbook. v.01XXXX
8. Riba C, Romeva I. Selección de materiales en el diseño de máquinas. Ed. UPC, 2010.
9. Guliaev A. Metalografía. T II. Ed. Félix Varela. 2009.
10. Crafts W y Lamount J. Hardenability and steel selection Ed. Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd. 1942.
11. Totten G. Metallurgy and technologies. Steel heat treatment handbook. 2007.
12. Jominy W. Hardenability Tests. in Hardenability of Alloy Steels. American Society for Metals, Cleveland, 1939
13. Grossman M. Hardenability Calculated from Chemical Composition. Trans. Am. Inst. Min. Met. Eng. v. 150, 1942.
14. Just E. Harterei- Tecnische Mitteilungm. 2. 1968.
15. Annual Book of ASTM Standards. ASTM A 255 – 02. Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel. Vol 03.01- 2001.

16. Pavlina E, Van T. Correlation of yield strength and tensile sterngth with hardness for steels. Journal of materials engineering and performance. V. 17(6). December, 2008.
17. Annual Book of ASTM Standards. ASTM E 140-02. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope. 2002
18. Smoljan B, Dario I, Totten G. Mathematical modeling and simulation of hardness of quenched and tempered steel. Metallurgical and materials transactions B. v. 46B. December 2015.
19. Calvo R. El acero su elección y selección. Ed. INTA, 1956.
20. Filetin T, Liscic B, Galinec J. New computer aided method for steel selection based on hardenability. Heat treatment of metals. No. 3, 1996.

ANEXO

Tabla A2. Resultados de los cálculos automatizados de los pasos 1 al 11 de la guía propuesta.

Hoja de Cálculo del límite de fluencia	
Datos de entrada (símbolo) [unidad de medida]	***Valores***
Potencia que se transmite.(P) [W]	***149,14***
Velocidad de giro. (n) rpm	***600***
Par Torsional en el eje. (T) N*mm	***2373811,7***
Momento flexionante 1.(M) N*mm	***2527040***
Momento flexionante 2.(M) N*mm	***2347190***
Factor de seguridad 1. (N)	***2***
Factor de seguridad 2. (N)	***2***
Concentrador de tensiones 1.(Kt)	***2,5***
Concentrador de tensiones 2.(Kt)	***2***
Valor del díametro. (D1) mm	***90,17***
Valor del díametro. (D2) mm	***81,8***
Valores Calculados	
Resistencia a la fatiga del material (Sn). Mpa	***176,67***
Límite de fluencia del material (Sy). Mpa	***553,83***

Cálculos para seleccionar el tipo de acero	
Datos de entrada (símbolo) [unidad de medida]	***Valores***
Dureza de revenido (Ht). [HRC]	***18,23212743***
Temperatura de revenido (Tt) [°C]	***650***
Dureza de temple en el centro(Hc)	***32,08481732***
Dureza de temple en la superficie (Hs)	***44,91874425***
Dureza de temple en en r/2($H_{r/2}$)	***40,10602165***
Contenido de carbono, %	***0,190950708***
Severidad de temple	***0,35***
Valor del díametro mayor de la pieza (D) [mm]	***101***
Distancia Jominy equivalente centro	***44,3766742***
Distancia Jominy equivalente r/2	***38,20377534***

Tabla A2. Resultados de los cálculos de dureza basados en la templabilidad del acero.

AISI	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	H_C	$H_{r/2}$	H_S
	%	%	%	%	%	%	%	HRc	HRc	HRc
4027H	0,24	0,8	0,25	0	0	0,25	0	5,5	6,5	48,1
4028H	0,24	0,8	0,25	0	0	0,25	0	5,5	6,5	48,1
4032H	0,29	0,8	0,25	0	0	0,25	0	9,8	11,0	51,0
4037H	0,34	0,8	0,25	0	0	0,25	0	13,8	15,0	53,7
4042H	0,39	0,8	0,25	0	0	0,25	0	17,5	18,8	56,2
4047H	0,44	0,8	0,25	0	0	0,25	0	21,0	22,3	58,5
4130H	0,27	0,5	0,25	0	0	0,2	0	2,0	3,1	49,9
4135H	0,32	0,8	0,25	0	0	0,2	0	10,4	11,5	52,6
4137H	0,34	0,8	0,25	0	0	0,2	0	11,9	13,1	53,7
4140H	0,37	0,875	0,25	0	0	0,2	0	15,2	16,4	55,2
4142H	0,39	0,875	0,25	0	0	0,2	0	16,7	17,9	56,2
4145H	0,42	0,875	0,25	0	0	0,2	0	18,8	20,1	57,6
4147H	0,44	0,875	0,25	0	0	0,2	0	20,2	21,5	58,5
4150H	0,47	0,875	0,25	0	0	0,2	0	22,1	23,5	59,8
4161H	0,55	0,875	0,25	0	0	0,3	0	31,0	32,4	63,2
4320H	0,19	0,55	0,25	1,775	1,775	0,25	0	**42,4**	**43,4**	**44,9**
4620H	0,19	0,55	0,25	1,775	1,775	0,25	0	**42,4**	**43,4**	**44,9**
4718H	0,15	0,775	0,25	1,05	1,05	0,35	0	26,5	27,4	41,9
4720H	0,17	0,6	0,25	1,05	1,05	0,075	0	15,9	16,8	43,4
50B40H	0,37	0,875	0,25	0	0	0	0	7,6	8,8	55,2
50B44H	0,42	0,875	0,25	0	0	0	0	11,2	12,5	57,6
5046H	0,43	0,875	0,25	0	0,28	0	0	17,5	18,8	58,0
50B46H	0,43	0,875	0,25	0	0,28	0	0	17,5	18,8	58,0
50B50H	0,47	0,875	0,25	0	0,5	0	0	24,5	25,9	59,8
50B60H	0,55	0,875	0,25	0	0,5	0	0	29,6	31,0	63,2
5120H	0,17	0,8	0,25	0	0,8	0	0	5,0	6,0	43,4
5130H	0,27	0,85	0,25	0	0,975	0	0	18,8	19,9	49,9
5132H	0,29	0,7	0,25	0	0,875	0	0	16,4	17,6	51,0
5135H	0,32	0,7	0,25	0	0,925	0	0	19,9	21,0	52,6

5140H	0,37	0,8	0,25	0	0,8	0	0	22,6	23,8	55,2
5147H	0,45	0,825	0,25	0	1,025	0	0	33,0	34,3	58,9
5150H	0,47	0,8	0,25	0	0,8	0	0	29,5	30,8	59,8
5155H	0,5	0,8	0,25	0	0,8	0	0	31,4	32,8	61,1
5160H	0,55	0,875	0,25	0	0,8	0	0	35,6	37,0	63,2
6150H	0,47	0,8	0,25	0	0,975	0	0,075	35,9	37,3	59,8
81B4S5	0,42	0,875	0,25	0,3	0,45	0,115	0	26,2	27,5	57,6
8617H	0,14	0,775	0,25	0,55	0,5	0,075	0	1,1	2,0	41,1
8620H	0,17	0,775	0,25	0,55	0,5	0,075	0	4,6	5,5	43,4
8622H	0,19	0,775	0,25	0,55	0,5	0,075	0	6,7	7,6	44,9
8625H	0,22	0,775	0,25	0,55	0,5	0,075	0	9,6	10,7	46,8
1040	0,34	0,71	0,15	0	0	0	0	2,5	3,6	53,7
1050	0,54	0,69	0,19	0	0	0	0	16,0	17,4	62,8
1137	0,37	1,4	0,17	0	0	0	0	14,5	15,7	55,2
1137	0,37	1,4	0,17	0	0	0	0	14,5	15,7	55,2
1141	0,39	1,58	0,19	0	0	0	0	18,6	19,8	56,2
1147	0,46	1,37	0,05	0	0	0	0	19,6	20,9	59,4
4320	0,2	0,59	0,25	1,77	0,47	0,23	0	17,1	18,1	45,5
4520	0,18	0,57	0,28	0,03	0,01	0,52	0	7,2	8,1	44,2
4620	0,17	0,52	0,26	1,81	0,1	0,21	0	5,1	6,0	43,4
4820	0,2	0,61	0,29	3,47	0,07	0,22	0	18,6	19,6	45,5
8620	0,23	0,81	0,28	0,56	0,43	0,19	0	14,3	15,3	47,5
4130	0,3	0,48	0,2	0,12	0,91	0,2	0	22,8	24,0	51,6
8630	0,29	0,85	0,25	0,62	0,44	0,19	0	20,5	21,6	51,0
1340	0,4	1,77	0,25	0,1	0,12	0,01	0	25,7	26,9	56,6
3140	0,4	0,99	0,27	1,21	0,62	0,02	0	31,3	32,6	56,6
4140	0,4	0,83	0,26	0,11	0,94	0,21	0	36,6	37,9	56,6