



<http://opn.to/a/LV4mV>

VIEW POINTS | PUNTOS DE VISTA

# Procedure on the Selection of Steels and their Heat Treatment Technology

## *Procedimiento sobre la selección de aceros y de su tecnología de tratamiento térmico*

Dr.C. Francisco Martínez Pérez\*

Universidad Tecnológica de La Habana-CUJAE, Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, Marianao, La Habana, Cuba.

**ABSTRACT.** The proper selection and correct application of heat treatment technology for the manufacture of machine elements require procedures and knowledge that today, become much more complex. In all careers of mechanical content, it is essential in undergraduate and postgraduate, not only their knowledge, but their correct application. It is essential to know previously the required working conditions of temperature, environment, different kinds of resistance (tensile, flexion, torsion, fatigue), but sometimes it is necessary to differentiate the properties of the core from those of the surface, which requires of the knowledge of a new science, “surface engineering”. The present work refers the essentials for the application of working requirements of the element and its correct teaching. in the form of algorithmic is introduced reasoning and applying novel aspects, some of them, developed by the author.

**Keywords:** Education Production of Machine Elements, Engineering, Algorithmic Reasoning.

**RESUMEN.** La selección adecuada y la correcta aplicación de la tecnología del tratamiento térmico para la fabricación de un elemento de máquina necesitan de procedimientos y conocimientos que hoy, se hacen mucho más complejos. En todas las carreras de contenido mecánico, es indispensable en pregrado y posgrado no solo su conocimiento sino su correcta aplicación. Es indispensable conocer previamente de las condiciones de trabajo exigidas de temperatura, medio ambiente, resistencias de diferente índole (a tracción, flexión, torsión, fatiga) sino que en ocasiones se necesitan diferenciar las propiedades del núcleo de las de la superficie, lo que exige del conocimiento de una nueva ciencia, “la ingeniería de superficies”. En el presente trabajo en forma de razonamientos algorítmicos y aplicando aspectos novedosos, algunos desarrollados por el autor, se pretenden facilitar los elementos esenciales para lograr una aplicación exitosa que garanticen las exigencias de trabajo del elemento y su correcta enseñanza.

**Palabras clave:** educación, producción de elementos de máquina, ingeniería de superficies, razonamiento algorítmico

## INTRODUCTION

The integral response that is needed in a machine element is closely related not only to the correct selection of the material to be used, but also to the heat treatment technology that must be applied. The resistance of a machine element, in many cases requires the obtaining of martensitic structures, which provide greater hardness and resistance. In turn, many machine elements require different properties in the core than on the surface, where low wear requirements are present. Today the problem of

## INTRODUCCIÓN

La respuesta integral que se necesita en un elemento de máquina está íntimamente relacionada no solo con la correcta selección del material a utilizar, sino con la tecnología de tratamiento térmico que debe ser aplicada. La resistencia de un elemento de máquina, en muchos casos exige de la obtención de estructuras martensíticas, siendo éstas las que brindan una mayor dureza y resistencia. A su vez, muchos elementos de máquina requieren propiedades diferentes en el núcleo que en la superficie, donde están presentes exigencias de poco desgaste. Hoy la problemática de las exigencias de una

the demands of a surface needs the application of tribology elements and surface engineering.

The formation of stress gradients in adhesive wear processes implies the possibility that wear and friction are concentrated only in the surface layer with the least possible penetration of the acting forces in it. Otherwise, there is a risk that wear will occur from inside the layer and therefore, it and the damage are much greater.

In the quenching process of a steel, its chemical composition, the actual carbon content, the cooling medium (its temperature and stirring), the dimensions and shapes of the element and the need or not to differentiate properties in the core and superficial have to be taken into account. In the present work some algorithms design by the author are introduced and several tables and figures that allow achieving these purposes are presented. They were employed in industrial practice with satisfactory results.

## DEVELOPMENT OF THE TOPIC

The work is not intended to deepen in the selection of the steel to be used. The existence of various publications and articles referring to that [1-6] makes this unnecessary. On the contrary, everything related to the selection and correct application of the heat treatment technology or technologies will be deepened, as well as in regard to surface engineering" in terms of differentiating the properties of core and surface and the interrelation between both.

### Volumetric Treatment and that in which it is Necessary to Differ Core and Surface Properties

The first aspect to take into account in the selection of the heat treatment technology to be used for the complete fulfilment of the work requirements will be aimed at knowing the need or not to differentiate the properties of the core and surface and ensure its proper interrelation. It must be taken into account from the beginning that, as this procedure progresses, there may be a need to change the steel initially selected. This first aspect led to an algorithmic approach can be seen in Figure 1.

In the case that is not necessary to differentiate the properties of the core and surface, the procedure of the technology to be used must include the rigorous analysis of the resistance required to guarantee the working conditions and this will include the structural characteristics of the material. This analysis must include:

- What kind of requests are acting? (Tensile, flexural, torsional and fatigue resistance, combined applications, impact loads, working temperature, etc.)
- Dimensions of the element.
- Existing technological conditions of manufacture, number of elements to be manufactured.
- All these well-known aspects are not essential parts of the procedure that is presented. This, in turn, will

superficie necesita de la aplicación de elementos de tribología y de ingeniería de superficies (Apraiz, 1984, 1985, 2000; Agüero, 2007).

La formación de gradientes de esfuerzo en procesos de desgaste adhesivo, implican la posibilidad de que el desgaste y la fricción se concentren solo en la capa superficial con la menor penetración posible en la misma de los esfuerzos actuantes. De no ser así, se corre el riesgo de que el desgaste se produzca desde el interior de la capa y por tanto sea mucho mayor y también el daño (Martínez y Gordon, 1985; Jorochoilov y Gordon, 1988; Valencia, 3988; Kudriatseva, 2005; Martínez, 2016).

En el proceso de temple de un acero, se deben tener en cuenta su composición química, el contenido real de carbono, el medio de enfriamiento (su temperatura y agitación), las dimensiones y formas del elemento y la necesidad o no de diferenciar propiedades en el núcleo y superficiales (Alpizar, 2004; Vander *et al.*, 2004; Escobar, 2013).

En el trabajo se propone un procedimiento, utilizando varios enfoques algorítmicos, que permiten que la aplicación de todo el proceso de obtención de las propiedades integrales del elemento sean consideradas y permitan un mejor resultado. Se presentan varias tablas y figuras que permiten alcanzar estos propósitos; habiendo sido empleados en la práctica industrial con resultados satisfactorios.

## DESARROLLO DEL TEMA

No se pretende en el trabajo profundizar en la selección del acero a emplear. La existencia de diversas publicaciones y artículos referidos al tema tales como Apraiz (1984); Martínez (1988, 2000); Kudriatseva (2005); Arza (2006), hace esto innecesario. Por el contrario se profundizará en todo lo referido a la selección y correcta aplicación de la o las tecnologías de tratamiento térmico, así como en lo referido a la ingeniería de superficies según Martínez (2014), en cuanto a diferenciar las propiedades de núcleo y superficie y la interrelación entre ambos.

### Tratamiento volumétrico o aquel en que sea necesario diferenciar propiedades del núcleo y la superficie

El primer aspecto a tener en cuenta en la selección de la tecnología de tratamiento térmico a emplear para la completa satisfacción de las exigencias de trabajo estará destinado a conocer de la necesidad o no de diferenciar las propiedades de núcleo y superficie y el garantizar su adecuada interrelación. Hay que tener en cuenta desde un principio que a medida que se avance en este procedimiento, habrá quizás la necesidad de cambiar el acero inicialmente seleccionado. Este primer aspecto llevado a un enfoque algorítmico se podrá ver así (Fig. 1).

Analicemos en primer término la variante en que no se hace necesario diferenciar las propiedades del núcleo y superficie. En este caso, el procedimiento de la tecnología a emplear deberá incluir el riguroso análisis de la resistencia exigida para garantizar las condiciones de trabajo y esto incluirá las características estructurales del material. En este análisis hay que incluir:

- ¿qué tipo de solicitudes están actuando? (resistencia a la tracción, a la flexión, a la torsión, a la fatiga, solicitudes combinadas, existen cargas de impacto, qué temperatura es la de trabajo, etc.)
- Dimensiones del elemento.
- Condiciones tecnológicas existentes de fabricación, número de elementos a fabricar.

provide an analysis that essentially starts from knowing how much martensite is needed in the nucleus and how this is achieved, taking into account the shape and dimensions of the piece and the characteristics of the tempering medium (this will be closely related to the concept of hardenability).

d) Todos estos aspectos harto conocidos, no son parte esencial en el procedimiento que se presenta, el cual aportará un análisis que parte esencialmente de conocer qué cantidad de martensita se necesita en el núcleo y cómo esto se logra, teniendo en cuenta la forma y dimensiones de la pieza y las características del medio de temple (esto estará íntimamente relacionado con el concepto de templabilidad).

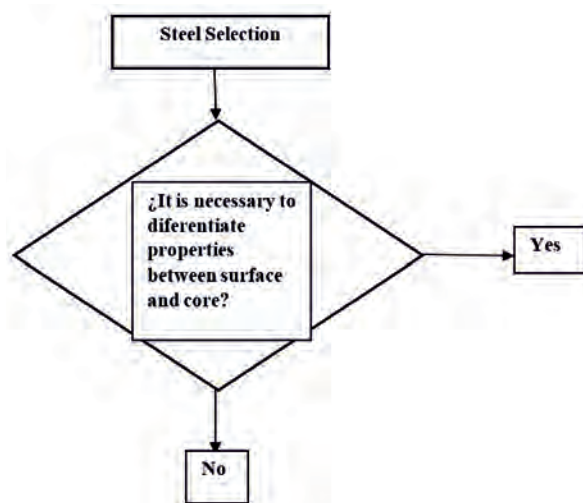


FIGURE 1. Algorithmic approach in the first step of the procedure.  
 FIGURA 1. Enfoque algorítmico en el primer paso del procedimiento.

The calculation of hardenability is a perfectly defined technological problem in numerous textbooks and other publications on Heat Treatment

In the fundamental, it starts with the results obtained in an analysis on an equipment for the Jominy test. In this test, it is possible to establish a relationship between the distance to the tempered end in the test tube standardized for it and, using the standard parameters for the Jominy test, to know the maximum diameter in which a 50% martensitic transformation can be obtained in the steel in question. Obtaining 50% of martensitic transformation will depend on the carbon content and the presence of alloying elements. Table 1 shows the average hardness possible to reach in an area with 50% of martensite for carbon and alloy steels

El cálculo de la templabilidad es un problema tecnológico perfectamente definido en numerosos libros de texto y otras publicaciones sobre Tratamiento Térmico (Caballero, 2012; Martínez, 2015). En lo fundamental, se parte de los resultados obtenidos en un análisis en un equipamiento para el ensayo Jominy. En este ensayo se puede establecer una relación entre la distancia al extremo templado en la probeta normalizada para el mismo y empleando los parámetros normalizados para el ensayo Jominy, conocer el diámetro máximo en el que se puede obtener un 50% de transformación martensítica en el acero en cuestión. La obtención del 50% de transformación martensítica dependerá del contenido de carbono y de la presencia de elementos aleantes. En la Tabla 1 se puede apreciar para aceros al carbono y aleados la dureza promedio posible a alcanzar en una zona con un 50 % de martensita (Martínez, 2000).

TABLE I. Average hardness in the area of 50% martensite based on carbon content and type of steel  
 TABLA I. Dureza promedio en la zona de 50% de martensita en función del contenido de carbono y del tipo de acero

CARBON CONTENT (%)	HRC	
	Carbon steels	Alloying steels
0,08-0,17	-	25
0,18-0,22	25	30
0,23-0,27	30	35
0,28-0,32	35	40
0,33-0,42	40	45
0,43-0,52	45	50
0,53-0,62	50	55
≥ 0,63	55	60

Table 2 shows with greater precision the hardness that can be achieved depending on the carbon content and the content of the martensitic transformation

En la Tabla 2 se observa con mayor precisión la dureza que puede alcanzarse en función del contenido de carbono y el contenido de la transformación martensítica (Martínez, 2000).

**TABLE 2. Effect of carbon concentration and % martensite (M) on the average hardness of tempered steel**  
**TABLA 2. Efecto de la concentración de carbono y el % de martensita (M) en la dureza promedio del acero templado**

Carbon content, %	HRC				
	99% M	95% M	90% M	80% M	50% M
0,10	38,5	32,9	30,7	27,8	26,2
0,20	44,2	40,5	38,2	35,0	31,8
0,30	50,3	47,0	44,6	41,2	37,5
0,36	53,9	50,4	47,6	44,4	40,5
0,38	55,0	51,4	49,0	45,4	41,5
0,40	56,1	52,4	50,0	46,4	42,4
0,42	57,1	53,4	50,9	47,3	43,4
0,44	58,1	54,3	51,8	48,2	44,3
0,45	59,1	55,2	52,7	49,0	45,1
0,48	60,0	56,0	53,5	49,8	46,0
0,50	60,9	56,8	54,3	50,6	46,8
0,52	61,7	57,5	55,0	51,3	47,7
0,54	62,5	58,2	55,7	52,0	48,5

However, if it is needed to analyze the hardenability of any piece, the results of the Jominy test, constitute only a first step, which also needs additional considerations, and which after obtaining the result, requires the application of a series of additional steps, which conform a calculation methodology [3, 8, 9].

This paper intends to present this methodology, through a calculation algorithm, which was used successfully for the analysis of the hardenability of several elements.

This methodology in the form of an algorithm is shown in Figure 2

Sin embargo, si se quiere analizar la templabilidad de una pieza cualquiera, los resultados del ensayo Jominy, constituyen solo un primer paso, que además necesita de consideraciones adicionales, y que después de obtenido el resultado, se exige de la aplicación de una serie de pasos adicionales, que conforman una metodologías de cálculo (Apraiz, 1984; Caballero, 2012; Martínez, 2015).

En este trabajo se pretende presentar esa metodología, mediante un algoritmo de cálculo, lo cual fue empleado exitosamente para el análisis de la templabilidad de varios elementos.

Esta metodología en forma de algoritmo se muestra en la Figura. 2

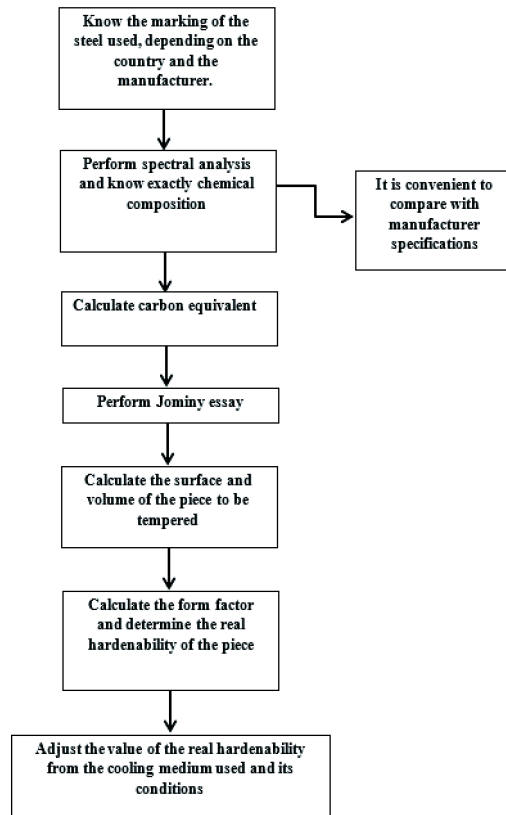


FIGURE 2. Algorithm for the correct calculation of the hardenability of a machine element.  
 FIGURA 2. Algoritmo para el cálculo correcto de la templabilidad de una pieza.

In the Jominy test, the hardenability is found with a ratio  $L / D = 3$  (like that of the Jominy test), in which, with different cooling means, a total volumetric hardening is achieved (at least 50% of martensite in the core). This diameter is called the ideal diameter ( $D_i$ ).

As it is understood, the pieces do not necessarily have this relationship ( $L / D = 3$ ). To know if any piece can have total hardenability, a form factor  $K_f$  is used.

$$D_p = D_i \cdot K_f \quad (1)$$

Where:

$D_p$  - is the diameter or average thickness of the piece possible to obtain total tempering;

$D_i$  - Ideal diameter according to the Jominy test;

$K_f$  - form factor.

In turn, the form factor is equal to

$$(S/V)_p = (S/V)_j \cdot K_f \quad (2)$$

Where:

$(S / V)_p$  - is the surface / volume ratio of the actual piece to calculate;

$(S / V)_j$  - is the surface / volume ratio from the Jominy test.

On the other hand, the different cooling means affect the value of the ideal critical diameter ( $D_i$ ). This is due to several causes, but fundamentally, to the severity with which the heat of the piece is transmitted to the medium. The cooling means have different hardening severities, not only among them (as can be seen in Table 3), but also depending on their temperature and the speed of circulation.

En el ensayo Jominy, la templabilidad se halla con una relación  $L/D = 3$  (como la del ensayo Jominy), en que se alcanza, con diferentes medios de enfriamiento, un temple total volumétrico (al menos 50 % de martensita en el núcleo). Este diámetro se denomina diámetro ideal ( $D_i$ ).

Como se comprenderá, las piezas no guardan necesariamente esta relación ( $L/D = 3$ ). Para saber si una pieza cualquiera puede tener una templabilidad total se emplea un factor de forma  $K_f$ .

$$D_p = D_i \cdot K_f \quad (1)$$

donde:

$D_p$  - es el diámetro o espesor medio de la pieza posible a obtener temple total;

$D_i$  - diámetro ideal según el ensayo Jominy;

$K_f$  - factor de forma.

A su vez, el factor de forma es igual a

$$(S/V)_p = (S/V)_j \cdot K_f \quad (2)$$

donde:

$(S/V)_p$  - es la relación superficie/volumen de la pieza real a calcular;

$(S/V)_j$  - es la relación superficie/volumen de la probeta Jominy.

Por otra parte, los diferentes medios de enfriamiento inciden en el valor del diámetro crítico ideal ( $D_i$ ). Esto se debe a varias causas, pero en lo fundamental, a la severidad con que se transmite el calor de la pieza al medio. Los medios de enfriamiento presentan severidades de temple diferentes, no sólo entre ellos (como se puede apreciar en la Tabla 3) sino también en función de su temperatura y de la velocidad de circulación.

**TABLE 3. Severity of the comparative tempering of different cooling media depending on the temperature of the medium in centigrade and the speed of circulation of the medium in m/s**

**TABLA 3. Severidad del temple comparativa de diferentes medios de enfriamiento en función de la temperatura del medio en °C y de la velocidad de circulación del medio en m/s**

COOLING MEDIUM	TEMPERATURE OF THE MEDIUM °C	CIRCULATION VELOCITY		SEVERITY
		m/s		
WATER	32	0	1,1	
		0,25	2,1	
		0,51	2,7	
		0,76	2,8	
	55	0	0,2	
		0,25	0,6	
		0,51	1,5	
		0,76	2,4	
FAST OIL	60	0	0,5	
		0,25	1,0	
		0,51	1,1	
		0,76	1,5	

From the table it can be seen that the water has a harder severity than the oil; and that as the speed of circulation increases, the severity of cooling increases, both in water and in oil.

There are different types of cooling oil. Table 3 compares water with fast oils, which double or triple their severity of tempering compared to conventional ones. It is also recommended to use oil cooling, calculating it up to 60-70 °C (Apraiz, 1984).

De la tabla se puede apreciar que el agua tiene una severidad de temple mayor que la del aceite; y que a medida que se incrementa la velocidad de circulación se incrementa la severidad de enfriamiento, tanto en el agua como en el aceite.

Existen diferentes tipos de aceite de enfriamiento. En la Tabla 3 se compara el agua con aceites rápidos, los cuales duplican o triplican su severidad de temple en comparación con los convencionales. Además se recomienda emplear el enfriamiento en aceite, calculando éste hasta 60-70 °C (Apraiz, 1984).



On the other hand, the cooling rate of the different media also depends on the temperature range in which it occurs. This can be seen in Table 4 (Martínez, 2000). In conclusion, the results of the percent of martensite to be obtained and to what depth it is reached depend not only on the steel used, but on the cooling medium, its temperature, its stirring characteristics and the shape and size of the piece treated, all factors that must be taken into account and with them influence the primary outcome.

Por otra parte, la velocidad de enfriamiento de los diferentes medios también depende del rango de temperatura en que éste se produce. Esto puede apreciarse en la Tabla 4 (Martínez, 2000). Como conclusión, los resultados del % de martensita a obtener y hasta qué profundidad se alcanza la misma no solo dependen del acero empleado, sino del medio de enfriamiento, su temperatura, sus características de agitación y la forma y tamaño de la pieza tratada, factores todos que hay que tener en cuenta y con ellos incidir en el resultado primario.

**TABLE 4. Cooling speed of different media depending on the temperature range during cooling**  
**TABLA 4. Velocidad de enfriamiento de diferentes medios en función del rango de temperaturas durante el enfriamiento**

COOLING MEDIUM	COOLING SPEED IN °C/s	
	RANGE FROM 650-500 °C	RANGE FROM 300-200 °C
Water at 30 °C	500	270
Water at 50 °C	100	270
Water at 75 °C	30	200
Emulsion of oil and water	200	-
Medium mineral oil	100-150	20-50
Compressed air	30	10
Air	3	1

In this way, taking into account all the proposed elements, a favorable result of the required hardenability can be obtained.

The calculation procedure in cases where the properties of the core and the surface need to be differentiated is shown below.

#### **Treatment in which the Properties of the Nucleus (CORE) and the Surface are Needed to be Differentiated [7].**

The first aspects to consider in this case are:

- What properties are required on the surface?
- What properties are required in the core?
- What layer depth is needed?
- Possible gradient of stresses generated in the core-surface.

The first two aspects are data on working conditions. In the case of axes subjected to bending, the calculation of the layer depth can be carried out according to the procedure shown.

In a coordinate system to scale, they will be located on the Y axis, dimensions in mm, first placing the radius of the axis and on the X axis in MPa, the values of different efforts will be placed. This scheme will look as it is shown in Figure 3

In other cases where contact stresses penetrate deep into the component, towards the entire surface layer or even below it (negative gradients) methods that generate thicker surface layers are needed.

On the line that demarcates the end of the radius of the axis, the value of the acting bending stress will be and it will be designated as  $\sigma_{fla}$ . Then, on the same axis, the value of the flexural stress of the material in its surface layer will be placed and it will be designated as  $\sigma_{flm}$ . Naturally,  $\sigma_{flm} > \sigma_{fln}$ , which, together with the necessary depth of layer to obtain, will indicate, the value that must be obtained in the layer, which, in turn, will delimit, as it will be seen later, the type of surface treatment to be used.

De esta forma, teniendo en cuenta todos los elementos propuestos, se podrá obtener un resultado favorable de la templeabilidad exigida.

A continuación se mostrará el procedimiento de cálculo en los casos en que se necesita diferenciar las propiedades del núcleo y de la superficie.

#### **En que se necesitan diferenciar las propiedades del núcleo y de la superficie (Martínez, 2014).**

Los primeros aspectos a considerar en este caso serán:

- ¿Qué propiedades se exigen en la superficie?
- ¿Qué propiedades se exigen en el núcleo?
- ¿Qué profundidad de capa se necesita?
- Posible gradiente de esfuerzos que se generan en núcleo-superficie.

Los dos primeros aspectos son datos de condiciones de trabajo. Para el cálculo de la profundidad de capa en el caso de ejes sometidos a flexión puede ser llevado a cabo según el procedimiento que se muestra.

En un sistema de coordenadas a escala, se situarán en el eje Y, dimensiones en mm, colocando en primer término el radio del eje y en el eje X en MPa se irán colocando valores de diferentes esfuerzos. Este esquema se verá de la forma que se muestra en la Fig. 3

En otros casos en que los esfuerzos de contacto penetran profundamente dentro del componente, hacia toda la capa superficial o aún más debajo de la misma (gradientes negativos), se necesitan de métodos que generen capas superficiales más gruesas.

Sobre la línea que demarca el extremo del radio del eje se situará el valor del esfuerzo de flexión actuante, el cual designaremos por  $\sigma_{fla}$ . A continuación sobre el mismo eje se situará el valor del esfuerzo de flexión del material en su capa superficial, que designaremos como  $\sigma_{flm}$ . Como es natural,  $\sigma_{flm} > \sigma_{fln}$ , lo cual, unido a la profundidad necesaria de capa a obtener, nos indicará, el valor que debe obtenerse en la capa, lo que, a su vez delimitará, como veremos más tarde el tipo de tratamiento superficial a emplear.

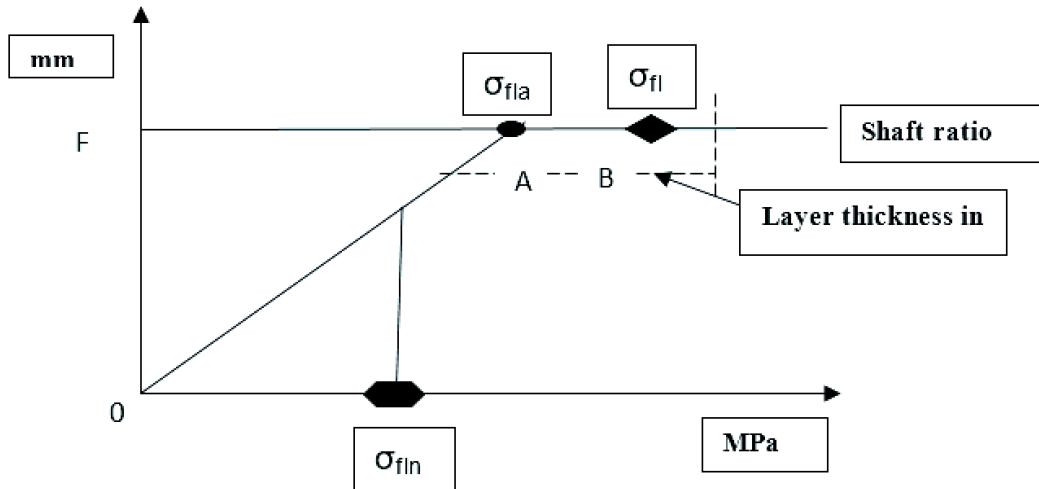


FIGURE 3. Scheme for calculating the layer thickness depending on the acting efforts of bending.  
 FIGURA 3. Esquema para el cálculo del espesor de capa en función de los esfuerzos de flexión actuantes.

Then, on the line X, the value of the required bending stress will be placed in the core of the material that will be designated as  $\sigma_{fn}$ . As it is known, bending forces applied to an axis, follow a linear distribution from the surface to the center, so  $\sigma_{fa}$  will be connected to the origin of coordinates that will be the center of the axis (See Figure 1). Then, by raising a line from  $\sigma_{fn}$  to point D, it will be known to what depth the layer must be obtained to give a comprehensive response to the requested effort demand, this value will be given by  $\sigma_{fn}-D$ .

In this way, a mathematical formula for calculating the thickness of layer e can be established based on the similarity of triangles.

$$\sigma_{fa}/r = \sigma_{fa} - \sigma_{fn} / e \quad (3)$$

where:

$\sigma_{fa}$  is the applied bending effort;

r is the radius of the axis;

$\sigma_{fn}$  is the bending effort that supports the core;

e is the layer thickness to be calculated.

Thus:

$$e = (\sigma_{fa} - \sigma_{fn})r / \sigma_{fa} \quad (4)$$

It will always be convenient to increase the calculated thickness by 0.1 - 0.15 mm in order to avoid the critical point D.

The final aspect to be analyzed, from the point of view of surface engineering, is what type of layer should be used, which may also establish the need to vary the steel to be used, provided that the conditions established above are guaranteed therein. For this analysis, the gradient of efforts that may occur must be taken into account, which is not within the objectives of this work.

The wide diversity of surface engineering materials existing, allow the designer to select them, at least to a certain extent, instead of using materials that are volumetrically equal to that of their surface (ASM, 1988; Martínez, 2012)

Figure 4 shows the wide range of combination of layer depth and hardness that can be obtained (Apraiz, 1984).

A continuación, sobre la línea X se situará el valor del esfuerzo de flexión exigido en el núcleo del material que designaremos por  $\sigma_{fn}$ . Como es conocido los esfuerzos de flexión aplicados a un eje, siguen una distribución lineal desde la superficie hasta el centro, por lo que uniremos  $\sigma_{fa}$  con el origen de coordenadas que será el centro del eje (Fig. 1). A continuación, levantando una recta desde  $\sigma_{fn}$  hasta el punto D, se conocerá hasta que profundidad hay que obtener la capa, para dar una respuesta integral a la solicitud de esfuerzo demandadas, este valor estará dado por  $\sigma_{fn}-D$ .

De esta forma podrá establecerse basado en la semejanza de triángulos una fórmula matemática para calcular el espesor de capa e.

$$\sigma_{fa}/r = \sigma_{fa} - \sigma_{fn} / e \quad (3)$$

donde:

$\sigma_{fa}$  es el esfuerzo de flexión aplicado;

r es el radio del eje;

$\sigma_{fn}$  es el esfuerzo de flexión que soporta el núcleo;

e es el espesor de capa que se desea calcular.

Por lo tanto:

$$e = (\sigma_{fa} - \sigma_{fn})r / \sigma_{fa} \quad (4)$$

Siempre será conveniente incrementar el espesor calculado en 0,1-0,15 mm con la finalidad de evitar el punto crítico D.

Analicemos ahora como aspecto final, desde el punto de vista de la ingeniería de superficies qué tipo de capa deberá emplearse, lo cual podrá también establecer la necesidad de variar el acero a emplear, siempre que se garanticen en el mismo las condiciones anteriormente establecidas. Para este análisis habrá que tener en consideración el gradiente de esfuerzos que se puedan producir, lo que no está dentro de los objetivos de este trabajo.

La amplia diversidad de materiales superficiales ingenieros existentes, permiten al diseñador su selección, al menos con cierta amplitud, en vez de utilizar materiales voluméricamente iguales al de su superficie (ASM, 1988; Martínez, 2012).

La Figura 4 muestra el amplio rango de combinación de profundidad de capa y de dureza que puede obtenerse en las superficies por estos métodos (Apraiz, 1984).

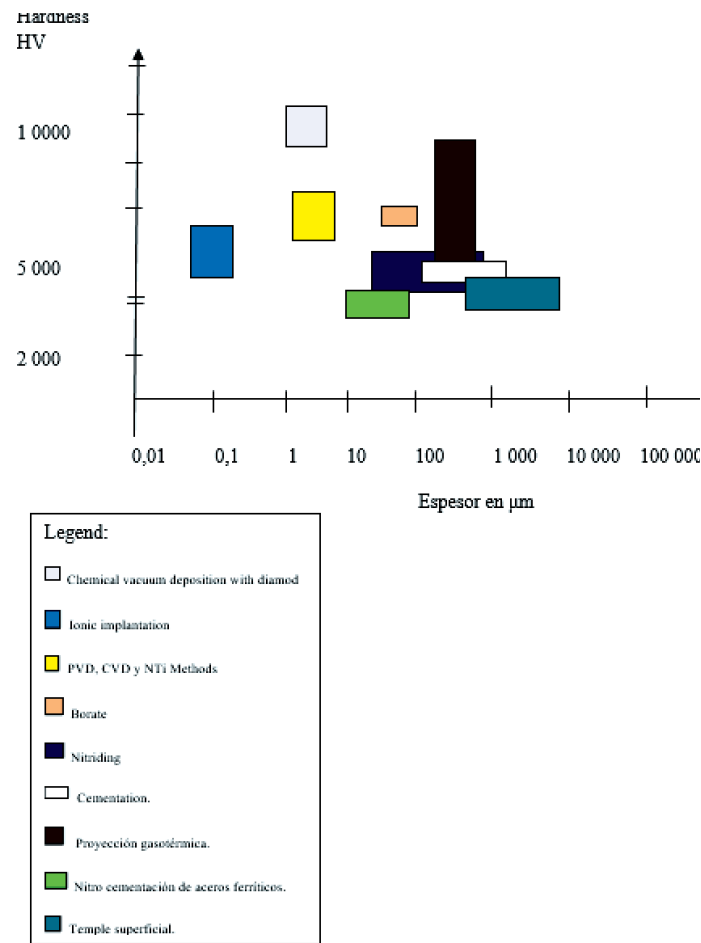


FIGURE 4. Depths and hardness typical of different forms of coatings and surface hardening.  
 FIGURA 4. Profundidades y durezas típicas de diferentes formas de recubrimientos y endurecimientos superficiales.

From Figure 4, it can be concluded that different methods offer different possibilities of combining depths and hardness of the surface layer. It is noteworthy that some methods such as chemical nickel, nickel plating, chromate phosphate and others are missing. Those methods such as surface depositions with PVD, CVD or ionic implants that produce only very thin layers and great hardness, will be useful for use in those applications with a minimum wear extension and where the stress acting on the surface decreases rapidly, during the work, so that the thin surface layer is not removed. This is associated with the elastic interaction stage being reached quickly.

## CONCLUSIONS

- In the present work it has been shown, through algorithmic reasoning and using various tables and figures, some elaborated by the author, a procedure for the most accurate calculation of technology selection for volumetric treatment of steel parts or those in which it is needed to differentiate the properties between the core and the surface of some steel machine elements. In the latter, the concept of surface engineering has been introduced to achieve a response, not only in terms of the strength and hardness requirements of the outermost layer of the element, but also in terms of the

De la Figura 4, puede concluirse que diferentes métodos ofrecen diferentes posibilidades de combinación de profundidades y dureza de la capa superficial. Es de destacar que faltan algunos métodos como el níquel químico, el niquelado, el cromado el fosfatado y otros. Aquellos métodos como las deposiciones superficiales con PVD, CVD o las implantaciones iónicas que producen solo capas muy finas y gran dureza, serán útiles su empleo, en aquellas aplicaciones con una extensión de desgaste mínima y donde el esfuerzo actuante en la superficie decrezca rápidamente, durante el trabajo, de forma tal que la delgada capa superficial no sea eliminada. Esto está asociado con que se alcance la etapa de interacción elástica rápidamente.

## CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se ha mostrado, mediante un razonamiento algorítmico y utilizando diversas tablas y figuras, algunas elaborados por el autor, un procedimiento para el cálculo más acertado de selección de tecnologías de tratamientos volumétricos de piezas de acero, de aquellas en que se necesita diferenciar las propiedades entre el núcleo y la superficie de algunos elementos de máquina de aceros. En este último se ha introducido el concepto de la ingeniería de superficie para lograr respuesta, no solo en cuanto a las



depth of the layer to prevent acting loads cause damage to the core of the material, due to insufficient layer thickness. A figure was provided for the calculation of the layer depth in elements subjected to bending loads.

exigencias de resistencia y dureza de la capa más externa del elemento, sino también en cuanto a la profundidad de la capa para evitar que las cargas actuantes provoquen daño en el núcleo del material, por un insuficiente espesor de capa. Se brindó una figura para el cálculo de la profundidad de capa en elementos sometidos a cargas de flexión.

## REFERENCIAS/REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÜERO, A.: "Ingeniería de superficies y su impacto medioambiental", *Revista de metalurgia*, 43(1): 63-75, 2007, ISSN: 1988-4222.
- ALPÍZAR, T.E.: *Apuntes acerca del Tratamiento Térmico y la Clasificación General de los Aceros*, Inst. Universidad de Matanzas, Facultad de Ingeniería Químicas y Mecánica, Matanzas, Cuba, 2004.
- APRAIZ, B.J.: *Tratamientos térmicos de los aceros*, 8va. Edición ed., Madrid, España, 1984, ISBN: 84-237-0568-4.
- APRAIZ, B.J.: *Tratamientos térmicos de los aceros*, Ed. Ed. Dossat, Madrid, Madrid, España, 1985.
- APRAIZ, B.J.: *Tratamientos térmicos de los aceros*, Madrid, España, 2000, ISBN: 84-95312-56-5.
- ARZA, M.B.N.: *Materiales de Construcción*, Tercera ed., vol. Manual, Moscú, Rusia, 2006, ISBN: 5-217-01112-2.
- ASM: *ASM Handbook*, Ed. ASM International, Second ed., USA, 1988, ISBN: 0-87170-377-7.
- CABALLERO, N.: *Manual de Práctica de Tecnología de Tratamiento Térmico*, La Habana, Cuba, 2012, ISBN: 978-959-261-314-0.
- ESCOBAR, C.: *Materiales de construcción para edificación y obra civil*, Ed. Editorial Club Universitario, 2013, ISBN: 84-9948-297-X.
- JOROCHAILOV, V.; GORDON, J.: *Teoría y Tecnología del Tratamiento Térmico*, La Habana, Cuba, 1988.
- KUDRIATSEVA, I.V.: *Materiales en la Construcción de Maquinarias*, Tercera Edición, ed., vol. Manual, vols. Tomos II y III, Moscú, Rusia, 2005, ISBN: 621-002-33-3.
- MARTÍNEZ, F.: *Tecnología del Tratamiento Térmico, Un enfoque sistémico*, Ed. Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba, 2000, ISBN: 958-258-113-4.
- MARTÍNEZ, F.; GORDON, J.: "Teoría y tecnología del tratamiento térmico", *Editorial Pueblo y Educación SNLC: CU*, 1(3), 1985.
- MARTÍNEZ, P.F.: *Teoría y Tecnología del Tratamiento Térmico*, Ed. Editorial Pueblo y Educación, RA01.13820.0 ed., La Habana, Cuba, 1988, ISBN: 01.68820.3.
- MARTÍNEZ, P.F.: "Análisis de la relación entre las propiedades de la superficie y el volumen del cuerpo desde la Ingeniería de Superficies", *Revista Cubana de Ingeniería*, 3(2): 51-57, 2012, ISSN: 2223-1781.
- MARTÍNEZ, P.F.: "¿Qué es la Ingeniería de Superficies?Cuál es su aplicación?", Inst. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (ISPJAE-CUJAE), CubaMan, NT 272, CUJAE, Marianao, La Habana, Cuba, 2014.
- MARTÍNEZ, P.F.: *Teoría y Práctica de la Tecnología de Tratamiento Térmico de aleaciones ferrosas*, Colombia, 2015.
- MARTÍNEZ, P.F.: "Procedimiento para la adecuada selección de aceros y de su tecnología de tratamiento térmico", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(2): 58-64, 2016, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.
- VALENCIA, A.: *Tecnología de Tratamiento Térmico de los Metales*, Colombia, 1988, ISBN: 958-655-081-8.
- VANDER, V.G.F.; LAMPMAN, S.R.; SANDERS, B.R.; ANTON, G.J.; AMÉZQUITA, C.E.; KINSON, J.; MULDOON, K.; HENRY, S.; SCOTT JR, W.W.: *ASM handbook*, Ed. Metallography and microstructures, vol. 9, 2004

\*Author for correspondencgFrancisco Martínez-Pérez, e-mail: fmartinez@ceim.cujae.edu.cu

Received: 11/01/2019.

Approved: 19/12/2019.

Francisco Martínez Pérez, Profesor e Investigador Titular Universidad Tecnológica de La Habana-CUJAE, Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, Marianao, La Habana, Cuba, Teléfono: 7 2663642, e-mail: fmartinez@ceim.cujae.edu.cu

El autor de este trabajo declara no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra sujeto a la Licencia de Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.