

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**MÁSTER EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE
MATERIALES**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**“DESARROLLO DE ENSAYOS DE
CEMENTACIÓN A BAJA PRESIÓN CON
PROPANO PARA EL ACERO 19MNCR5”**

DIRECTOR: D. Julio Antonio Riba López

AUTOR: D. Israel García García

Oviedo, Julio de 2013

A mi familia.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, dar las gracias a D. Julio Antonio Riba López, director del trabajo fin de máster, por toda la ayuda prestada y las recomendaciones dadas a la hora de presentar este trabajo.

A D. Pascal Lamesle y a D. Serge Tovar por las explicaciones dadas sobre los parámetros a utilizar en el horno de cementación y las indicaciones dadas a la hora de preparar las muestras.

Por último, agradecer a Amandine Arnal, Angélique Bouilly y Natacha Cendrier, el apoyo recibido durante mi estancia en el centro de investigación CROMEP.



PRÓLOGO

Los tratamientos térmicos y termoquímicos, destinados a la mejora de las propiedades estructurales de los materiales en piezas mecánicas, están sometidos a continuos cambios. Con frecuencia se originan deformaciones que causan defectos de calidad y como consecuencia de ello, pérdidas económicas.

Durante mi estancia en el centro de investigaciones CROMEP, se planteó un proyecto que pretendía mejorar y generalizar estos tratamientos a escala industrial, concretamente el tratamiento de cementación a baja presión. Apoyado en dicho proyecto se ha propuesto este trabajo fin de máster con el objetivo de desarrollar ensayos óptimos en un horno de cementación con el fin de obtener una cementación de 800 μm de profundidad para el acero 19MnCr5 y un porcentaje de carbono en superficie de entre el 0,6 % y el 0,8 %.

En dicho trabajo se muestra el objetivo del mismo y las especificaciones a tener en cuenta (atendiendo a las limitaciones y los riesgos presentes), se describen los ensayos de cementación desarrollados, detallando las etapas realizadas en los mismos y posteriormente se muestran los resultados obtenidos y su posterior análisis.



ÍNDICE

PRÓLOGO	III
1. INTRODUCCIÓN	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	2
2.1 EL TRATAMIENTO DE CEMENTACIÓN A BAJA PRESIÓN	2
2.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	3
2.3 LIMITACIONES INHERENTES AL PROYECTO	4
3. DESARROLLO DE ENSAYOS DE CEMENTACIÓN A BAJA PRESIÓN	6
3.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	9
3.2 ENSAYOS EN EL HORNO DE CEMENTACIÓN	11
3.3 RECUBRIMIENTO DE MUESTRAS.....	16
3.4 ENSAYOS DE MICRODUREZA Y MICROSCOPIA	19
3.5 ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DEL ACERO	23
4. RESULTADOS OBTENIDOS	28
4.1 ACONDICIONAMIENTO DEL LABORATORIO	28
4.2 PROCEDIMIENTO DE UTILIZACIÓN DEL HORNO	29
4.3 ANÁLISIS DE MICRODUREZA Y MICROSCOPIA	30
4.4 AMPLIACIÓN DEL TRABAJO	37
4.5 ESTIMACIÓN DE COSTES	38
5. CONCLUSIONES	40
ÍNDICE DE FIGURAS	41
BIBLIOGRAFÍA	42
ANEXOS	43
ANEXO I: PRESUPUESTO	44
ANEXO II: PLANIFICACIÓN Y SEGUIMIENTO	46



1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de cementación a baja presión se encuadra dentro de la familia de tratamientos térmicos, concretamente dentro de los tratamientos termoquímicos, los cuales pueden cambiar la estructura de los materiales con el objetivo de obtener unas propiedades concretas.

El proyecto realizado, cuyos clientes se componen de empresas y centros de investigación en el campo de los materiales, está interesado en desarrollar un programa informático para el control de estos tratamientos termoquímicos. El trabajo aquí presente se enmarca dentro de las especificaciones a realizar en dicho proyecto europeo.

Entre los objetivos encomendados en dicho proyecto destacan: determinar las especificaciones operativas para ajustarse a los estándares de los equipos de trabajo y su entorno (particularmente para cementar con propano y acetileno), llevar a cabo las pruebas necesarias para optimizar los parámetros del tratamiento del horno de cementación para lograr un perfecto control del mismo, definir y redactar los procedimientos para el uso de los equipos, y finalmente desarrollar los ensayos de cementación a baja presión con propano y acetileno para el acero 19MnCr5, especificando el personal necesario, el tipo de instalaciones, las horas demandadas.

Durante el trabajo del “Desarrollo de ensayos de cementación a baja presión con propano para el acero 19MnCr5”, se han producido ciertas limitaciones en cuanto al cumplimiento de las normas de seguridad (tratamiento de cementación, consumo de gas,...), limitaciones de costes (análisis de la subcontratación, compra de gas,...) y limitaciones técnicas de tiempo (incluidos los fallos a la hora de realizar los ensayos).

Para satisfacer las especificaciones del trabajo, se comenzó realizando una búsqueda en la literatura científica sobre la cementación a baja presión con el fin de obtener una visión específica sobre el tema.

Previo al desarrollo del trabajo, se han puesto en funcionamiento las instalaciones de laboratorio para el uso del gas propano y se han realizado las conexiones necesarias para poder programar el horno de cementación desde el ordenador del laboratorio.

Antes de desarrollar los ensayos, se han preparado las muestras de acero y simulado los parámetros del tratamiento termoquímico mediante el software WinCPB previsto para este fin. Después de realizar los dos primeros ensayos, se ha escrito un procedimiento de trabajo para que el horno pueda ser utilizado por el personal del laboratorio.

Para analizar los resultados de los ensayos de cementación, se han realizado pruebas de microdureza y micrografías utilizando microscopía óptica y electrónica. Por último, se ha obtenido una estimación de los costes del “Desarrollo de ensayos de cementación a baja presión con propano para el acero 19MnCr5”.



2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

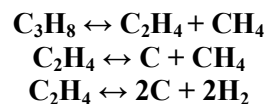
Los tratamientos térmicos y termoquímicos en general (nitruración, carbonitruración) tienen como objetivo mejorar las partes mecánicas en diversos sectores industriales (automoción, aeroespacial, maquinas herramientas, etc.).

Es común que los tratamientos térmicos y termoquímicos den lugar a deformaciones, lo que se traduce en pérdidas económicas. La cementación de aceros a baja presión ha presentado durante varios años mejores resultados que otros tratamientos (carburación y carbonitruración).

2.1 EL TRATAMIENTO DE CEMENTACIÓN A BAJA PRESIÓN

La cementación a baja presión (4 mbar) es un tratamiento termoquímico que permite el enriquecimiento en carbono de una pieza. El principio del método responde principalmente a la termodinámica de activación de la disociación de un hidrocarburo gaseoso, por ejemplo propano o acetileno, a alta temperatura (entre 940 ° C y 1050 ° C) por efecto de la reducción de la presión parcial de las especies activas.

En el caso de la cementación con propano, las reacciones básicas son:



Este proceso, utilizado principalmente en la industria automóvil, es todavía reciente y su control es aun limitado. Con en fin de controlar mejor este proceso, se pone en marcha este trabajo por medio del cual se realiza el “Desarrollan ensayos de cementación a baja presión con propano”.

El trabajo consiste en la optimización de la cementación a propano en un horno de cementación, la puesta en funcionamiento y el cumplimiento de las normas de seguridad. El objetivo principal es desarrollar ensayos de cementación buscando el precio más competitivo posible.

El objetivo del proyecto es desarrollar un software que permita ayudar en la toma de decisiones a la hora de definir el tratamiento termoquímico más adecuado. La creación de una base de datos que permita adaptar cualquier tratamiento termoquímico para un material dado y a una escala industrial concreta.

Los clientes representados a través de los socios del proyecto, pertenecen principalmente a la industria del automóvil y a la industria metalúrgica. Necesitan conseguir piezas mecánicas duras y muy resistentes al desgaste (cajas de cambios, piñones, etc.).



2.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Este proyecto implica el “Desarrollo de ensayos de cementación a baja presión para el acero 19MnCr5”, con una profundidad de cementación de 800 μm .

El departamento dispone de un horno de tratamiento termoquímico para llevar a cabo la cementación de piezas metálicas. Este horno permite comprender los fenómenos físicos y las deformaciones mecánicas que ocurren durante los tratamientos termoquímicos. El proyecto consiste en la optimización de la cementación a gas en el dicho horno, la puesta en funcionamiento y el cumplimiento con las normas de seguridad establecidas.

Como parte del proyecto, el trabajo consiste en desarrollar ensayos de cementación a baja presión utilizando hidrocarburos gaseosos como el propano.

Los objetivos principales del proyecto son:

- Poner a punto el equipamiento conforme a la normativa de gases.
- Realizar los ensayos necesarios para calibrar el horno de cementación con el fin de lograr un perfecto control del proceso.
- Desarrollar y describir los procedimientos para el uso del equipamiento.
- Cuantificar el desarrollo de los ensayos de cementación a baja presión (personal, instalaciones, horas de trabajo...).

El proyecto presentado inicialmente incluía la puesta a punto del equipamiento y las instalaciones del laboratorio, teniendo en cuenta la normativa en materia de seguridad vigente.

Sin embargo, esta parte del proyecto se ha llevado a cabo en un proyecto anterior titulado "Puesta en marcha del horno tratamiento termoquímico de aceros".

Por esta razón, el proyecto que nos ocupa, ha de verificar en primer lugar que el trabajo realizado en el proyecto anterior es correcto (incluyendo el inventario de las normas de seguridad en el laboratorio y la instalación de gas propano).

A continuación, las pruebas realizadas deberán permitir optimizar el desarrollo de ensayos de cementación con propano. La determinación de estos ensayos dará lugar a la elaboración de procedimientos para utilizar el horno de cementación.

Finalmente, será necesario cuantificar con precisión los costes del desarrollo de los ensayos de cementación a baja presión con el fin de proporcionar un presupuesto a las futuras empresas que necesiten desarrollar ensayos de cementación con diferentes aceros.



2.3 LIMITACIONES INHERENTES AL PROYECTO

Las limitaciones inherentes al proyecto están relacionadas con el gas utilizado para la cementación, las normas de seguridad que rigen la cementación, los costes y el tiempo dedicados al proyecto, así como a diversos problemas técnicos.

Limitaciones propias del uso del gas

Es necesario identificar y respetar las normas que rigen el uso del gas durante las pruebas de cementación.

Limitaciones de las normas de seguridad durante la cementación

La cementación, al igual que el gas utilizado, se rige por diversas normas de seguridad que también es necesario respetar. Se han tenido que tomar precauciones específicas, como es el caso de la utilización de un detector de gases con el fin de controlar posibles fugas.

Limitación de costes

En este proyecto, se ha tenido que poner en marcha el horno y el laboratorio conforme a la normativa vigente y se han hecho estudios con el objetivo de desarrollar ensayos de cementación bajo dicha normativa. La consideración de los costes ha sido importante a nivel de acondicionamiento del laboratorio, pero especialmente el alto precio del gas utilizado en cementación a baja presión (propano). Además, se ha tenido que contactar con posibles laboratorios que puedan realizar los análisis y caracterización de los perfiles de carbono de las muestras cementadas. Por tanto, se han tenido que asumir costes de subcontratación que no se ajustaban al presupuesto inicial del proyecto. Se trató de resolver el problema mediante la preparación y acondicionamiento de las muestras mediante ataque químico y pulido, pero finalmente se rechazó.

Por consiguiente, ha sido necesario realizar una redistribución de los recursos propios del proyecto conforme al presupuesto inicial.

Limitaciones de tiempo

Para llevar a cabo este proyecto, se contaba con un total de 500 horas. Sin embargo, a raíz de diversas actuaciones (verificación del horno y adaptación del laboratorio), en lugar de 500 horas programadas, se ha dispuesto de 560 horas para realizar el proyecto. Ha sido muy difícil realizar las pruebas necesarias para el desarrollo de ensayos de cementación, dado que la presencia del director del proyecto es esencial para la utilización del horno. Su ausencia, ha ralentizado la toma de decisión con respecto a la subcontratación de laboratorios externos y la preparación de muestras previas al análisis y caracterización de los perfiles de carbono de las muestras cementadas.



Limitaciones técnicas

Se han encontrado diversos fallos relacionadas con el sistema informático del centro. En efecto, los servidores no son del todo fiables. Con frecuencia (cada 30 minutos), se producen problemas de inaccesibilidad a los programas Word, Excel y Project. Esto ha disminuido la eficacia del trabajo, ya que hay tareas que solo se pueden realizar en los equipos informáticos.

Además, durante las pruebas se ha producido un fallo importante en la programación del horno de cementación. Este fallo ha impedido realizar durante algunas semanas las pruebas requeridas para el desarrollo de ensayos de cementación. Afortunadamente, el director del proyecto se ha ofrecido para realizar algunas pruebas fuera del horario asignado al proyecto con el propósito de compensar el tiempo perdido.



3. DESARROLLO DE ENSAYOS DE CEMENTACIÓN A BAJA PRESIÓN

La cementación: un tratamiento termoquímico basado en ciclos enriquecimiento y ciclos de difusión

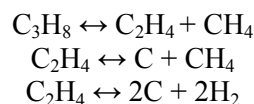
Los aceros tienen un porcentaje en carbono comprendido entre 0 y 2% en peso. El tratamiento de cementación que se aplica a los aceros es un tratamiento superficial termoquímico de enriquecimiento en carbono alcanzado en la fase austenítica (a una temperatura entre 900 y 1000 ° C). Se realiza un temple (enfriamiento) para aumentar el endurecimiento superficial del acero.

En efecto, el carbono da la posibilidad de endurecer el acero durante este choque térmico (mediante tratamiento por temple), el cual modifica la estructura cristalográfica (cúbica centrada en las caras en la austenita a alta temperatura) en la superficie de dicho acero, en una forma más condensada que en un tratamiento de normalizado. La estructura cúbica centrada en las caras de la ferrita se encuentra en forma cuadrática metaestable. El cizallamiento de la red cristalina provoca esfuerzos de compresión en el material, dando lugar a un endurecimiento del mismo. Este proceso se denomina "transformación martensítica".

El interés de la cementación es tratar solamente la superficie de la muestra para mejorar la dureza. La dureza máxima en un acero es obtenida entre un 0,7 y un 0,9% de carbono en peso. La cementación es, por tanto, un medio de endurecimiento superficial que permite asegurar altos esfuerzos de compresión en la superficie y buena resistencia al desgaste debido a la obtención de una martensita con alto contenido en carbono, garantizando a su vez una buena ductilidad en el núcleo.

El principio de cementación a baja presión se basa en la activación termodinámica de la disociación de un hidrocarburo gaseoso (propano en nuestro caso) a alta temperatura por efecto de la reducción de la presión parcial de las especies activas.

En el caso de la cementación con propano, las reacciones implicadas son las siguientes:



Durante las pruebas, la cementación se ha realizado a una presión de 4 mbar. El tratamiento se basa en la alternancia de ciclos de enriquecimiento, con la inyección de propano y ciclos de difusión, con la inyección de nitrógeno, lo que ha sido determinado mediante el uso de un software de simulación, como veremos en el presente trabajo. A estos ciclos les sigue un enfriamiento con helio (temple).

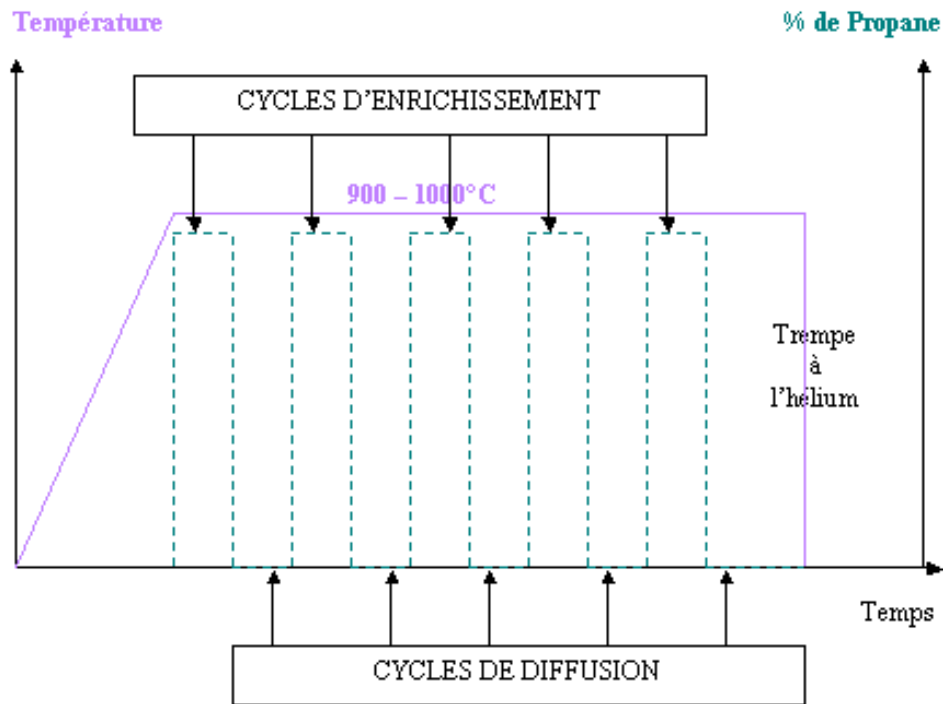


Figura 1: Secuencia de cementación: variación de temperatura, ciclos alternos de enriquecimiento y de difusión

Una vez completado el enriquecimiento de carbono y la superficie de la pieza saturada en carbono, este se difunde al interior de la pieza de acuerdo con las **leyes de Fick**. El perfil de concentración en carbono evoluciona de la siguiente manera.

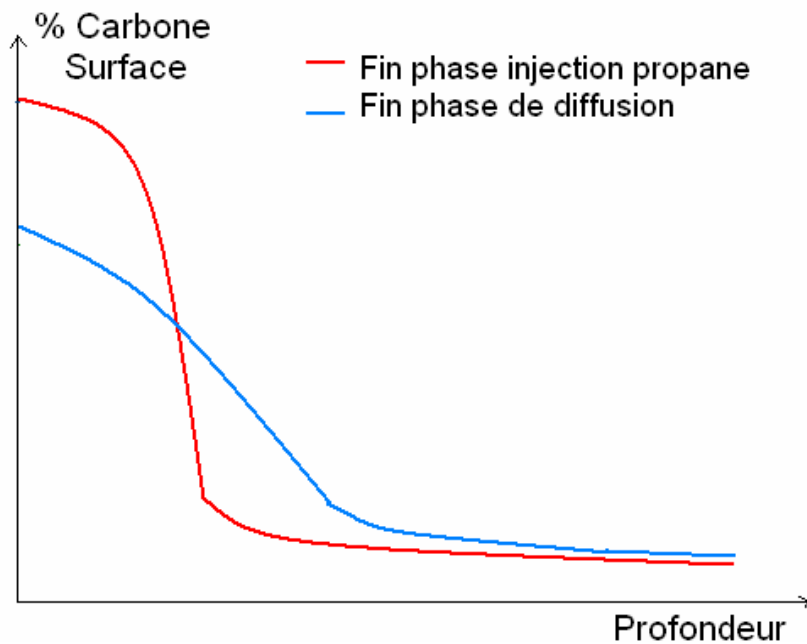


Figura 2: Evolución de la concentración de carbono en función de la profundidad



Especificaciones relacionadas con el propano y el acetileno

El propano, de fórmula molecular, C_3H_8 , es un gas inflamable a las temperaturas en las que estamos realizando las pruebas y también a temperatura ambiente. Para obtener una capa endurecida uniforme mediante cementación con propano se requiere una distancia mínima con respecto a las piezas y también una gran velocidad de entrada del gas, con el fin de evitar que el gas se disocie térmicamente antes de llegar a la superficie de la pieza.

El acetileno, de fórmula molecular C_2H_2 , es un gas más corrosivo que el propano. A baja presión el acetileno no produce esencialmente ningún hollín en la zona caliente del horno debido a que en vacío su disociación es lenta, pero utiliza el efecto catalítico de la superficie del acero.

Con una cementación con acetileno, el contenido de carbono y la profundidad de la capa endurecida son más altos, debido a que la tasa de transferencia es aproximadamente un 20% más alta que con el propano. Esta alta capacidad de transferencia obtenida para superficies planas es también obtenida en piezas con geometrías complejas (cavidades, agujeros de pequeño diámetro). Esto permite aumentar la densidad de carga a tratar en torno a un 20, 30% o más.

Estos dos gases tienen propiedades diferentes y por tanto, no tienen los mismos resultados para los mismos ciclos de cementación. En un estudio futuro sería interesante realizar una comparación entre el propano y el acetileno para ver la eficacia a la hora de realizar una cementación.

Composición y propiedades de los aceros cementados

Los aceros de cementación tienen un contenido de carbono relativamente bajo, para el tratamiento de cementación o carbonitruración seguido de un enfriamiento. Después del tratamiento, estos aceros se caracterizan por tener una superficie con alta dureza y un núcleo con buena tenacidad. Su estructura específica presenta un tamaño de grano austenítico comprendido entre 5 y 8 (ASTM).

Este trabajo se centra en el acero 19MnCr5 que consta de 0,19% de carbono y $5/4 = 1,25\%$ de cromo y 1,25% de manganeso. No se ha encontrado en la literatura científica bibliográfica específica sobre este acero. Por lo tanto, en relación a la literatura científica del acero 20MnCr5 se han orientado los parámetros en los ensayos de cementación a realizar en el estudio.

El acero 20MnCr5, cuya designación numérica es 1.7147, está compuesto químicamente de un 0,17 a un 0,22% de carbono, un máximo de 0,40% de silicio, del 1,10 al 1,40% de manganeso, un máximo de 0,035% de fósforo, un máximo de 0,035% de azufre y del 1 al 1,30% de cromo.



Dicho acero destaca en cuanto a las siguientes características:

- Una dureza Brinell máxima de 255Hb, cuando se trata de mejorar su capacidad de corte.
- Una dureza Brinell máxima de 217Hb, si requiere especificaciones de máxima dureza.
- Una gama de dureza Brinell de 152 a 201Hb, si se precisa obtener una estructura ferrito-perlítica.
- Una temperatura de cementación entre 880 y 980 ° C.
- Una temperatura de temple del núcleo entre 860 y 900 ° C.
- Una temperatura de temple para la superficie cementada entre 780 y 820 ° C.
- Una temperatura de revenido entre 150 y 200 ° C.

Estas indicaciones del acero 20MnCr5 han sido de gran utilidad para iniciar las pruebas en el horno, dado que han permitido conocer los ordenes de magnitud de los parámetros de los ensayos de cementación a realizar en el acero 19MnCr5.

3.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

a) Primer paso: corte de piezas

Primera posibilidad: corte en el propio departamento

Se ha preparado una única muestra para los dos primeros ensayos. Las muestras provienen de una barra rectangular de acero 19MnCr5 que ha sido cortada con unas dimensiones aproximadas de 15x10x10 mm con una máquina de corte del departamento de materiales.

Para posteriores ensayos, se han de preparar de diferente manera, debido a que ya no se dispone de acero en forma de paralelepípedo sino en forma cilíndrica.

Segunda posibilidad: corte en un taller de mecanizado

Por tanto, para preparar las nuevas muestras de cementación, en primer lugar, se tienen que cortar barras cilíndricas de 27 mm de diámetro. Para ello, se ha pretendido subcontratar los trabajos con un taller que colabora de forma habitual con el departamento de materiales para cortar las barras en piezas cilíndricas de las mismas dimensiones. Esta subcontratación será necesaria cuando se envíen las muestras cementadas al laboratorio para elaborar los perfiles de carbono, el cual requiere piezas de geometría regular. Sin embargo, el director del proyecto ha observado que por el momento, esta opción es demasiado cara, pero puede ser una solución cuando se realicen ensayos a escala industrial.



Figura 3: Máquina de corte

b) Segundo paso: pulido de piezas

Una vez que las piezas se han cortado con las dimensiones deseadas, se ha realizado el pulido de cinco de sus caras. La cara sin pulir será la cara de apoyo en el horno y no estará en contacto con el gas de difusión.

Para el pulido, se han utilizado diferentes tipos de discos de pulido, siempre yendo del disco de mayor tamaño de grano al de menor tamaño. Mencionar que los granos utilizados en los discos de pulido son de cristales de SiC. Se ha utilizado los discos de pulido en el siguiente orden de serie: P180, P320, P600, P1200, 6.µm 3 µm. Los dos últimos se utilizan para afinar el pulido.



Figura 4: Discos y máquina de pulido



c) El paso previo a la cementación: la pesada

Una vez pulidas las muestras hasta la precisión deseada, deberán ser pesadas de forma precisa antes de someterse a la cementación, la cual transformará la estructura de la pieza. Este paso deberá de ser realizado en una balanza de precisión con el objetivo de obtener buenos resultados.

El valor obtenido de la pesada antes de la cementación deberá ser comparado con el que se obtiene después de la cementación, para poder determinar el flujo de carbono liberado durante la prueba en el horno.

Después de todos estos pasos, la muestra puede someterse a las pruebas de cementación en el horno.

3.2 ENSAYOS EN EL HORNO DE CEMENTACIÓN

a) Utilización del software WinCPB: simulación numérica necesaria para la determinación de los parámetros de tratamiento

The image shows the WinCPB software interface with the following fields and their corresponding numbers:

- 1: Température de traitement (°C)
- 2: Coefficient correcteur en fonction de la nature de l'acier
- 3: Pourcentage initial de carbone (%)
- 4: Teneur en carbone surface maxi en fin d'enrichissement (%)
- 5: Teneur en carbone surface mini en fin de diffusion (%)
- 6: Teneur en carbone surface finale visée (%)
- 7: Flux de carbone en surface (mg/h.cm²)
- 8: Teneur carbone (radio buttons for 0,36% (550 HV), 0,42% (650 HV), and Autre teneur (% de carbone) with an input field)
- 9: Profondeur efficace visée à concentration de carbone imposé (mm)

Figura 5: Interfaz de software WinCPB



Antes de poder realizar una prueba de cementación, además de la preparación de la muestra, también es necesario determinar los parámetros a utilizar en el programador que controla la inyección de gas en el horno. Estos parámetros son:

- El número total de ciclos: número de ciclos de enriquecimiento y número de ciclos de difusión.
- La duración, en minutos, de cada ciclo.

Para determinar estos parámetros, se ha utilizado el software WinCPB con el fin de hacer la simulación numérica de nuestras pruebas. Este software está adaptado al horno y realiza los cálculos en función del principio de funcionamiento del horno y las condiciones experimentales requeridas. Para lograr esta simulación, el usuario dispone de una interfaz sencilla y un manual de funcionamiento para introducir las especificaciones de cada prueba.

Los cajetines a rellenar en el software de simulación, numerados en la figura 4 del 1 al 9, corresponden a los siguientes parámetros:

- 1 - La temperatura de cementación debe estar entre 950 y 1050 ° C.
- 2 - Este coeficiente de difusión, accesible directamente a través del software, representa un promedio de todos los aceros cementados.
- 3 - El acero en nuestro caso es el 19CrMn5, con un 0,19% inicial en carbono.
- 4 - Se define la tasa máxima de carbono en la superficie al final de cada ciclo de enriquecimiento. Su valor se puede definir mediante un gráfico del manual de utilización del software en función de la temperatura de tratamiento.

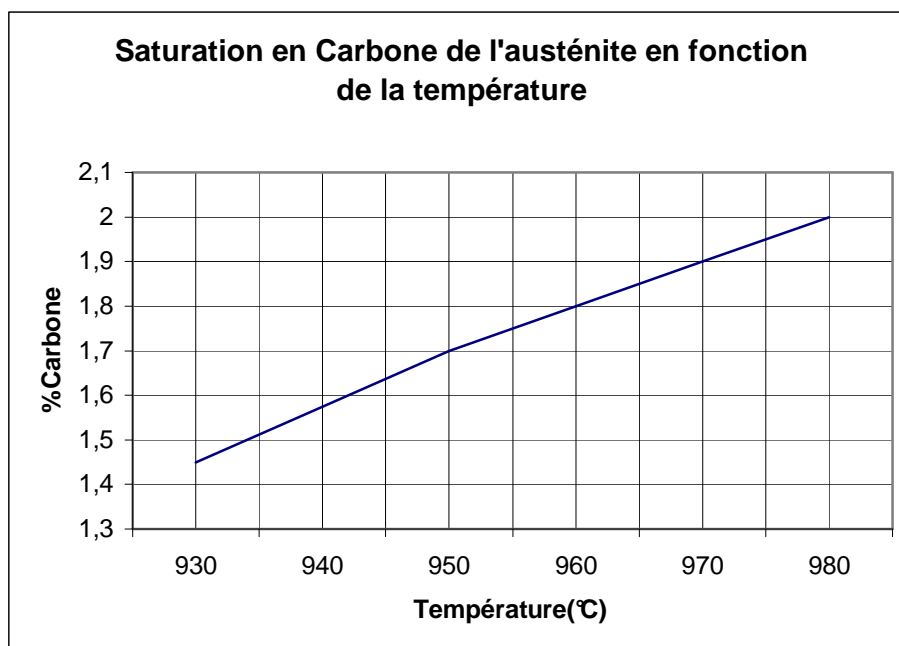


Figura 6: Gráfico de la saturación del carbono en la austenita frente a la temperatura



5 - El contenido mínimo de carbono en superficie, en las últimas etapas de la difusión intermedia esta próximo a la unidad.

6 - Este valor se corresponde con el contenido de carbono en superficie que se desea al final del tratamiento. En nuestras pruebas, se ha variado entre 0,6 y 0,8%.

7 - El flujo de carbono se determina en función de la temperatura de cementación con un gráfico del manual de usuario del software.

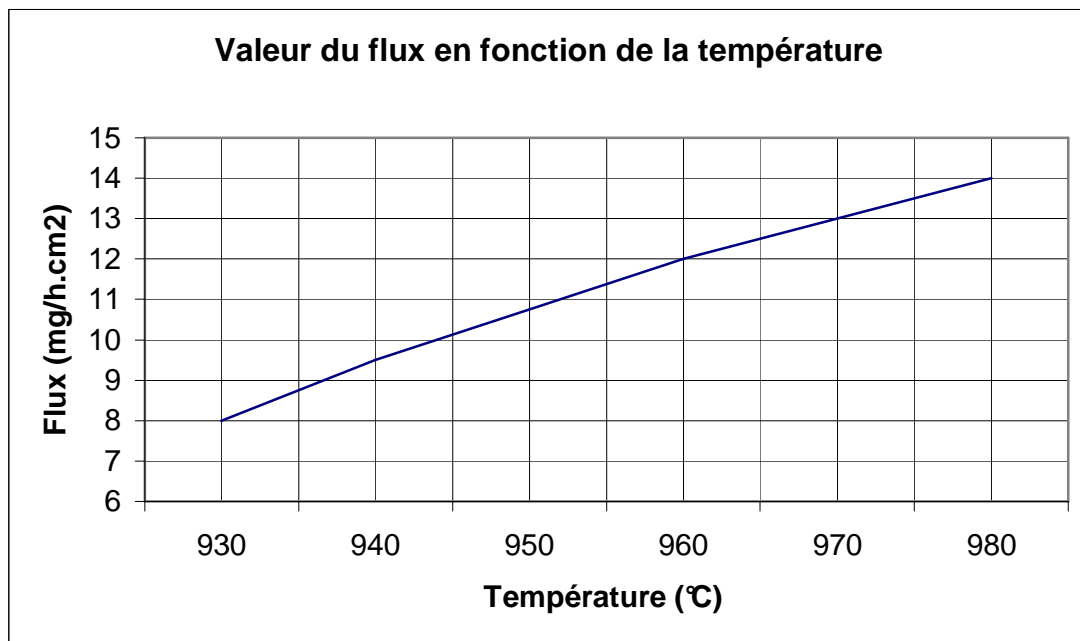


Figura 7: Gráfico para el valor del flujo en función de la temperatura de cementación

8 - Este parámetro permite fijar la dureza obtenida (dureza Vickers) para una profundidad deseada. Este parámetro se define por el porcentaje de carbono. El usuario puede elegir por sí mismo, la cantidad de carbono que desea obtener, pero en nuestro caso siempre se ha seleccionado "contenido en carbono del 0,36%", con el asesoramiento del director del proyecto.

9 - En este caso, el usuario selecciona la profundidad de tratamiento deseada. De acuerdo con las especificaciones de las pruebas a realizar, este valor se ha fijado en nuestro caso en 0,8 mm.

El software determina a partir de estos parámetros un ciclo óptimo de inyección de gas que permitirá alcanzar las características deseadas (contenido de carbono superficial al final del tratamiento y profundidad de cementación).

El uso de este software nos ha permitido determinar las condiciones experimentales de las pruebas, en función de las especificaciones que se han fijado. Sin embargo, hay que tener en cuenta que se trata de una simulación numérica y que no tiene en cuenta todos los parámetros que pueden actuar durante el ensayo.



Por lo tanto, el software permite preparar la prueba de cementación en el horno, pero los resultados finales no son necesariamente idénticos a los esperados (profundidad de cementación y contenido en carbono superficial al final del tratamiento).

b) Reserva del horno de cementación para realizar los ensayos

El horno de tratamiento termoquímico que se ha utilizado para realizar las pruebas de cementación es utilizado por varios investigadores. Por lo tanto, para evitar un problema de planificación a la hora de realizar las pruebas se ha creado un “planning” para la utilización del horno con el fin de realizar las pruebas en las fechas establecidas, lo que ha limitado el riesgo de que el horno no estuviese disponible. Se ha publicado un calendario en la puerta del laboratorio donde esta situado el horno.

Además, se ha programado cada una de las prueba con el director del proyecto, con unas semanas de antelación para certificar la realización de los ensayos previstos en la fecha indicada.

c) Programación del horno de cementación

Durante las dos primeras pruebas, la programación de los ciclos en el horno se ha realizado desde el panel de control situado en la parte frontal del horno.

El director del proyecto ha instalado el software IPS para programar el panel de control del horno desde el ordenador del laboratorio, este software permite configurar los ciclos de tratamiento directamente desde el ordenador y no desde la pequeña pantalla de control del horno. De este modo, los errores de configuración son más fáciles de detectar, y los cambios de un ciclo a otro son más fáciles de realizar.

El software de programación es bastante sencillo. Con la apertura de uno de los archivos existentes (limitado a 20, para disponer de programas "vírgenes", para uno o más niveles de calentamiento,...), a continuación, puede añadir o eliminar segmentos (cementación o difusión), determinar su duración y sus conexiones lógicas (calentamiento, enfriamiento, inyección de propano,...ON/OFF), todo ello de manera rápida y sencilla. También es muy fácil cargar los ciclos ha programar en la pantalla de control del horno.



Figura 8: Pieza de acero preparada para un ensayo de cementación



d) Prueba de cementación a baja presión

Una tarea importante de este proyecto ha consistido en realizar pruebas de cementación a baja presión con el fin de determinar un rango de cementación con propano para el acero 19MnCr5 con una profundidad de cementación requerida de 800 μm .

Antes de utilizar el horno de cementación, como ya se ha mencionado, primero es necesario preparar las muestras y el programa el equipo. Para hacer esto, se debe simular con el software WinCPB la cementación variando los diferentes parámetros que definen la prueba de cementación.

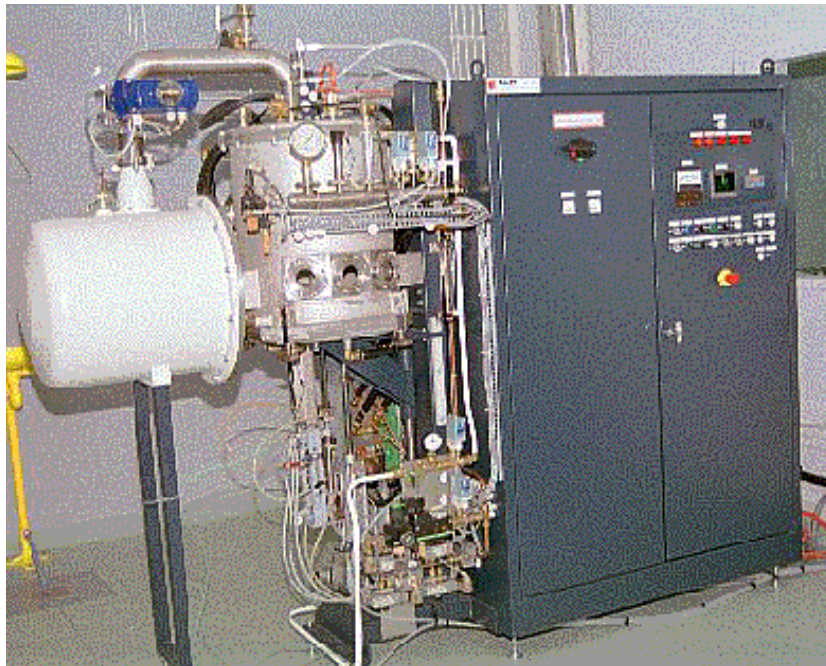


Figura 9: Horno de cementación

Después de realizar varias simulaciones, se han seleccionado las que indica una profundidad de cementación de 800 μm . Se han elegido simulaciones que presentan parámetros bastante diferentes para evaluar la importancia de estos en relación a los resultados de la cementación posteriores. Una vez elegida la simulación, se han tenido que programar los ciclos en el horno a través del software IPS.

Una vez preparadas las muestras y la programación introducida, se da comienzo a las pruebas.

Una prueba en el horno de cementación requiere la presencia de un técnico durante cuatro horas seguidas. Por lo tanto, se ha necesitado media jornada para realizar una prueba en el horno, lo que ha limitado el número de pruebas a realizadas durante el trabajo. De hecho, sólo se realizaron cuatro pruebas con propano.



Como se describe en el procedimiento, la prueba se comienza calentando el horno a una temperatura seleccionada por la simulación, la cual esta comprendida entre 950 y 1050 ° C para permitir la cementación a baja presión del acero 19MnCr5.

Después de aproximadamente una hora y cuarenta minutos de calentamiento (este tiempo puede variar dependiendo de la temperatura objeto de cementación, la velocidad de calentamiento es 10 ° C / min) y diez minutos manteniendo la temperatura, la cementación se inicia con el primer ciclo de enriquecimiento (inyección de propano ON, presión aproximada de 5 mbar), seguido de un ciclo de difusión (inyección de propano OFF, presión próxima a 4mbar), a continuación, el segundo ciclo de enriquecimiento y así sucesivamente. La duración de cada tramo se ha programado a través del software IPS.

Después del último ciclo de difusión, se consigue mediante la creación de una atmósfera de helio una caída repentina de la temperatura (denominada temple). Cuando el panel de control acciona el temple, el calor desciende en el horno, ya que el helio no se inyecta en la misma cámara del horno que el propano y el nitrógeno. El temple dura alrededor de cinco minutos, seguido de un mantenimiento de la temperatura de veinte minutos para homogeneizar la estructura de la pieza.

Cuando se ha completado temple y las muestras han alcanzado una temperatura de 20 ° C, el técnico puede sacar las muestras del horno. Han transcurrido cuatro horas desde el comienzo de la prueba.

A partir de ese momento, hay que tener mucho cuidado de no tocar los lados de las piezas para que no cambie su estructura y no se modifique la información relativa a la cementación. Las muestras pueden ser posteriormente analizadas para determinar si la simulación elegida ha proporcionado las condiciones buscadas en un principio.

3.3 RECUBRIMIENTO DE MUESTRAS

a) Primer paso: la pesada de las muestras después de la cementación

Ahora que las muestras se han cementado, inmediatamente deben ser pesadas en una balanza de precisión para evaluar el flujo de carbono liberado durante la prueba.

En la cementación a baja presión no se obtiene un equilibrio termodinámico, el concepto de potencial de carbono, por lo tanto, no existe y no se puede utilizar como herramienta de control. Por consiguiente, la gestión del ciclo se realiza a partir de los siguientes parámetros:

- Temperatura: no esta limitada, ya que trabajamos en vacío. Es posible aumentar sustancialmente la temperatura de cementación con ganancias notables sobre la duración de los ciclo.
- Presión
- Flujo de entrada de hidrocarburos: el control del proceso se realiza sobre el flujo de carbono a través de la superficie de las piezas.



El resultado obtenido permite comparar este valor con el de la simulación del software Win CPB. Por lo tanto, podemos decidir si la cementación en el horno se ha controlado o si hay margen de mejora.

Se realizan, por consiguiente, los cálculos de flujo para las cuatro muestras. Para ello es necesario especificar que el tamaño de la muestra es de 15 x 10 x 10 y que las muestras de 28 cm² (E3 y E4) corresponden a la superficie cementada de cuatro muestras por prueba.

Prueba n°	E2	E3	E4
Variación de masa (g)	0,0282	0,0703	0,0999
Superficie cementada (cm ²)	7	28	28
Tiempo total de cementación (s)	714	450	678
Flujo previsto por el software(mg/h/cm ²)	14	11,5	12,5
Flujo real de la prueba (mg/h/cm²)	20,31	20,09	18,94
Coefficiente corrector	1,45	1,75	1,52
OBSERVACIONES		1 ^{er} ciclo de cementación(288s) no efectuado	

Figura 10: Nuevo cálculo de los flujos de carbono después de los ensayos en el horno

El nuevo flujo de carbono se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Flujo} = \frac{(\text{Variación de masa} * 3600)}{(\text{Tiempo de cementación con propano} * \text{Superficie cementada})}$$

Se ha encontrado que el flujo programado con el software WinCPB para determinar la duración de los ciclos de cementación / difusión se ha subestimado. Para tener en cuenta el flujo real de pruebas futuras, será necesario un coeficiente corrector de 1,57 (coeficiente promedio de la tabla) tal como se expresa a continuación:

$$\text{Flujo real} = \text{flujo programado en el WinCPB} * 1.57$$

b) Segundo paso: corte de las muestras cementadas

Como medida de precaución, las piezas cementadas se cortan por la mitad para salvar una parte de muestra que permanecerá inalterada, mientras que la otra será utilizada para realizar los ensayos de análisis y caracterización correspondientes.



c) Tercer paso: el recubrimiento de las muestras

Algunos análisis, como la microdureza y microscopía requieren que la pieza está revestida, dando lugar a una probeta. Esto evita la modificación de la estructura de la superficie de la muestra cementada manipulando únicamente la parte descubierta sin tener que estar en contacto con la superficie de la parte cementada. De este modo los resultados no están sometidos a ninguna distorsión.

El revestimiento de las muestras se lleva a cabo mediante el uso de un equipo de recubrimiento que utiliza resina fenólica de color rosa para crear la probeta, la cual se calienta a 170 ° C, y luego se solidifica al disminuir la temperatura. Como dato, el tiempo de recubrimiento es de 15 minutos: 12 minutos de calentamiento y 3 minutos de enfriamiento con la ayuda de agua fría.



Figura 11: Equipo de recubrimiento

Una vez que las muestras están recubiertas se debe pulir de nuevo la única cara visible y posteriormente se puede realizar la medición de la microdureza así como la observación por medio de microscopía óptica y electrónica.



Figura 12: Muestras recubiertas



3.4 ENSAYOS DE MICRODUREZA Y MICROSCOPIA

a) Prueba de microdureza

La prueba de microdureza permite medir la dureza de la muestra en diferentes puntos del espacio situados a distintas distancias microscópicas. Por lo tanto, se ha podido evaluar la dureza en función de la profundidad de la muestra.

Esta prueba ha permitido observar que la parte cementada es más dura que el núcleo de la pieza. También se ha podido medir la profundidad real de la cementación.

Para hacer una prueba de microdureza, se utilizó un microdurómetro. La prueba de microdureza tiene la peculiaridad de ser un ensayo no destructivo, dañando muy poco la pieza.



Figura 13: Microdurómetro Vickers

El principio de funcionamiento es simple: para definir la fuerza de penetración a la que se va a someter al acero, un indentador se presiona con una carga constante durante unos segundos. Después, simplemente se mide el tamaño de la huella generada para determinar la dureza del acero en ese punto.



Se ha utilizado un microdurómetro que mide la dureza Vickers. El indentador tiene forma piramidal y la dureza viene dada por la media de la diagonal de la huella mediante el uso de una tabla de conversión.

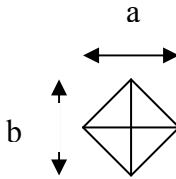
$$d = \frac{a + b}{2}$$


Figura 14: Datos utilizados para el cálculo de la dureza Vickers

Se ha trabajado con cargas de 200 y 300 g fuerza y se ha decidido distanciar los puntos 70 μm y realizar los test de microdureza cada 10 μm , tal y como se muestra en la siguiente figura. De este modo, se han realizado 900 indentaciones en cada muestra. Este rango de valores corresponde a una medición muy precisa de la evolución de la dureza en función de la profundidad.

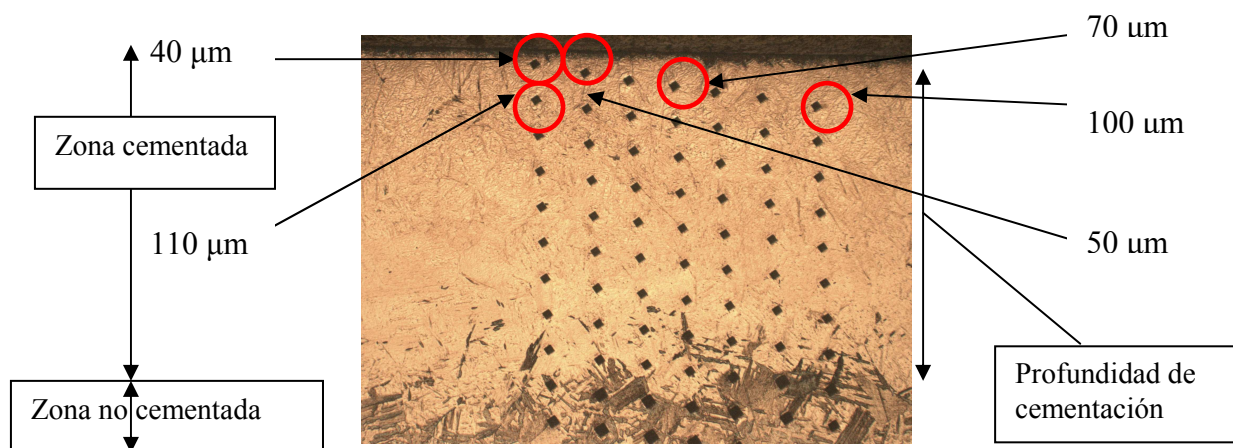


Figura 14: Imagen de las huellas de una prueba de microdureza

Una vez completada la prueba, los resultados proporcionan una curva de microdureza que muestra la evolución de la dureza en función de la profundidad.

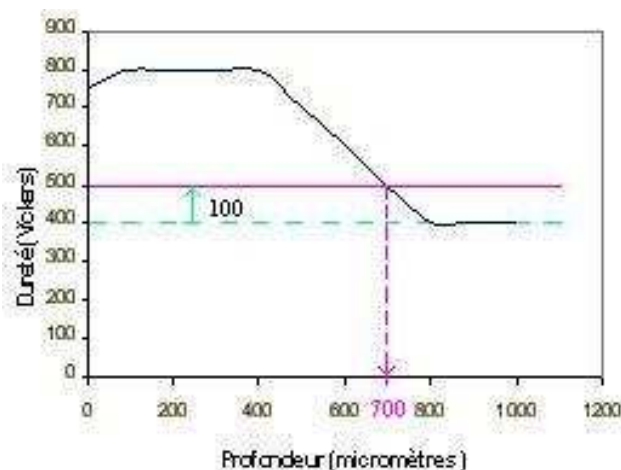


Figura 15: Ejemplo de curva de microdureza de acero cementado



La curva obtenida indica, después de un simple cálculo, la profundidad de cementación (700 μ m en el ejemplo) y los valores de dureza de especial interés: en la periferia y en el núcleo de la muestra.

b) Prueba de microscopía óptica

Con el fin de comprobar si los resultados simulados con el software WinCPB se asemejan a la realidad después de la cementación, se ha analizado la estructura microscópica de la muestra cementada.

Un primer análisis a través de un microscopio óptico permite visualizar de manera genérica la cementación de las muestras.

Sin embargo, es necesario un ataque químico preliminar con Nital 4% (ácido nítrico) con el fin de observar con más facilidad la zona cementada. El análisis por microscopía óptica permite apreciar la profundidad de cementación obtenida, la cual se puede comparar con la obtenida en la curva de microdureza.



Figura 16: Microscopio óptico



c) Prueba de microscopía electrónica

Gracias al microscopio electrónico, se puede obtener una serie de imágenes que proporcionan el tamaño de grano en la parte cementada (tamaño deseado: 9 ASTM). Este tamaño, de la norma ASTM E112, corresponde a granos muy finos.

Para ello, primero se tiene que hacer que la muestra sea conductora mediante la aplicación de una fina capa de oro. En efecto, el microscopio electrónico de barrido excita los electrones de la superficie a analizar y "mede su respuesta".

El microscopio electrónico a continuación, proporciona una serie de imágenes a diferentes escalas (5 μm , 10 μm , 20 μm , 100 μm , 500 μm), que ilustra la diferencia microestructural entre la zona cementada y la zona no cementada.



Figura 17: Microscopio electrónico de barrido (SEM)



3.5 ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DEL ACERO

a) Preselección del tipo de análisis para la realización de los perfiles de carbono

Para lograr los perfiles de carbono de las muestras cementadas se ha contactado con laboratorios de análisis y caracterización de perfiles de carbono para realizar la subcontratación de esta parte del estudio.

Se ha realizado la búsqueda de empresas o laboratorios que pueden realizar este tipo de análisis. Se ha contactado con diversos laboratorios (por teléfono o por correo electrónico) para ver si podían hacer perfiles de carbono en piezas cementadas del acero 19MnCr5.

Se han valorado los diferentes tipos de análisis realizados por estas empresas, y se han preseleccionado en concreto dos: microsonda de rayos X y espectrometría de descarga luminiscente (SDL).

Después de esto, se ha tenido que elegir entre el análisis por microsonda de rayos X o el análisis por SDL y ver el más adecuado para realizar los perfiles de carbono (precio y precisión).

MICROSONDA DE RAYOS X

Principio

La microsonda electrónica es una herramienta para microanálisis a escala superficial (μm^2). Permite realizar el estudio de una muestra realizando el análisis sobre un volumen de aproximadamente $1\mu\text{m}^3$ sin causar su destrucción.

El método de análisis consiste en producir, con la ayuda de un cañón de electrones, un haz de electrones más o menos fuertemente acelerado. Este haz bombardea la muestra sobre $1\mu\text{m}^3$, causando una interferencia electrónica en esta área que dará lugar a la emisión de fotones X, los cuales serán detectados por uno o más espectrómetros.

Ámbito de aplicación

Este método permite un análisis cualitativo y cuantitativo, en cualquier material de tipo mineral, vegetal, animales, compuesto... por lo tanto, el acero 19MnCr5 está dentro del alcance del análisis por microsonda de rayos X.



Descripción del equipamiento

La microsonda de rayos X se compone de:

1. Cañón de electrones
2. Ánodo
3. Columna (3 lentes adaptables, estabilizador de corriente)
4. Espectrómetro
5. Lente compuesta de minibobinas
6. Platino de alta precisión mecánica
7. Microscopio óptico de alta resolución
8. Bobinas de barrido SEM
9. Compuerta para introducir muestras
10. Sistema de bombeo eficiente

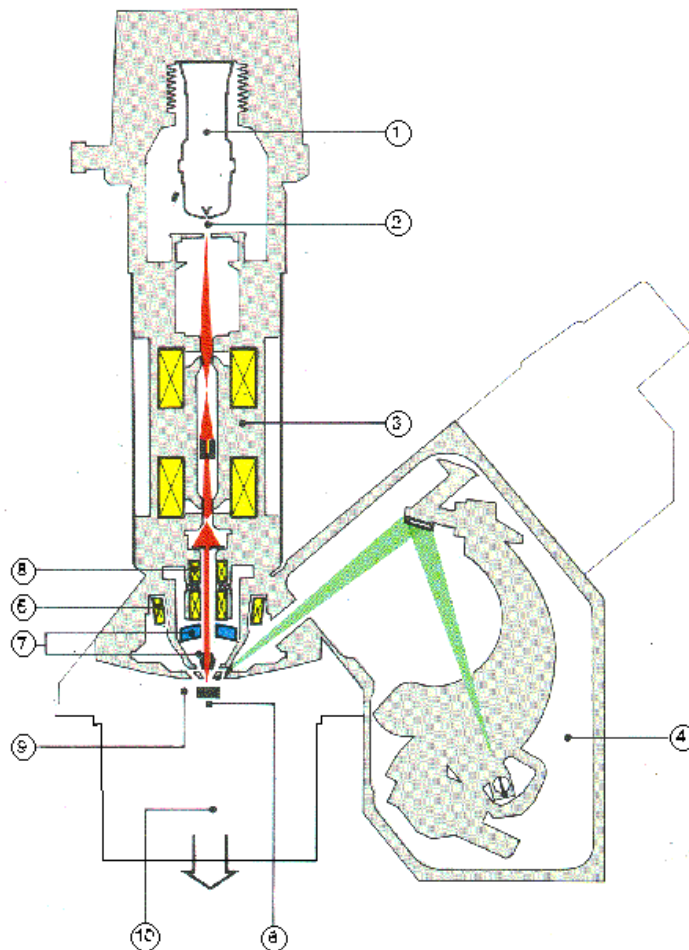


Figura 18: Esquema de la microsonda de rayos X



ESPECTROMETRÍA DE DESCARGA LUMINISCENTE (SDL)

Principio

La espectrometría de descarga luminiscente es una herramienta para el microanálisis de la superficie de un metal.

Este método de análisis consiste en colocar la muestra a analizar contra un ánodo de cobre. Las partículas ionizadas y acelerada (plasma de argón) son entonces proyectadas sobre la superficie de la muestra, alterando los átomos que lo constituyen. Los átomos están, por tanto, en un estado excitado. Cuando vuelven al estado fundamental, producen la emisión de un espectro luminiscente.

El sistema óptico del espectrómetro permite analizar cada longitud de onda del espectro de luz emitida por un elemento. La intensidad de la luz deberá ser proporcional a la concentración presente en la muestra, pudiendo hacer un análisis cualitativo y cuantitativo para determinar la composición de la muestra.

Ámbito de aplicación

El principal campo de aplicación del análisis por SDL está presente en las industrias metalúrgicas, del automóvil y energéticas. El uso de esta técnica se utiliza para analizar los materiales que han sido sometidos a tratamiento superficial (como la cementación) y revestimiento.



b) Selección del método de análisis por SDL frente a la microsonda de rayos X para realizar los perfiles de carbono

Cada uno de los métodos descritos anteriormente presenta ventajas, pero también inconvenientes, el uno con respecto al otro.

Al principio, el análisis por microsonda de rayos X era menos caro (unos 150 € sin IVA por muestra contra 800 € sin IVA) y menos restrictivo a nivel muestras que el método SDL.

En efecto, para los análisis por SDL, las caras de las muestras deben estar perfectamente planas, y cada muestra debe ser preparada antes de ser tratada ya que esta técnica de análisis solo permite tener concentraciones de carbono en la superficie. Por lo tanto, es necesario rectificar todas las muestras cementadas unas 100µm, en nuestro caso, con el fin de lograr un perfil de carbono suficientemente preciso. Si se elige el análisis por SDL, por lo tanto, se tiene que hacer la rectificación en el propio departamento, lo que implica más muestras en las pruebas de cementación (se pretenden 10 niveles de cementación diferentes, por lo que 4 muestras no permiten obtener 10 caras), y sobre todo el contratiempo de encontrar la manera de corregir estas últimas.

Basándose en estas limitaciones, es mejor elegir el análisis por microsonda de rayos X para los perfiles de carbono. Sin embargo, esta técnica tiene un gran inconveniente: su precisión es sólo 0,2% y la concentración en carbono de las piezas de acero es del 0,19%. Los resultados del análisis por lo tanto, corren el riesgo de ser falsos en relación a lo esperado.

Se ha enviado una muestra cementada al laboratorio LSCM para que realicen el perfil de carbono y poder ver la calidad del análisis. Cuando se ha comparado el perfil de carbono obtenido con los resultados de la microdureza de la muestra, no ha sido coherente en relación a la profundidad de cementación y a la forma de la curva. Se ha llegado a la conclusión de que el método por microsonda de rayos X no es suficientemente preciso y fiable para llevar a cabo los perfiles de carbono de las muestras cementadas del acero 19MnCr5.

Concluyendo, a pesar de las dificultades de la preparación de la muestra en cuanto a la rectificación, se ha elegido el método SDL, para desarrollar los perfiles de carbono de las piezas cementadas con el objetivo de obtener la mayor precisión posible. Queda por tanto, ver como realizar la rectificación de las muestras.



c) Preparación de muestras previo al análisis de los perfiles de carbono del acero cementado

Se ha visto que la técnica utilizada para determinar el perfil de carbono de las piezas ha sido el análisis por SDL. Sin embargo, ya que esta técnica sólo permite conocer la concentración de carbono en la superficie de una muestra, hay disponibles dos opciones para realizar el perfil completo (hasta 1 mm de profundidad):

- Rectificar una misma pieza tan a menudo como sea necesario para analizar las superficies a diferentes profundidades, lo que supone un coste y un tiempo importantes.
- Suministrar al laboratorio muchas muestras (cementadas en una misma prueba), indicando la profundidad a analizar. Esta posibilidad significa que primero se debe rectificar cada muestra a una profundidad determinada (entre 0,05 y 1 mm). Este paso se deberá realizar entre el análisis con microscopio electrónico y el envío de las muestras cementadas al laboratorio.

Inicialmente se pensó en el pulido de las piezas para eliminar la superficie necesaria. Sin embargo, sería necesario predecir con exactitud el tipo de lija que se utilizará y el tiempo a emplear para pulir una superficie dada (lo cual habría implicado mucho tiempo) y de todos modos se obtendrían piezas con geometrías demasiado irregulares (lados no paralelos). Por lo tanto, esta idea ha sido descartada.

A continuación se ha propuesto, llevar a cabo una disolución química con el fin de obtener una profundidad determinada en un tiempo dado. Sin embargo, esta manipulación permite obtener la profundidad deseada sobre una parte de la superficie de la pieza y no en toda la cara. Además la disolución química puede modificar la estructura química de la propia pieza. Por lo tanto, esta propuesta se ha descartado para obtener el perfil de carbono por SDL (la superficie debe ser totalmente plana).

Como no se dispone de herramientas mecánicas para rectificar con precisión las piezas, se ha decidido contactar con el taller de mecanizado. Se le ha pedido un presupuesto para rectificar 10 piezas (a las siguientes profundidades: 50 μm - 150 μm - 250 μm - 350 μm - 450 μm - 550 μm - 650 μm - 750 μm - 850 μm - 950 μm). Las piezas se deben rectificar al mismo tamaño, el taller debería rectificar 50 μm en todas las partes, luego 100 μm en 9 piezas, a continuación nuevamente 100 μm en 8 piezas, etc, eliminando una pieza entre cada rectificación.

De este modo, se podrían enviar al laboratorio solamente 11 piezas para analizar la superficie - las 10 rectificadas en el taller más la undécima cementada que corresponden a una profundidad de 0 μm . Es importante codificar claramente las piezas para saber la profundidad a la que se han rectificado con el fin de no obtener un perfil de carbono erróneo.

Esta técnica ha sido descartada por el momento. El presupuesto presentado por el taller es muy elevado según el director del proyecto.



4. RESULTADOS OBTENIDOS

A modo de resumen, se han alcanzado los siguientes objetivos:

Se ha ayudado a desarrollar el laboratorio para la cementación a propano y acetileno. Se ha realizado la orden de pedido de suministro a AIR LIQUIDE para incorporar los gases al horno de cementación y las conexiones necesarias: una botella de acetileno con manómetro incorporado y el tubo de conexiones de la botella de acetileno al panel de control de gas y una botella de propano con manómetro incorporado y el tubo de conexiones de la botella de propano al panel de control de gas. También se ha conectado el nuevo programador del horno al ordenador.

Se ha desarrollado un procedimiento para la utilización del horno con el objetivo de proporcionar un documento único y exhaustivo que muestre los diferentes pasos necesarios para realizar una cementación con total seguridad.

También se ha determinado el método de análisis más adecuado para realizar los perfiles de carbono de las muestras: SDL (Espectrometría de descarga luminiscente).

Se han llevado a cabo 4 ensayos de cementación a baja presión con propano con diferentes muestras y se han obtenido dos rangos de cementación con contenidos de carbono en superficie de 0,6% y 0,8%.

Se ha desarrollado una estimación del coste completo para la realización de un conjunto de ensayos de cementación (cuatro ensayos) en un acero cualquiera. El importe asciende a 6.213,97 € teniendo en cuenta que falta saber el precio del gas (propano o acetileno) y la cuantía del mecanizado de piezas.

4.1 ACONDICIONAMIENTO DEL LABORATORIO

a) Conexiones de gas

Al inicio del proyecto, se debían de realizar pruebas de tratamiento térmico en el horno de cementación. Se recomendaban dos tipos de cementación a baja presión:

- Cementación con propano
- Cementación con acetileno

Cuando se comenzó el proyecto, ya se habían realizado tratamientos con propano. Sin embargo, algunos equipos han tenido que ser renovados con el fin de realizar nuevas cementaciones. En cuanto a la cementación con acetileno, toda la red de gas del interior del laboratorio debía ser instalada y verificada.



Como consecuencia, se ha tenido que pedir todo el material necesario para acondicionar el horno y poder realizar las cementaciones con acetileno. Para ello, se necesitan:

- Una botella de acetileno B20
- Un manómetro de presión para el acetileno que permita suministrar el gas a 3 bar desde el panel de gas del horno
- Un tubo de conexión de la botella de acetileno al panel de gas
- Una botella de propano vacía
- Un manómetro de presión para el propano que permita suministrar el gas a 3 bar desde el panel de gas del horno
- Un tubo de conexión de la botella de propano al panel de gas

Se ha elegido para la realización de este suministro a la empresa AIR LIQUIDE que es el proveedor habitual del centro y está en continuo contacto con el director del proyecto. Además, la compañía utiliza de vez en cuando el horno de tratamiento termoquímico para subcontratar ciertas pruebas. Por todas estas razones, esta elección se ha determinado como la más apropiada.

b) Puesta en marcha de la programación del horno

Además del acondicionamiento del laboratorio, también se ha tenido que conectar un nuevo programador al horno (instalado por el director del proyecto) al ordenador, por el cual un software controla las órdenes comandadas en el horno. Para esta conexión, se ha necesitado un cable eléctrico con 8 hilos, de unos 15m de longitud para llegar a la unidad central del ordenador. A continuación, se ha soldado un puerto en serie en el cable de alimentación para poder ser conectado.

El aspecto de la "configuración del horno" se ha simplificado para un mejor control de los ciclos programados.

4.2 PROCEDIMIENTO DE UTILIZACIÓN DEL HORNO

Las especificaciones del proyecto indican la redacción de un procedimiento para utilizar el horno de cementación a baja presión. En efecto, es importante que los usuarios tengan un documento completo que muestre las diferentes acciones que se deben seguir, en orden cronológico, para realizar una cementación de forma segura.

De este modo, después de haber estudiado en detalle un ensayo de cementación bajo la supervisión del director del proyecto, facultado para utilizar el dispositivo, se han identificado todos los pasos a realizar, haciendo hincapié en las precauciones que deben tomarse en cada momento. Esto ha permitido redactar un procedimiento completo para el uso del horno de cementación, en el que se indican los equipos y, además, se especifican las personas facultadas para su manipulación.



Este procedimiento se mostrará junto al horno y deberá ser consultado por los futuros usuarios antes de la cementación. Esto servirá de ayuda a quienes tengan que realizar cementaciones y no conozcan el equipo.

4.3 ANÁLISIS DE MICRODUREZA Y MICROSCOPIA

a) Presentación de los cuatro ensayos de cementación con propano realizados

Durante este trabajo, se han podido realizar cuatro ensayos de cementación a baja presión en el horno. En la siguiente tabla, se enumeran los rangos de cementación utilizados:

Nº de muestra	E1	E2	E3	E4
Température de cémentation (°C)	955	980	955	970
Contenido de carbono máximo en superficie al final del enriquecimiento (%) (1)	1.65	1.9	1.65	1,65
Contenido en carbono mínimo en la superficie al final de la difusión (%)	1	1.01	1	1,08
Contenido en carbono en superficie final (%)	0.8	0.8	0.6	0.6
Flujo de carbono en superficie (mg/h.cm ²) (2)	11.5	14	11.5	12,5

Figura 19: Resumen del ensayo de cementación elegido para cada muestra

(1) y (2) se han determinado a partir de curvas proporcionadas en la documentación del software WinCPB.

El objetivo de estas pruebas es dominar el proceso mediante el desarrollo de ensayos de cementación que logren una profundidad de cementación de 800 µm, una dureza de 800 a 900 HV0.2, un tamaño de grano de 9 (ASTM), un contenido en carbono en superficie de 0,8% o 0,6% y que sea lo más económico posible (tiempo de duración de la cementación lo más corto posible).



b) Análisis de la microdureza

MUESTRA N° 1

El análisis de la microdureza de la muestra cementada n° 1 ha revelado una profundidad de cementación de 820 μm y una dureza superficial de 770 HV0.2 como se puede apreciar en la siguiente gráfica:

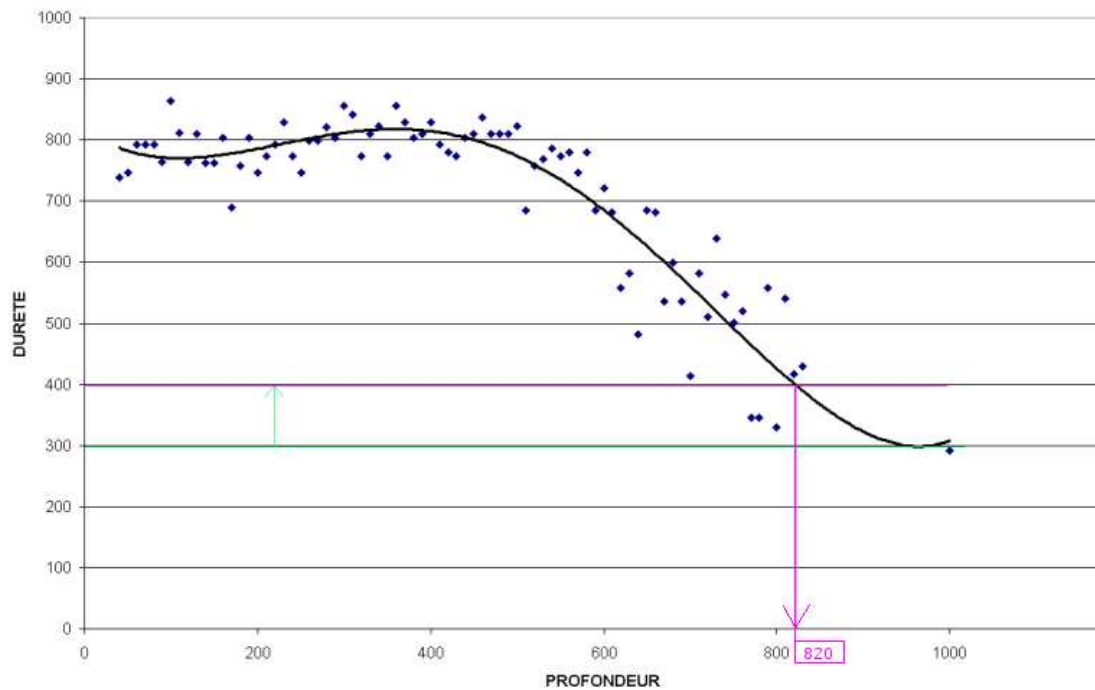


Figura 20: Perfil de la dureza de la muestra cementada n° 1 en función de la profundidad

Estos resultados son satisfactorios ya que corresponden a las especificaciones que se habían fijado al principio. Sin embargo, el perfil de dureza muestra un ligero descenso de la dureza de la muestra en la superficie cementada, lo que puede implicar un fallo en nuestro tratamiento térmico. Pero, en general, este ensayo de cementación puede ser tenido en cuenta.



MUESTRA N° 2

El análisis del perfil de microdureza de la muestra cementada n° 2 indica una profundidad de cementación de 800 μm y una dureza superficial de 800 HV0.3 como se puede apreciar en la gráfica adjunta.

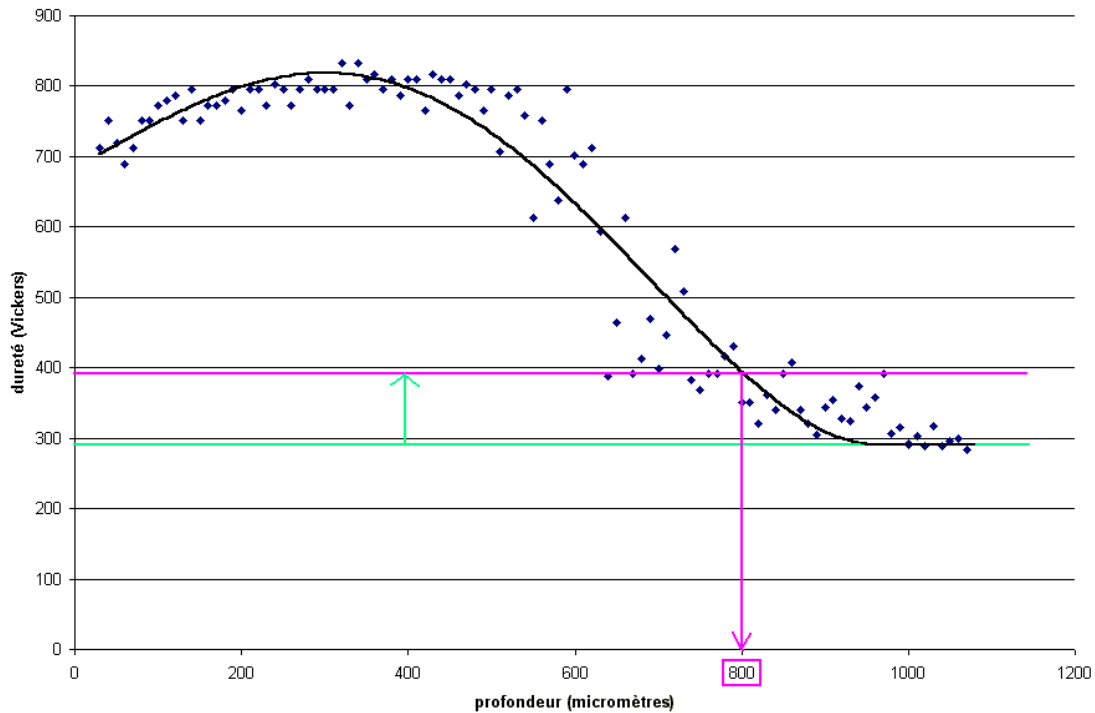


Figura 21: Perfil de la dureza de la muestra cementada n° 2 en función de la profundidad

Aunque esta vez la profundidad de cementación parece correcta, este ensayo no es satisfactorio. En efecto, se observa claramente una dureza inferior al inicio de la zona cementada. Esta prueba confirma que los parámetros seleccionados en esta ocasión presentan un problema importante.

El aspecto del perfil de dureza puede explicarse de dos maneras.

Primera teoría: pensar en la presencia de austenita residual en la superficie de la muestra. Durante el endurecimiento por temple, el carbono no ha tenido tiempo para difundirse en la superficie, lo que habría provocado la estabilización de la austenita residual. Muy rica en carbono, la austenita en gran cantidad disminuye significativamente la dureza de la superficie y altera la estabilidad dimensional de las piezas.



Sus orígenes son diversos:

- El contenido superficial de carbono: a mayor contenido en carbono, mayor será el contenido de austenita residual.
- La temperatura de temple: cuanta más alta sea la temperatura de temple, mayor será la capa de austenita residual retenida.
- La presencia de aleaciones sobrecarburadas (cromo, manganeso, molibdeno): bajan el punto de transformación martensítica.

En función de los orígenes, las soluciones son las siguientes:

- Bajar el contenido en carbono.
- Bajar la temperatura de temple.

Segunda teoría: pensar que la muestra se enfrenta a una descarburación superficial. Esta vez el problema se produciría durante la difusión en vacío. El carbono en el extremo superficial sería extraído por el ambiente al exterior, o difundido excesivamente hacia el núcleo, provocando una caída en la concentración superficial. La falta de carbono en superficie provocará por consiguiente una caída de la dureza superficial.

Sus orígenes son variados:

- Una purga de bloqueo inadecuada en la transferencia del enriquecimiento, la difusión y el temple.
- Un calentamiento antes de temple en un medio ambiente descarburado.
- Una duración excesiva entre la cementación y el temple.

En función de los orígenes, las soluciones son las siguientes:

- Una purga de bloqueo efectiva en la transferencia.
- Precauciones en el calentamiento antes del temple por el uso de un medio neutro en relación al carbono superficial.
- Minimizar el tiempo de transferencia o de calentamiento antes del temple.

El análisis del perfil de carbono permitirá conocer la razón de la caída de la dureza superficial en las muestras cementadas en carbono en superficie por exceso o por defecto. Un análisis con difractómetro de rayos X también permitirá identificar las causas de este problema.

En la medida en que no se sabe todavía si la disminución de la dureza es debida a la presencia de austenita residual o descarburación, tomamos la decisión de reducir la superficie de carbono de 0,8 a 0,65%.



MUESTRA N° 3

El análisis de la microdureza de la muestra cementada n° 3 ha revelado una dureza superficial de 800 μm y una profundidad de 750 HV0.2 como podemos ver en la siguiente gráfica.

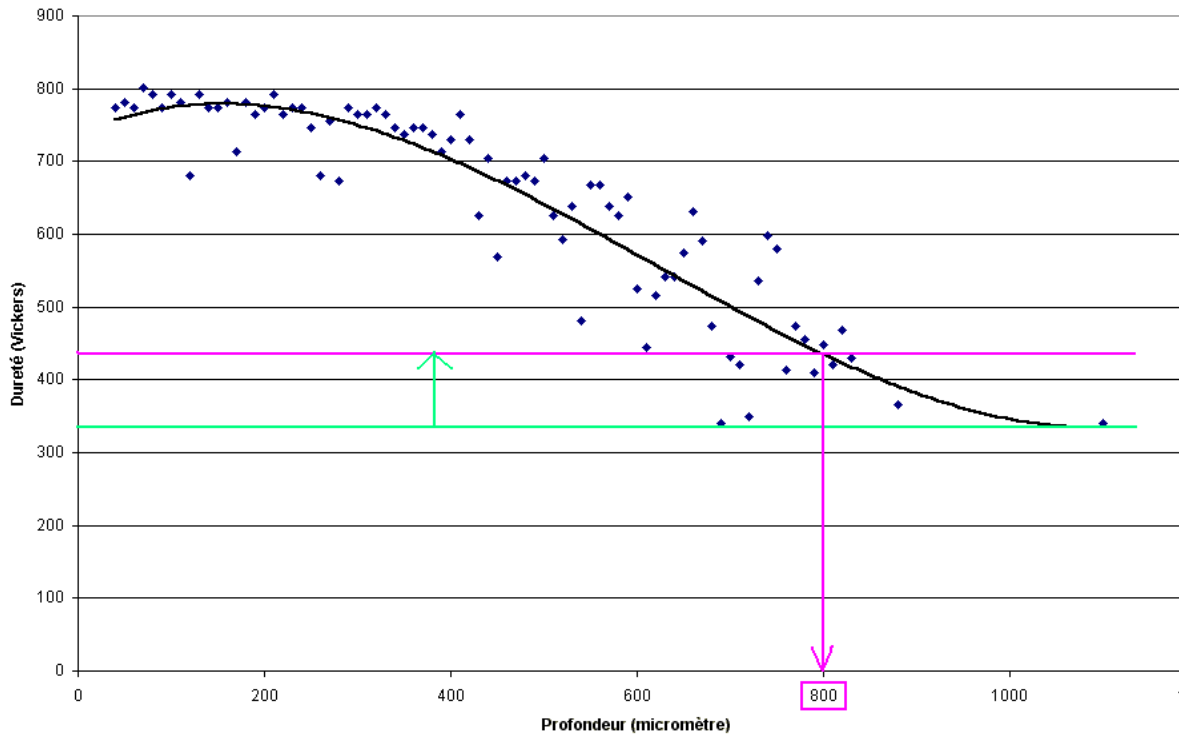


Figura 22: Perfil de la dureza de la muestra cementada n° 3 en función de la profundidad

Estos resultados son bastante satisfactorios. Además, parece que se ha corregido la caída de la dureza en el extremo de la muestra cementada.



MUESTRA N° 4

El análisis de microdureza de la muestra cementada n° 4 da una profundidad de cementación de 730 μm micrómetros y una dureza superficial de 800 Hv0.3 como se puede observar en la gráfica adjunta:

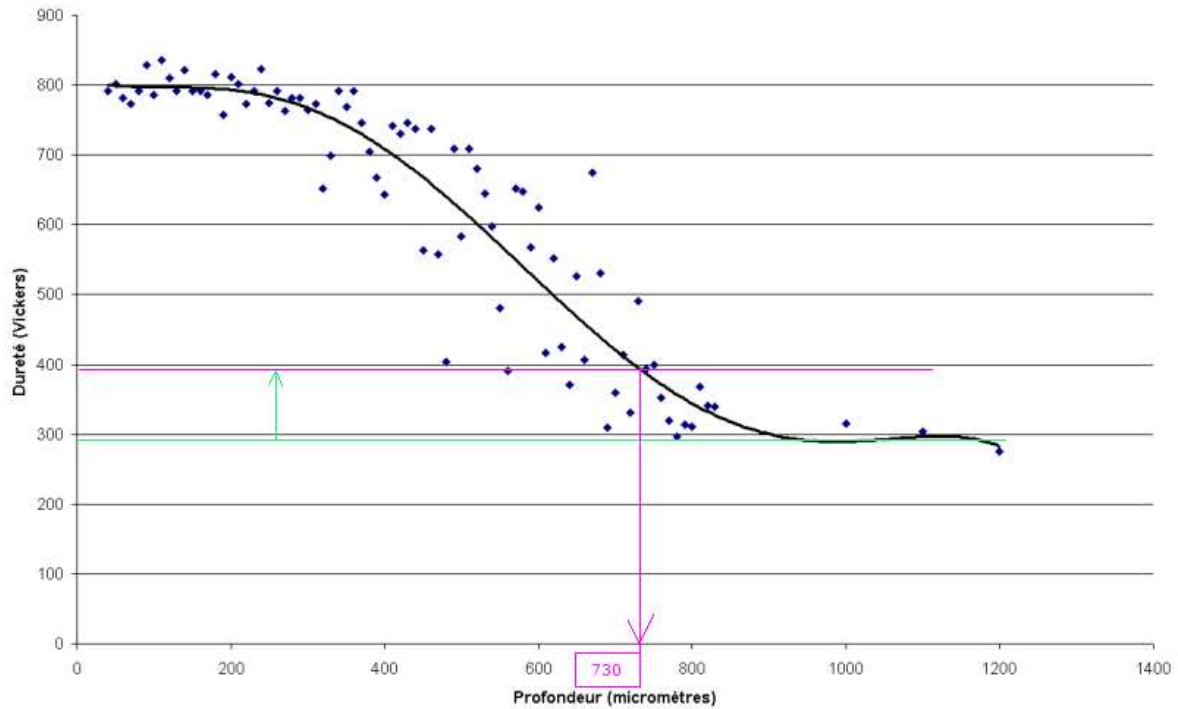


Figura 23: Perfil de la dureza de la muestra cementada n° 4 en función de la profundidad

Esta prueba demuestra que se ha resuelto el problema de la caída de la dureza superficial. Sin embargo, no se ha logrado obtener una profundidad de 800 μm tal y como se pedía en las especificaciones del proyecto.

Así pues, por el momento, dos ensayos de cementación responden a nuestras expectativas: la muestra n° 1 y la muestra n° 3.



c) Análisis de la profundidad de cementación por microscopía óptica

El microscopio óptico es una poderosa herramienta que ha permitido medir la profundidad de cementación. Como se puede ver en la imagen adjunta, la zona cementada es claramente visible y por tanto es muy fácil de medir la profundidad cementada en la misma.

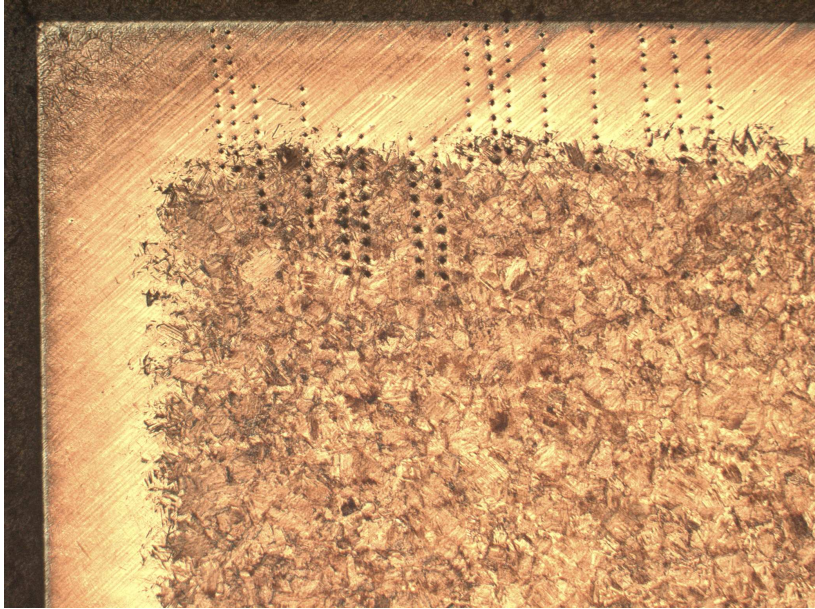


Figura 24: Imagen microscópica de una muestra cementada de acero 19MnCr5

Este análisis también proporciona una evidencia visual de que la zona cementada (periferia) es más dura que la no cementada (núcleo). En efecto, la siguiente imagen muestra que las huellas impresas hechas por el microdurómetro Vickers son más grandes en el núcleo de la muestra que en la parte periférica de la muestra cementada.

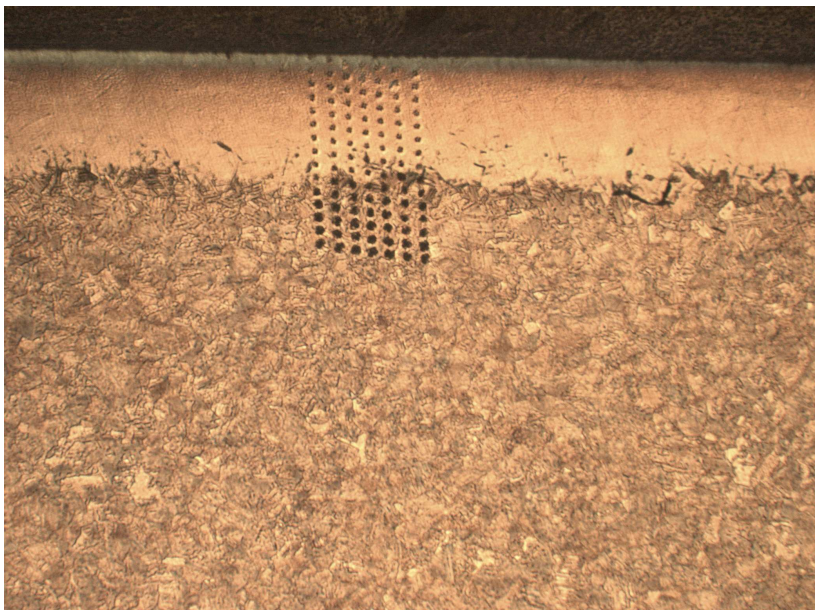


Figura 25: Imagen microscópica del área impresa en la zona cementada y no cementada



d) Análisis de la microestructura por microscopía electrónica

Las imágenes obtenidas por microscopía electrónica muestran perfectamente la diferencia en la microestructura de la muestra cementada y permiten medir el tamaño de los granos austeníticos.

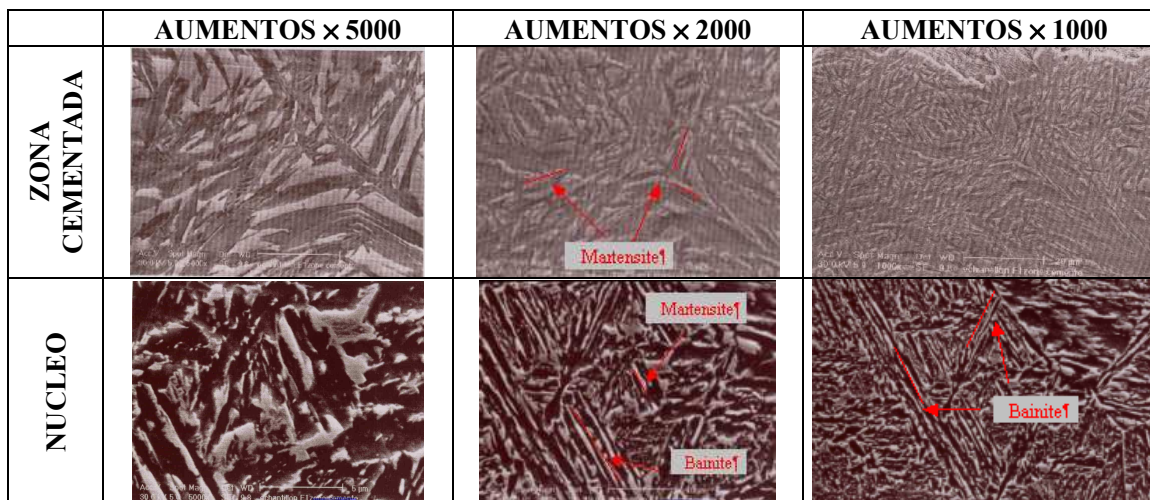


Figura 26: Imagen microscópica a diferentes aumentos de zonas cementadas y no cementadas de la muestra n° 2

En la zona cementada, se puede observar la abundancia de granos martensíticos formados por la cementación. Esta estructura se muestra en forma de pequeñas agujas de color claro. Se producen durante la etapa de temple, lo que da lugar a la acumulación de carbono facilitando la formación de esta estructura. La caída repentina de la temperatura durante el temple es más rápida en la superficie de la muestra que en el núcleo, es por ello, que la estructura martensítica está presente principalmente en la periferia.

A diferencia de la zona cementada, el núcleo de la muestra tiene dos estructuras: bainítica y martensítica. La parte no cementada se compone principalmente de bainita, sin embargo, algunos granos austeníticos se transforman en martensita. Como se puede apreciar en las imágenes, la estructura bainítica se caracteriza por agujas de gran tamaño (bastones) rodeadas por una capa de carburo de hierro (Fe_3C) de color oscuro.

4.4 AMPLIACIÓN DEL TRABAJO

El trabajo se deberá ampliar con el objetivo de lograr desarrollar ensayos de cementación a baja presión para el acero 19MnCr5, buscando una profundidad de cementación de 800 μm , utilizando acetileno para el enriquecimiento en carbono.

Además, una vez recibido el presupuesto de AIR LIQUIDE para el gas de los equipos de laboratorio, los manómetros y mangueras, se podrá pedir el material en cuestión y realizar las conexiones necesarias. De este modo, los ensayos de cementación con propano que se han realizado en este estudio podrán ser determinados con acetileno para poder comparar los resultados.



Selección del laboratorio de análisis y caracterización del acero cementado

Después de la cementación de las piezas, se ha de subcontratar la ejecución de los perfiles de carbono, ya que este análisis no es posible desde el centro. Para ello se ha de realizar un proceso de selección de posibles laboratorios a subcontratar antes de comenzar los ensayos.

En un primer momento, hemos desarrollado una lista de potenciales laboratorios para realizar los perfiles de carbono de las muestras de acero 19CrMn5 cementadas. Para el análisis del perfil de carbono se han propuesto dos técnicas para efectuar el análisis: microsonda de rayos X y SDL (Espectrometría por descarga luminiscente).

Por último, se compararon los análisis por microsonda de rayos X y por SDL para saber cual era el más apropiado (precisión, precio...) para el acero 19CrMn5 cementado. Esta comparación ha permitido determinar que la elección del análisis por SDL es el más correcto.

También se ha de seleccionar una empresa de mecanizado y tratar de negociar el presupuesto más barato con la empresa CORMARY, para la preparación de muestras adecuadas para el análisis de perfil de carbono mediante la técnica SDL.

Por último, una vez elegida la empresa de mecanizado, se deberán preparar las muestras y enviar al laboratorio con el fin de realizar los perfiles de carbono de las mismas.

4.5 ESTIMACIÓN DE COSTES

Como objetivo final de este trabajo, se ha realizado una estimación de los costes asociados con el desarrollo de ensayos de cementación a baja presión. La última tarea nos ha permitido hacer un balance de las tareas que se ha hecho a lo largo de este estudio.

El presupuesto en el que se detalla el desarrollo de ensayos de cementación a baja presión con propano, se presenta en forma de factura para poder ser presentado a futuros clientes (ver anexos).

Este documento está destinado en términos generales a empresas u organizaciones, que estén dispuestos a externalizar el desarrollo de ensayos de cementación a baja presión para un material en particular. Gracias al mismo, los responsables de centro ahora podrán proporcionar un presupuesto detallado estimando el trabajo a realizar y los costes generados.

La elaboración de este presupuesto ha requerido de información técnica recopilada de los técnicos, del fabricante del horno y de los servicios de compras del departamento.



De hecho, se ha incluido el precio de servicios públicos como el agua y la electricidad, así como el precio del gas utilizado (propano o acetileno) contenido en las especificaciones solicitadas a AIR LIQUIDE. A continuación, se ha calculado el consumo de cada servicio (propano, acetileno, helio, agua, electricidad) para un ensayo, y luego se ha estimado el coste final teniendo en cuenta que el desarrollo de los ensayos requiere cuatro pruebas en el horno. También añadimos el coste del técnico que realiza las pruebas en el horno de cementación.

A través del técnico de ensayos, se estimó el coste de la preparación de las muestras (corte con diamante, pulido, recubrimiento), así como el análisis de las pruebas incluyendo la microscopía óptica y electrónica, la microdureza y la difracción de rayos X. Estas partidas llevan incluido el coste de mano de obra.

Los presupuestos que se han entregado por parte del laboratorio de análisis de los perfiles de carbono y del taller de mecanizado completan el presupuesto que finaliza con la estimación de la depreciación de equipos, costos de mantenimiento y pequeñas consumibles.

Por último, se ha obtenido el precio final con el 21% IVA tal y como se indica en el presupuesto. Se ha estimado un coste total de **6.213,97 €** para el desarrollo de ensayos de cementación a baja presión con propano, teniendo en cuenta que no incluye el precio del gas (propano o acetileno) y el importe del taller de mecanizado. Aún no se ha recibido el presupuesto en relación con el gas. Además, el director del proyecto considera que el taller de mecanizado ofrece sus servicios a precios muy elevados. Para la continuación del proyecto, se tendrá que encontrar un taller más barato para realizar el mecanizado de las piezas cementadas o elegir una alternativa al mecanizado en el taller para preparar las piezas para el análisis del perfil de carbono.



5. CONCLUSIONES

En el trabajo aquí presente, a pesar de un correcto enfoque del mismo, se han encontrado dificultades materiales y humanas que no han permitido llevar a cabo todos los objetivos propuestos en un primer momento.

En efecto, no se ha iniciado el desarrollo de los ensayos de cementación con acetileno, lo que implica la ampliación del trabajo.

Sin embargo, los ensayos de cementación con propano han sido satisfactorios. Se han determinado dos líneas de cementación, para cada contenido de carbono en superficie.

Además, se han realizado varias pruebas y se ha establecido un procedimiento para utilizar el horno durante la cementación. También se ha elaborado un presupuesto completo sobre el desarrollo de ensayos de cementación a baja presión con propano. Se ha iniciado la instalación necesaria para la utilización del gas propano en el laboratorio, estando pendientes de la aprobación del presupuesto para la conexión de gas acetileno.

Finalmente, se ha optado por analizar mediante la técnica SDL los perfiles de carbono de las muestras cementadas. Esta técnica involucra una rectificación de las muestras. Se ha contactado con un taller de mecanizado para dicha preparación. Hasta la fecha, el precio suministrado por dicha empresa es demasiado elevado. Por lo tanto, se deberá hacer un estudio comparativo con otros talleres de mecanizado con el fin de lograr el mejor precio, y posteriormente enviar las muestras a analizar.



ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Secuencia de cementación: variación de temperatura, ciclos alternos de enriquecimiento y de difusión,</i>	7
<i>Figura 2: Evolución de la concentración de carbono en función de la profundidad,</i>	7
<i>Figura 3: Máquina de corte</i>	10
<i>Figura 4: Discos y máquina de pulido</i>	10
<i>Figura 5: Interfaz de software WinCPB,</i>	11
<i>Figura 6: Gráfico de la saturación del carbono en la austenita frente a la temperatura,</i>	12
<i>Figura 7: Gráfico para el valor del flujo en función de la temperatura de cementación,</i>	13
<i>Figura 8: Pieza de acero preparada para un ensayo de cementación,</i>	14
<i>Figura 9: Horno de cementación</i>	15
<i>Figura 10: Nuevo cálculo de los flujos de carbono después de los ensayos en el horno,</i>	17
<i>Figura 11: Equipo de recubrimiento</i>	18
<i>Figura 12: Probetas listas para análisis (muestras recubiertas),</i>	18
<i>Figura 13: Microdurómetro Vickers</i>	19
<i>Figura 14: Imagen de las huellas de una prueba de microdureza,</i>	20
<i>Figura 15: Ejemplo de curva de microdureza de acero cementado,</i>	20
<i>Figura 16: Microscopio óptico</i>	21
<i>Figura 17: Microscopio electrónico de barrido (SEM)</i>	22
<i>Figura 18: Esquema de la microsonda de rayos X,</i>	24
<i>Figura 19: Resumen del ensayo de cementación elegido para cada muestra,</i>	30
<i>Figura 20: Perfil de la dureza de la muestra cementada n° 1 en función de la profundidad,</i>	31
<i>Figura 21: Perfil de la dureza de la muestra cementada n° 2 en función de la profundidad,</i>	32
<i>Figura 22: Perfil de la dureza de la muestra cementada n° 3 en función de la profundidad,</i>	34
<i>Figura 23: Perfil de la dureza de la muestra cementada n° 4 en función de la profundidad,</i>	35
<i>Figura 24: Imagen microscópica de una muestra cementada de acero 19MnCr5,</i>	36
<i>Figura 25: Imagen microscópica del área impresa en la zona cementada y no cementada,</i>	36
<i>Figura 26: Imagen microscópica a diferentes aumentos de zonas cementadas y no cementadas de la muestra n° 2,</i>	37
<i>Figura 27: Visión general de las tareas del proyecto,</i>	47



BIBLIOGRAFÍA

J.A. PERO-SANZ ELORZ, *Ciencia e ingeniería de materiales*, CIE DOSSAT 2000

FAYOLLE R., COURTOIS B., ROTTIER R., *Atelier de traitement thermique – Hygiène et sécurité*, Cahier de notes documentaires *Hygiène et sécurité du travail*, 2001.

GHIGLIONE Dominique, LEROUX Claude, TOURNIER Christian, *Cémentation, Carbonitruration*, TECHNIQUES DE L'INGENIEUR, Traité M1226.

COPPIN Patrick, LHOTE Benoît, BUFFIN Meryem, CANTACUZENE Serban, *Atmosphères de traitement thermique*, TECHNIQUES DE L'INGENIEUR, Traité M1220.

AFNOR, NF EN 10084 (A 35-551), *Aciers pour cémentation*, mars 1999

EDENHOFER B., CAZENAVE Ph., *Nouveaux procédés thermochimiques de diffusion en fours sous vide pour pièces en acier*, ATTT, 2001.

Intelligent Manufacturing Systems, *Projects/01014 VHT*, [en ligne], Adresse URL: http://www.ims.org/projects/project_info/vht.html



ANEXOS



ANEXO I: PRESUPUESTO



PRESUPUESTO

CAPITULO	PARTIDA	DESCRIPCIÓN	UDS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE PARTIDA	IMPORTE CAPÍTULO
01		Preparación de muestras	ud	1			397,32
	01.01	Corte con diamante	ud	4	24,83	99,32	
	01.02	Revestimiento y pulido	ud	4	74,5	298,00	
02		Pruebas de ensayo en horno de cementación	ud	1			396,87
	02.01	Helio	l	2,25	15,24	34,29	
	02.02	Agua (temple)	l	2,4	1,7	4,08	
	02.03	Agua (refrigeración)	l	44	1,7	74,80	
	02.04	Electricidad	kwh	15,8	0,150938	2,38	
	02.05	Técnico de ensayos	h	4	70,33	281,32	
03		Análisis de muestras cementadas	ud	1			1265,96
	03.01	Microscopio óptico	h	4	86,91	347,64	
	03.02	Microscopio electrónico de barrido	h	4	91,47	365,88	
	03.03	Microdurómetro	h	4	38,11	152,44	
	03.04	Difracción de rayos X	ud	4	100	400,00	
04		Análisis de perfiles de carbono	ud	1			2930,00
	04.01	Espectrometría de descarga luminiscente	ud	4	732,5	2930,00	
05		Material y equipos	ud	1			145,36
	05.01	Amortización de material	ud	1	119,49	119,49	
	05.02	Mantenimiento y calibración de equipos	ud	1	25,87	25,87	
						Subtotal	5.133,68 €
						IVA (21%)	1.078,46 €
						IMPORTE TOTAL	6.213,97 €



ANEXO II: PLANIFICACIÓN Y SEGUIMIENTO



Planificación

Se ha desarrollado un organigrama de distribución de tareas, ver tabla adjunta, el cual ha permitido ver todas las tareas a realizar en el proyecto.

TAREAS GENERALES	TAREAS ESPECÍFICAS	OTRAS TAREAS
<ul style="list-style-type: none"> - Lectura y comprensión del estudio - Satisfacer y reformular las necesidades del cliente - Establecimiento de objetivos - Reparto de competencias - Definición de tareas - Redacción del organigrama de tareas - Redacción de la ficha de tareas - Realización de diagramas Gantt y Pert - Redacción de las especificaciones - Validación de las especificaciones - Redacción y revisión del proyecto - Presentación y control por parte del Tutor del proyecto - Preparación de la presentación oral - Presentación oral 	<ul style="list-style-type: none"> - Documentación y estudio de la cementación a baja presión - Documentación y estudio sobre el acero 19CrMn5 - Estudio de la seguridad relacionadas con el uso del propano y del acetileno - Estudio de la seguridad relacionados con la cementación a baja presión - Formación en el uso de equipos - Diseño de equipos para el uso de acetileno - Envío de muestras a un laboratorio de análisis externo - Demanda de material y presupuestos - Demanda de materias primas - Comunicación con el servicio de compras - Redacción del procedimiento de utilización del horno - Cuantificación de los costes de los ensayos de cementación a baja presión 	<ul style="list-style-type: none"> - Elección de los ensayos de cementación - Preparación de material y de muestras - Pruebas de cementación - Análisis y síntesis de las pruebas - Toma de contacto con los técnicos del departamento - Actualización de la planificación - Reuniones con los directores y técnicos del proyecto

Figura 27: Visión general de las tareas del proyecto

Se ha decidido trabajar con el software de Microsoft Project para dar forma a la planificación de este proyecto, con el objetivo de realizar el trabajo en el tiempo establecido. Se ha realizado una actualización que nos ha permitido hacer un seguimiento de los avances del proyecto y ver si se excedían los plazos iniciales.

Obviamente, previa a la planificación del proyecto, se han enumerado y definido las tareas del mismo, a partir de las fichas de tareas que se adjuntan en el anexo del trabajo.

1) Construcción de las fichas de tareas

Después de haber definido claramente los objetivos de nuestro proyecto, se han enumerado todas las tareas a realizar a lo largo del proyecto. Se han recogido y recopilado por temas todas las tareas que se han tenido que llevar a cabo durante los cuatro meses de proyecto.

Luego se ha establecido un organigrama de tareas que clasifica las mismas en tres partes diferentes y las organiza con el fin de obtener una mejor visión de todas las acciones a llevar a cabo.



Una vez completado el organigrama de tareas, queda por detallar cada tarea indicando el contenido exacto de los recursos a utilizar. Este trabajo aparece en los registros de las tareas que se presentan en el mismo anexo.

Las fichas de trabajo han sido elaboradas de acuerdo un modelo clásico de la gestión de proyectos. Se ha decidido que aparezca en dichas fichas el siguiente contenido: el número, el título completo de la tarea, la fecha de inicio, fecha de finalización, hora, descripción de la tarea, entradas, salidas y recursos.

2) Realización de los diagramas Gantt y Pert

El organigrama de tareas y las fichas correspondientes han permitido realizar los diagramas de Gantt y PERT. Sin embargo, a medida que el proyecto transcurría, se ha visto que era necesario realizar algún cambio en dichos diagramas. De hecho, la realidad no siempre ha acompañado a las previsiones iniciales. Por esta razón, ha sido necesario actualizar los diagramas de Gantt y PERT para realizar un seguimiento del proyecto y mantener la fecha de entrega prevista.

a) Diagramas iniciales

GANTT

La primera operación a realizar en el software ha sido incluir todas las tareas del proyecto en las casillas correspondientes. Este trabajo ha sido relativamente fácil, ya que estaba indicado en el organigrama de tareas.

A continuación, se ha creado un programa específico para este proyecto. Esta parte ha generado algunos problemas, ya que el calendario no se cumplía regularmente. Por lo tanto, ha sido necesario comprobar cada semana si se debían hacer cambios para lograr los objetivos en el tiempo establecido.

Al inicio del proyecto, debido a la falta de precisión en el contenido de algunas tareas, se ha producido el incumplimiento en algunos periodos de la planificación, a pesar de haber proporcionado un margen de error en las tareas que podían resultar más complejas.

El siguiente paso ha sido organizar las tareas, asignando una secuencia lógica. Para ello, se han definido unas prioridades de enlaces (inicio-fin, comienzo a comienzo, parada y arranque) y unos retrasos. También se han especificado las restricciones del proyecto, para poder respetar la fecha de finalización del proyecto.

De esta forma, Microsoft Project, ha sido capaz de calcular automáticamente el inicio y el final de cada tarea. También calculó la carga de tiempo de cada recurso.

El resultado no ha sido el deseado, ya que en algunos recursos se emplean más de 100% de su tiempo. Por lo tanto, ha sido necesario ajustar ciertas restricciones tales como la asignación de otros recursos en un tiempo determinado o la sobrecarga de los recursos, mediante la reducción de la carga.



Una vez realizadas las modificaciones mediante Microsoft Project, se ha recalculado la duración estimada del proyecto, lo cual ha encajado con el tiempo disponible para la realización del proyecto.

PERT

Una vez completado el diagrama de Gantt, se estableció el diagrama PERT provisional del proyecto. De hecho, Microsoft Project lo crea automáticamente cuando se calcula el diagrama de Gantt.

El diagrama PERT viene representado mediante cajas en las cuales aparece el título de la tarea, su duración, inicio y fin. Se obtiene la secuencia de trabajo y es posible visualizar la ruta crítica.

Siendo precisos, la ruta crítica esta compuesta por una serie de tareas críticas (el final de la fecha más temprana debe coincidir con el inicio de la fecha a más tardía). Si la primera fecha no se cumple, por un cambio en la fecha de finalización de las tareas, hará aumentar la duración del proyecto.

Los diagramas de Gantt y PERT incluyen la planificación y son muy útiles para la comprensión de las tareas. Sin embargo, cuando se produce un retraso, los diagramas son poco fiables y deben reajustarse mediante la realización de un seguimiento del proyecto.

Seguimiento y actualización de la planificación del proyecto

1) Primer actualización: al 50% de las horas asignadas al proyecto al inicio

Se ha realizado un primer seguimiento, el objetivo del mismo ha sido revisar el progreso del trabajo en un momento importante del proyecto.

Para ello, se contó el número de horas dedicadas a cada tarea, y luego se vio si se podía lograr la finalización de cada tarea. A partir de esta actualización, Microsoft Project calcula el porcentaje de finalización de cada tarea. Se ha observado el retraso en algunas tareas y en algunas todavía no se había comenzados.

Por lo tanto, se tuvo que actualizar el diagrama de Gantt mediante el cambio de los porcentajes de las tareas y mover la tarea que no se habían iniciado aún.

En concreto, no se había comenzado a escribir el procedimiento para utilizar el horno: esto se explica por el hecho de que todavía no se conocía toda la información necesaria para ello. Se ha trasladado esta tarea y asignado a otros recursos disponibles en ese momento.



Se han observado los siguientes retrasos:

- Instalación de equipos de laboratorio para el uso de acetileno, todavía no se habían recibido las conexiones de seguridad.
- Elección de los parámetros de cementación con propano.
- Realización de ensayos y preparación de probetas, la realización de las probetas mediante el recubrimiento de las piezas se realiza después de los ensayos de cementación estén realizados.

2) Segunda actualización: una semana antes de la entrega del proyecto.

Debido a que el número de horas asignadas al proyecto ha sido relativamente pequeño en febrero y marzo, se ha decidió hacer un segundo seguimiento al final del proyecto.

Se han podido ver los siguientes retrasos:

- El tiempo necesario de entrega de un presupuesto superó las estimaciones planteadas al inicio. Se había previsto que un presupuesto pondría estar elaborado en dos semanas a partir de la petición. Sin embargo, la realidad ha mostrado que se requiere cerca de un mes. Este error ha causado el retraso del envío de las muestras para el análisis de perfil de carbono del acero cementado.
- Falta de disponibilidad del director del proyecto con respecto al horario indicado en al planificación del proyecto. Su presencia ha sido esencial para realizar las pruebas de cementación con el horno y esta tarea ha sido clave en el proyecto.
- Desfase en la distribución de las horas del proyecto. Este desfase de tiempo ha sido la causa principal de los retrasos, especialmente con respecto a la realización de pruebas. En efecto, se requieren varias horas seguidas (aproximadamente cuatro horas), además de la presencia continua del director del proyecto.
- Por último, un problema técnico importante ha impedido que se realicen las pruebas propuestas en el tiempo establecido. El hecho de tener que programar el horno de cementación ha retrasado las pruebas y en consecuencia el envío de las muestras cementadas al laboratorio de análisis de los perfiles de carbono.

Debido a ello, todas las especificaciones establecidas al principio del proyecto no se han completado a tiempo. Sin embargo, hay que señalar que la mayoría de las tareas se ha completado y que los resultados buscados se han logrado.



FICHAS DE TAREAS

Ficha N° :1
Título de la tarea: Lectura y comprensión de los objetivos del proyecto
Fecha de inicio: 04/03/13
Fecha de fin: 04/03/13
Duración: 0.5 horas
Descripción de la tarea: lectura de las especificaciones del proyecto con el fin de conocer el contexto del proyecto y las tareas a realizar.
Entrada: ficha descriptiva del proyecto
Salida: conocer los objetivos del proyecto
Recursos: humanos + fichas del proyecto
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 2
Título de la tarea: Reunión con el director de proyecto y especificación de necesidades
Fecha de inicio: 04/03/13
Fecha de fin: 04/03/13
Duración: 0.75 horas
Descripción de la tarea: reunión con el director de proyecto, explicación de los objetivos y especificación de las necesidades
Entrada: ficha descriptiva del proyecto + director de proyecto
Salida: al finalizar la sesión, las necesidades relativas del proyecto están más claras. Ahora sabemos las tareas concretas a realizar y la razón de las mismas.
Recursos: humanos + fichas del proyecto
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 3
Título de la tarea: Fijación de objetivos
Fecha de inicio: 04/03/13
Fecha de fin: 04/03/13
Duración: 1 hora
Descripción de la tarea: fijación de los objetivos del proyecto
Entrada: ficha del proyecto + información dada por el director de proyecto
Salida: se ha realizado un balance con los objetivos del proyecto y la manera de organizarlos cronológicamente. El proyecto está claramente definido, no hay necesidad de modificar o precisar más.
Recursos: humanos + ficha de proyecto
Responsables : equipo de proyecto



Ficha N° : 4
Título de la tarea: Búsqueda bibliográfica sobre la cementación a baja presión
Fecha de inicio: 04/03/13
Fecha de fin: 07/03/13
Duración: 10 horas
Descripción de la tarea: búsqueda de reseñas generales sobre la cementación a baja presión
Entrada: ningún conocimiento sobre la cementación a baja presión
Salida: conocimientos generales sobre la cementación a baja presión
Recursos: humanos, bibliográficos e internet
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 5
Título de la tarea: Búsqueda bibliográfica sobre el acero 19CrMn5
Fecha de inicio: 04/03/13
Fecha de fin: 07/03/13
Duración: 10 horas
Descripción de la tarea: búsqueda de reseñas generales sobre el acero 19CrMn5 (propiedades, características, etc.)
Entrada: ningún conocimiento del acero 19CrMn5
Salida: conocimiento de las propiedades y características del acero 19CrMn5
Recursos: humanos, bibliográficos
Responsables : equipo de proyecto (Israel)

Ficha N° : 6
Título de la tarea: Búsqueda bibliográfica sobre la seguridad vinculada a la utilización del propano y el acetileno
Fecha de inicio: 04/03/13
Fecha de fin: 05/03/13
Duración: 6 horas
Descripción de la tarea: búsqueda de fichas de seguridad vinculadas a la utilización del propano y el acetileno
Entrada: ningún conocimiento de las normas de seguridad
Salida: normas de seguridad relativas a la utilización del propano y el acetileno
Recursos: humanos, bibliográficos
Responsables : equipo de proyecto



Ficha N° : 7
Título de la tarea: Búsqueda bibliográfica sobre la seguridad ligada a la cementación a baja presión
Fecha de inicio: 04/03/13
Fecha de fin: 05/03/13
Duración: 5 horas
Descripción de la tarea: búsqueda de las normas de seguridad vinculadas a la cementación a baja presión (francesas, europeas, ...)
Entrada: ningún conocimiento de las normas de seguridad
Salida: normas de seguridad relativas a la cementación a baja presión
Recursos: humanos, bibliográficos, internet
Responsables : equipo de proyecto
Ficha N° : 8
Título de la tarea: Formación para la utilización de material
Fecha de inicio: 07/03/13
Fecha de fin: 11/03/13
Duración : 4 horas
Descripción de la tarea: conocer los equipos de preparación de las muestras de acero
Entrada: D. Serge Tovar + corte + recubrimiento+ pulido + microscopio electrónico + microdurómetro+ difractor de rayos X
Salida: conocimiento y habilidades para el corte, recubrimiento y pulido a partir de una barra metálica, y a su vez sobre el análisis de muestras (microscopía, difracción de rayos X y cristalografía)
Responsables : equipo de proyecto (Israel)
Ficha N° : 9
Título de la tarea: Acondicionamiento del equipamiento del laboratorio para la utilización de acetileno
Fecha de inicio: 11/03/13
Fecha de fin: 17/03/13
Duración : 20 horas
Descripción de la tarea: reubicar los diferentes equipos del laboratorio con el fin de cumplir las normas de seguridad, acondicionar el laboratorio para facilitar el trabajo de los técnicos
Entrada: normas de seguridad ligadas a la cementación a baja presión y a la utilización de propano y acetileno
Salida: acondicionamiento del laboratorio y los equipos a las normas de seguridad
Recursos: humanos y materiales
Responsables : equipo de proyecto



Ficha N° : 10
Título de la tarea: Elección de parámetros de cementación
Fecha de inicio: 13/03/13
Fecha de fin: 26/03/13
Duración : 20 horas
Descripción de la tarea: simulación de varios parámetros de cementación mediante un software y elección de los parámetros de ensayo reales
Entrada: software de simulación
Salida: diversos parámetros de cementación que respondan a las necesidades del cliente
Recursos: humanos + informático
Responsables : equipo de proyecto (Israel)

Ficha N° : 11
Título de la tarea: Preparación de material y de las muestras
Fecha de inicio: 11/03/13
Fecha de fin: 13/03/13
Duración : 15 horas
Descripción de la tarea: corte y pulido de las muestras de acero 19CrMn5, instalación de botellas de helio, de botellas de propano y de acetileno y programación de los parámetros de cementación en el software del horno.
Entrada: corte, pulido, botellas de helio, botellas de propano y acetileno, software del horno, parámetros de cementación.
Recursos: humanos + material
Responsables : equipo de proyecto (Israel)

Ficha N° :12
Título de la tarea: Ensayos
Fecha de inicio: 19/03/13
Fecha de fin: 15/06/13
Duración : 49 horas
Descripción de la tarea: puesta en marcha del horno de cementación y supervisión de la prueba.
Entrada: muestras preparadas
Salida: muestras cementadas
Recursos: humanos + horno de cementación preparado para utilizar
Responsables : equipo de proyecto (Israel)



Ficha N° : 13
Título de la tarea: Análisis y síntesis de los ensayos
Fecha de inicio: 15/06/13
Fecha de fin: 22/06/13
Duración : 5 horas
Descripción de la tarea: análisis de muestras cementadas y síntesis de los objetivos obtenidos
Entrada: muestras cementadas no analizadas
Salida: profundidad real de cementación + estructura cristalográfica del acero cementado
Recursos: humanos+ microscopio electrónico + microdurómetro + difractor de rayo X
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 14
Título de la tarea: Envío de muestras al laboratorio externo para análisis
Fecha de inicio: 22/06/13
Fecha de fin: 22/06/13
Duración : 0.1 horas
Descripción de la tarea: envío de muestras cementadas a un laboratorio externo para que realicen el perfil de carbono de las muestras cementadas.
Entrada: muestras cementadas
Salida: perfil de carbono de las muestras cementadas
Recursos: humanos, laboratorio externo para realizar los perfiles de carbono del acero 19CrMn5 cementado
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 15
Título de la tarea: Reparto de funciones
Fecha de inicio: 05/03/13
Fecha de fin: 05/03/13
Duración : 0.45 horas
Descripción de la tarea: determinar las funciones precisas de cada miembro del equipo de proyecto
Entrada: equipo de proyecto sin funciones
Salida: cada miembro del equipo de proyecto tiene las funciones definidas
Recursos: humanos
Responsables : equipo de proyecto



Ficha N° : 16
Título de la tarea: Definición de tareas Fecha de inicio: 04/03/13 Fecha de fin: 05/03/13 Duración : 2 horas
Descripción de la tarea: listar las tareas a efectuar, precisar con detalle cada tarea
Entrada: visión global de las tareas a realizar Salida: listado preciso de tareas Recursos: humanos
Responsables : equipo de proyecto
Ficha N° :17
Título de la tarea: Redacción del organigrama de tareas Fecha de inicio: 05/03/13 Fecha de fin: 05/03/13 Duración : 3 horas
Descripción de la tarea: clasificar las tareas definidas por temas y realizar un organigrama con las mismas
Entrada: listado de tareas Salida: tareas organizadas y representadas en un organigrama Recursos: humanos
Responsables : equipo de proyecto
Ficha N° : 18
Título de la tarea: Redacción de las fichas de tareas Fecha de inicio: 11/03/13 Fecha de fin: 11/03/13 Duración : 6 horas
Descripción de la tarea: redactar el contenido de las fichas de tareas (título, fecha de inicio, fecha de fin, duración, descripción de la tarea, entrada, salida, recursos, responsables) para cada tarea
Entrada: organigrama de tareas Salida: Fichas de tareas Recursos: humanos
Responsables : equipo de proyecto



Ficha N° : 19
Título de la tarea: Realización de diagramas Gantt et Pert
Fecha de inicio: 11/03/13
Fecha de fin: 19/03/13
Duración : 25 horas
Descripción de la tarea: determinar los predecesores y los sucesores de cada tarea, la implicación de recursos y organizar estas tareas en forma de diagrama Gantt et Pert.
Entrada: organigrama de tareas
Salida: diagramas Gantt et Pert
Recursos: humanos, Microsoft Project
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 20
Título de la tarea: Redacción de las especificaciones
Fecha de inicio: 05/03/13
Fecha de fin: 07/03/13
Duración : 5 horas
Descripción de la tarea: Definir el objetivo del trabajo, la marcha puntual del proceso y las necesidades del cliente, determinar las limitaciones del proyecto, fijar el alcance del estudio, establecer las restricciones ligadas al proyecto y en general definir la función de los diferentes actores que intervienen en el proyecto.
Entrada: objetivos fijados, responsabilidades establecidas
Salida: especificaciones redactadas
Recursos: humanos
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 21
Título de la tarea: Validación de las especificaciones
Fecha de inicio: 07/03/13
Fecha de fin: 07/03/13
Duración : 0.25 horas
Descripción de la tarea: presentar las especificaciones al director de proyecto para su aceptación y corregirlas en función de las observaciones transmitidas.
Entrada: especificaciones redactadas
Salida: especificaciones corregidas
Recursos: Director de proyecto
Responsables : equipo de proyecto



Ficha N° : 22
Título de la tarea: Actualización de la planificación
Fecha de inicio: 19/03/13
Fecha de fin: 08/06/13
Duración : 15 horas
Descripción de la tarea: ver el avance del proyecto
Entrada: diagramas Gant y Pert iniciales
Salida: diagramas Gantt y Pert reales
Recursos: humanos + Microsoft Project
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 23
Título de la tarea: Reunión con el director de proyecto y los especialistas
Fecha de inicio: 10/03/13
Fecha de fin: 25/06/13
Duración : 10 horas
Descripción de la tarea: exposición del avance del trabajo con el director del proyecto y reorientación del trabajo.
Entrada: director de proyecto y especialistas
Salida: balance sobre lo que se ha hecho y lo que queda pendiente de realizar
Recursos: humanos
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 24
Título de la tarea: Pedido de material y de presupuestos
Fecha de inicio: 17/03/13
Fecha de fin: 18/03/13
Duración : 3 horas
Descripción de la tarea: contactar con los laboratorios para realizar los perfiles de carbono y pedir un presupuesto, contactar con una empresa para realizar la calibración del detector de gas (características y presupuesto)
Entrada: laboratorios que efectúan perfiles de carbono + empresas que distribuyen detectores de gas.
Salida: presupuestos
Recursos: humanos + teléfono + internet
Responsables : equipo de proyecto



Ficha N° : 25
Título de la tarea: Pedido de materias primas
Fecha de inicio: 17/03/13
Fecha de fin: 18/03/13
Duración : 3 horas
Descripción de la tarea: contactar con un distribuidor de propano, acetileno y helio
Entrada: distribuidor de propano, acetileno y helio
Salida: presupuestos
Recursos: humanos + teléfono
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 26
Título de la tarea: Toma de contacto con los técnicos
Fecha de inicio: 18/03/13
Fecha de fin: 18/03/13
Duración : 1 hora
Descripción de la tarea: ver la disponibilidad de los técnicos para organizar la formación para poder utilizar el material y los equipos
Entrada: técnicos
Salida: disponibilidad de los técnicos
Recursos: humanos
Responsables : equipo de proyecto (Israel)

Ficha N° : 27
Título de la tarea: Contactar con el servicio de compras
Fecha de inicio: 07/03/13
Fecha de fin: 10/03/13
Duración : 2 horas
Descripción de la tarea: contactar con el servicio de compras para obtener el nombre y la dirección de los contactos de los distribuidores habituales de materias primas de la Escuela.
Entrada: servicio de compras
Salida: nombre y dirección de los distribuidores de materias primas
Recursos: humanos
Responsables : equipo de proyecto



Ficha N° : 28
Título de la tarea: Redacción del proceso de utilización del horno
Fecha de inicio: 18/03/13
Fecha de fin: 19/03/13
Duración : 5 horas
Descripción de la tarea: redactar el procedimiento para utilizar el horno de cementación con total seguridad.
Entrada: normas de seguridad relativas a la cementación a baja presión y a la utilización de propano y acetileno.
Salida: procedimiento de utilización del horno de cementación
Recursos: humanos + normas de seguridad
Responsables : equipo de proyecto (Israel)
Ficha N° : 29
Título de la tarea: Estimación del coste del desarrollo de ensayos de cementación a baja presión.
Fecha de inicio: 08/06/13
Fecha de fin: 12/06/13
Duración : 4 horas
Descripción de la tarea: calcular todos los gastos (personal, técnico, material, en función del tiempo) necesarios para el desarrollo de ensayos de cementación a baja presión.
Entrada: diagrama de Gantt actualizado+ todas las informaciones relativas al proyecto
Salida: un presupuesto completo de la estimación de costes del desarrollo de ensayos de cementación a baja presión
Recursos: humanos
Responsables : equipo de proyecto
Ficha N° : 30
Título de la tarea: Redacción y revisión del proyecto
Fecha de inicio: 19/03/13
Fecha de fin: 12/06/13
Duración : 40 horas
Descripción de la tarea: ver la evolución del proyecto, detallar el desarrollo completo, organizar con claridad la información recogida a lo largo del proyecto, presentar las etapas del proyecto, el desarrollo y los resultados obtenidos
Entrada: diagramas Gantt y Pert planificados y actualizados, resultados obtenidos a partir del proyecto
Salida: memoria del proyecto redactado
Recursos: humanos + informaticos
Responsables : equipo de proyecto



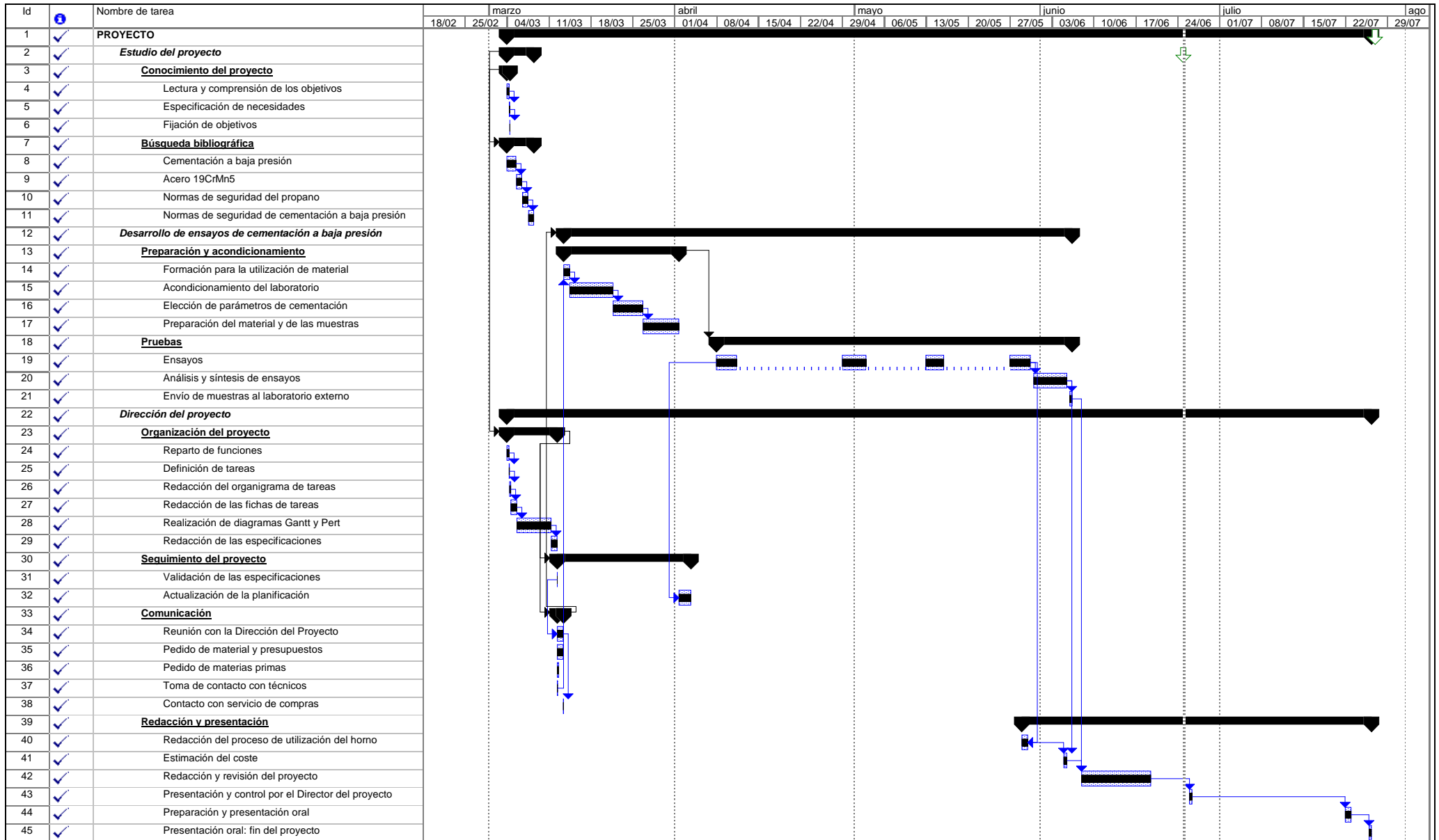
Ficha N° : 31
Título de la tarea: Presentación y control por el director del proyecto
Fecha de inicio: 25/06/13
Fecha de fin: 25/06/13
Duración : 1 hora
Descripción de la tarea: presentar los resultados obtenidos a lo largo del proyecto
Entrada: memoria del proyecto
Salida: memoria del proyecto corregida
Recursos: humanos + memoria
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 32
Título de la tarea: Preparación y presentación oral
Fecha de inicio: 22/07/13
Fecha de fin: 22/07/13
Duración : 8 horas
Descripción de la tarea: preparar lo que se va a presentar y comunicar en la exposición
Entrada: memoria del proyecto
Salida: presentación oral preparada
Recursos: humanos + memoria + informáticos
Responsables : equipo de proyecto

Ficha N° : 33
Título de la tarea: Presentación oral: fin del proyecto
Fecha de inicio: 26/07/13
Fecha de fin: 26/07/13
Duración : 0.5 horas
Descripción de la tarea: presentación de los resultados y del desarrollo del proyecto ante el tribunal, respuestas a las cuestiones planteadas.
Entrada: memoria del proyecto corregida
Salida: resultados y desarrollo del proyecto presentado ante el tribunal
Recursos: humanos + informático
Responsables : equipo de proyecto (Israel)



DIAGRAMAS DE GANTT



Proyecto: Trabajo Fin de Master
 Fecha: mar 25/06/13

Tarea		Progreso		Resumen		Tareas externas		Fecha límite		Hito externo
División		Hito		Resumen del proyecto		Hito externo		Hito		