

Projecte Final de carrera
Enginyeria de Materials
Memòria

PRÀCTICA DE LABORATORI : ASSAIG JOMINY

Autora: Neus Forn i Jorba
Director del Projecte: Amadeu Concustell i Fargas
Bellaterra, 14 de setembre del 2007



**Universitat Autònoma de Barcelona
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria**

ÍNDIX

1.	INTRODUCCIÓ. OBJECTIUS DEL PROJECTE.....	1
2.	FONAMENTS TEÒRICS. DESCRIPCIÓ DE L'ASSAIG JOMINY.....	2
2.1.	Història de l'Assaig Jominy.....	2
2.2.	Descripció de l'assaig segons norma ASTM.....	3
2.3.	Definició de trempabilitat.....	6
2.3.1.	Corbes de trempabilitat.....	7
2.3.2.	Bandes de trempabilitat.....	9
2.4.	Corbes Jominy.....	10
2.5.	Desenvolupament de microestructures en aliatges Fe-C.....	11
3.	DISSENY DEL SISTEMA.....	15
3.1.	Elements i maquinària utilitzats per a realitzar l'Assaig Jominy.....	17
4.	PROCEDIMENT EXPERIMENTAL. PRIMERS ASSAJOS.....	21
4.1.	Descripció de l'assaig.....	21
4.1.1	Descripció dels diferents tipus d'acer.....	21
4.2.	Què cal esperar de l'assaig.....	25
4.2.1.	La transformació martensítica.....	26
4.2.2.	Duresa i resistència de martensites Fe-C.....	29
4.3.	Primers assajos. Optimització del sistema.....	29
4.4.	Assaig definitiu amb noves barres d'acer.....	32
5.	RESULTATS OBTINGUTS.....	35
5.1.	Mesures de duresa.....	35
5.1.1.	Mesures de duresa en la barra cilíndrica.....	35
5.1.2.	Mesures de duresa en mostres embotides.....	38
5.2.	Microscopi òptic.....	39
5.2.1.	Atac químic.....	39
5.2.2.	Fotografies obtingudes en el microscopi òptic.....	40
5.3.	Raigs X.....	47
6.	POSSIBLE MILLORA DE LA PRÀCTICA.....	49
7.	DESCRIPCIÓ DE LA PRÀCTICA DE LABORATORI.....	51
8.	CONCLUSIONS.....	53
9.	PRESSUPOST.....	55



REFERÈNCIES.....58

El projecte consisteix en realitzar una pràctica de laboratori pels alumnes d'Enginyeria de Materials. La pràctica de laboratori consisteix en posar en pràctica l'Assaig Jominy. Aquest assaig permet conèixer la trempabilitat dels acers. L'assaig s'ha de realitzar sota les condicions que descriu la norma ASTM.

A més, en el projecte s'han realitzat assajos de duresa, s'han estudiat les microestructures obtingudes en el material una vegada s'ha realitzat l'assaig i, amb el difractograma de Raigs X s'han conegut les fases que es trobaven presents en el material. Finalment s'han calculat els costos per una banda de la totalitat del projecte, i per altra banda s'ha calculat el cost que suposaria per la universitat que els alumnes realitzessin la pràctica.

AGRAÏMENTS

A l'Amadeu Concustell, director del projecte, que m'ha guiat en tots els passos que he hagut de seguir des del començament fins a la fi del projecte.

Al Manel García Rigol del taller del Departament de Física, que ha estat qui m'ha ajudat a que l'Assaig Jominy tingués "cara i ulls".

Al personal dels serveis de Raigs X de la UAB.

Al personal del Departament de Física que en alguna ocasió m'han donat un cop de mà.

A la meva parella, família i amics, que m'han donat ànims i un gran suport.

1. INTRODUCCIÓ. OBJECTIUS DEL PROJECTE

L'objectiu del projecte final de carrera és preparar una pràctica pels alumnes d'Enginyeria de Materials dins l'assignatura de Materials Metàl·lics. L'assaig que es desenvolupa en el projecte s'anomena Assaig Jominy (assaig descrit en l'apartat 2) segons la norma ASTM.

L'assaig posa en pràctica conceptes teòrics estudiats en l'assignatura. Els alumnes que realitzin la pràctica hauran de tenir certs coneixements d'Enginyeria de Materials.

Tot i que el projecte consisteix en crear una pràctica de laboratori pels alumnes d'Enginyeria de Materials, cal afegir que el projecte es centre en la seva gran part en posar en pràctica l'Assaig Jominy; des de la creació dels seus elements, passant per les mesures i observacions de les mostres assajades, fins l'estudi dels resultats obtinguts.

L'objectiu de la pràctica consisteix en observar la diferència de microestructura i duresa en un mateix material; però en aquest, hi ha hagut un gradient de velocitats de refredament. A més, en el material s'hi identificaran les fases constituents a partir de l'anàlisi de raigs X.

Així doncs, un objectiu més de la pràctica és aprendre a utilitzar aparells de laboratori com la mufla, el duròmetre, la màquina polidora, el microscopi òptic, el difractograma de raigs X entre altres. D'altra banda es prendran totes les precaucions i mesures de seguretat en la realització de l'assaig i en la utilització dels aparells.

Els alumnes hauran de seguir els passos de l'informe que contindrà els següents punts: objectius, introducció teòrica, part experimental detallant els passos a seguir i algunes preguntes que hauran de respondre.

2. FONAMENTS TEÒRICS DE LA PRÀCTICA. DESCRIPCIÓ DE L'ASSAIG JOMINY

La pràctica que es proposa als alumnes consisteix en la realització de l'Assaig Jominy.

L'Assaig Jominy és un mètode que s'utilitza per determinar la trempabilitat d'un acer. En aquest assaig es mantenen constants tots els factors que influeixen en la profunditat de l'enduriment de la peça, com les seves dimensions i forma, tractament de trempat però, en varia la composició [1].

2.1. Història de l'Assaig Jominy

Aquest assaig fou descrit per primera vegada pels seus autors, W.E. Jominy i A. L. Boegehold dels "Research Laboratories Division de la General Motor Co.", de Detroit, en el treball "A Hardenability Test for Carburizing Steel", publicat el 1.938 per la A.S.M. [2].

L'assaig Jominy ha adquirit a partir de 1940, una divulgació extraordinària degut principalment a que les dades que s'obtenen en ell han facilitat notablement el coneixement de certes propietats dels acers. Ha servit, també, per aclarir alguns dubtes que existien sobre la utilitat de determinats elements d'aleació i sobre l'eficàcia de certes combinacions d'elements aliats.

Els resultats que s'obtenen en aquest assaig, depenen fonamentalment de la velocitat crítica de trempat de l'acer, el seu valor es veu reflexat en les corbes que s'obtenen en cada cas. També assenyala les dureses màximes i mínimes que aproximadament es poden obtenir en cada acer, i la influència dels diferents elements d'aliatge sobre la velocitat crítica del trempat. Es pot mesurar la trempabilitat i preveure els resultats que s'obtiniran trempant en aigua, oli, etc., barres de diferents gruixos.

A més, el valor d'aquest assaig augmenta a l'haver-se comprovat que moltes de les propietats mecàniques ordinàries de l'acer, tals com la resistència a la tracció, límit elàstic, estricció i allargament, són funció de la duresa de l'acer i aquesta al mateix temps, és funció de la microestructura. Amb les dades que s'obtenen, s'arriben a conèixer les velocitats de refredament que són

necessàries per aconseguir una duresa, una microestructura i un conjunt de característiques determinades.

L'orientació que actualment es segueix per moltes acereries i consumidors, d'assenyalar per a determinades classes d'acers, unes característiques de trempabilitat, amb límits relativament estrets, sembla que ha evitat molts problemes en l'aprovisionament d'acers especials i ha destacat l'eficàcia de l'Assaig Jominy per la seva selecció i classificació.

2.2. Descripció de l'assaig segons norma ASTM

L'Assaig Jominy és un mètode per determinar la trempabilitat d'un acer. L'assaig està cobert per la norma ASTM A255 dins l'apartat de "Mètodes de prova estàndars per determinar la duresa d'un acer" [3].

Segons la Norma ASTM A255, l'assaig és molt utilitzat per a acers de menys de 0,60% de carboni, consisteix en trempar una proveta cilíndrica de 25 mm de diàmetre i 100 mm de longitud aproximadament (1 polzada de diàmetre i 4 de longitud), per mitjà d'un raig d'aigua que refreda només la base inferior. La temperatura de l'aigua serà de 20° a 25°C. La figura 2.1. mostra la geometria i dimensions de la proveta, i la cubeta on es durà a terme el refredament amb aigua de la proveta en un extrem

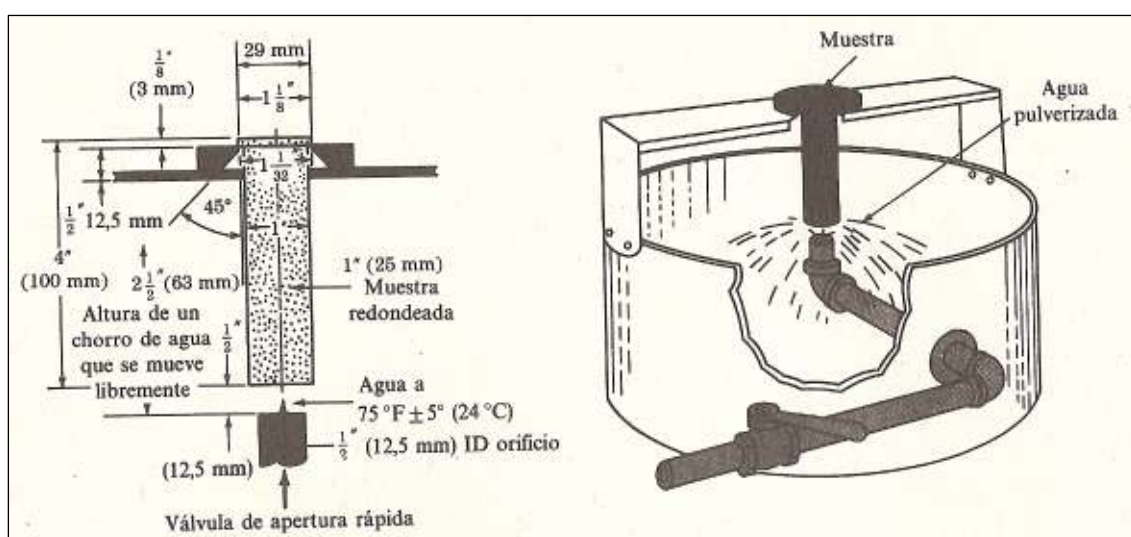


Figura 2.1. (Esquerra) Il·lustració esquemàtica de la proveta de trempabilitat. (Dreta) Mostra i estructura fixa per a la prova de trempabilitat [2].

Generalment es procedeix a la normalització de la mostra abans de l'assaig, per tal de regularitzar les condicions de l'assaig. S'introdueix la proveta al forn, aquest ja es troba escalfat a la temperatura d'austenització, durant 30 minuts aproximadament.

La col·locació de la proveta en la cubeta de refredament ha de ser molt ràpida, per evitar que baixi massa la temperatura de l'acer abans d'iniciar-se el trempat per la base, havent-se d'efectuar aquesta operació en menys de cinc segons. El fet de que l'extrem inferior de la barra es trenpi en aigua i que l'extrem oposat ho faci a temperatura ambient, ens donarà un gradient de velocitats de refredament des de l'extrem inferior fins a l'extrem superior que, al mateix temps, donarà diferents microestructures al llarg de tota la barra. Aquest fet ho mostra la figura 2.2. que explica com es constitueix la microestructura d'una material en funció de temperatura i temps de refredament. La figura 2.2. mostra quina és la temperatura d'austenització a la que s'ha de portat el material per tal de després poder-li fer un refredament.

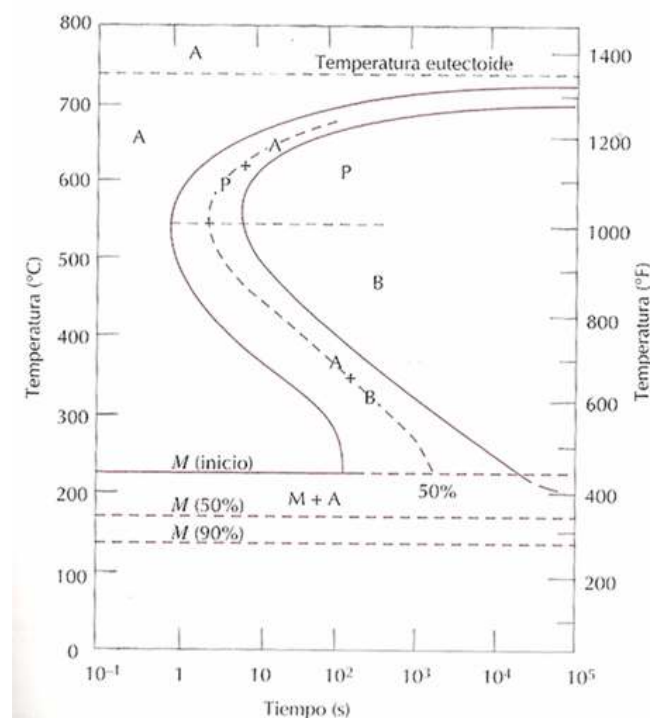


Figura 2.2. Diagrama de transformacions isotèrmica complet d'un acer de composició eutectoide. A:austenita, B:bainita, M:martensita, P:perlita [1].

Així doncs, després de que s'aconsegueixi la temperatura d'austenització, es col·loca la proveta Jominy en una estructura fixa dins d'una cubeta, i se li llança ràpidament, en un dels extrems, un raig d'aigua durant deu minuts. Passats els deu minuts es pot refredar tota la barra en aigua, sense perill que es modifiquin els resultats. La microestructura obtinguda estarà condicionada pel medi on ha estat refredat el material, per la baixada de temperatura i per la velocitat de refredament. Aquests factors són els que surten representats en la figura 2.3. on es mostra diferents medis de refredament, en funció de la temperatura i la velocitat de refredament.

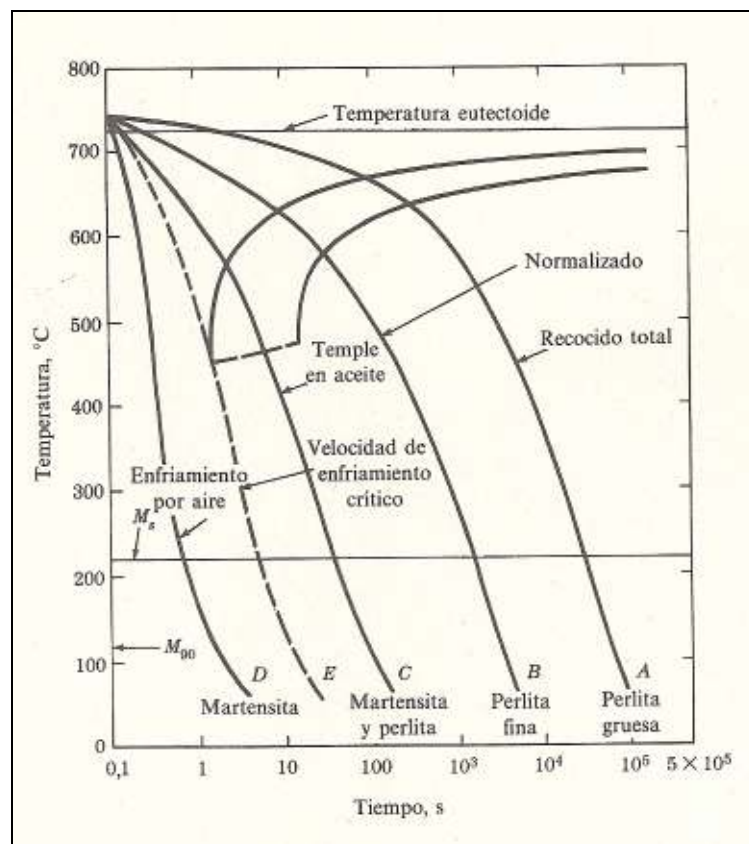


Figura 2.3. Variació en la microestructura d'un acer eutectoide no aleat per refredament continu a diferents velocitats [2].

El següent pas consisteix en realitzar assajos de duresa en els extrems oposats de la barra i, en superfícies planes. Finalment s'analitzen els resultats de duresa obtinguts.

2.3. Definició de trempabilitat

La trempabilitat d'un acer es defineix com la propietat que determina la profunditat i la distribució de la duresa induïda per refredament des de la condició austenítica [2]. Trempabilitat descriu l'aptitud d'un aliatge per endurir-se per formació de martensita com a conseqüència d'un tractament tèrmic.

La trempabilitat d'un acer depèn principalment de:

1. La composició de l'acer.
2. El gruix del gra austenític.
3. De l'estructura de l'acer abans del refredament.

Un acer aleat d'alta trempabilitat és aquell que endureix, o forma martensita, no només en la superfície sinó també en el seu interior; és a dir, la trempabilitat és una mesura de la profunditat a la qual un aliatge específic pot endurir-se.

Des d'un altre punt de vista, la trempabilitat és una mesura qualitativa de la velocitat amb què la duresa disminueix amb la distància a l'extrem trempat.

La figura 2.4. mostra la trempabilitat a través de la representació de la duresa Rockwell C en funció de la distància a l'extrem refredat per una acer 1080 eutectoide. Aquest acer mostra poca trempabilitat ja que la disminució de duresa al llarg de barra és molt petita.

La figura 2.4. relaciona les dades de trempabilitat amb el diagrama de transformació continua i, indica els canvis microestructurals que tenen lloc al llarg de la barra a quatre distàncies A, B, C i D des de l'extrem refredat.

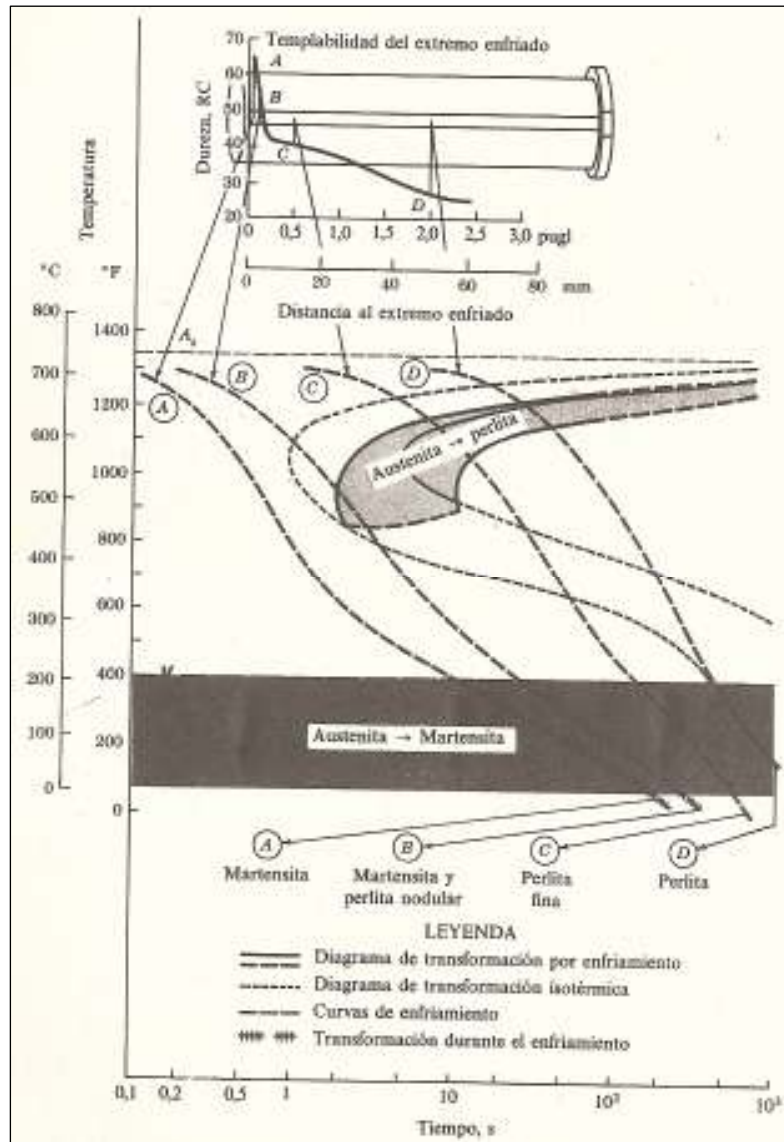


Figura 2.4. Correlació entre trempabilitat i informació del refredament continu de l'acer de composició eutectoide [2].

La trempabilitat no s'ha de confondre amb duresa, que descriu la resistència a la penetració, encara que s'utilitzen mesures de duresa per determinar l'extensió de la transformació martensítica en l'interior d'una proveta.

2.3.1. Corbes de trempabilitat

Les corbes de trempabilitat comparen les dureses de la barra en funció de la distància a l'extrem trempat.

La figura 2.5. que es mostra a continuació dibuixa corbes de trempabilitat a través de la representació de la duresa Rockwell C en funció de la distància a l'extrem refredat per alguns acers ordinaris d'aliatge 0.40 % C.

De la figura 2.5. cal destacar l'acer 4340 ja que té una excepcional alta trempabilitat. Aliatges com aquests són susceptibles al trempat a velocitats relativament més baixes, mantenint valors relativament alts de duresa.

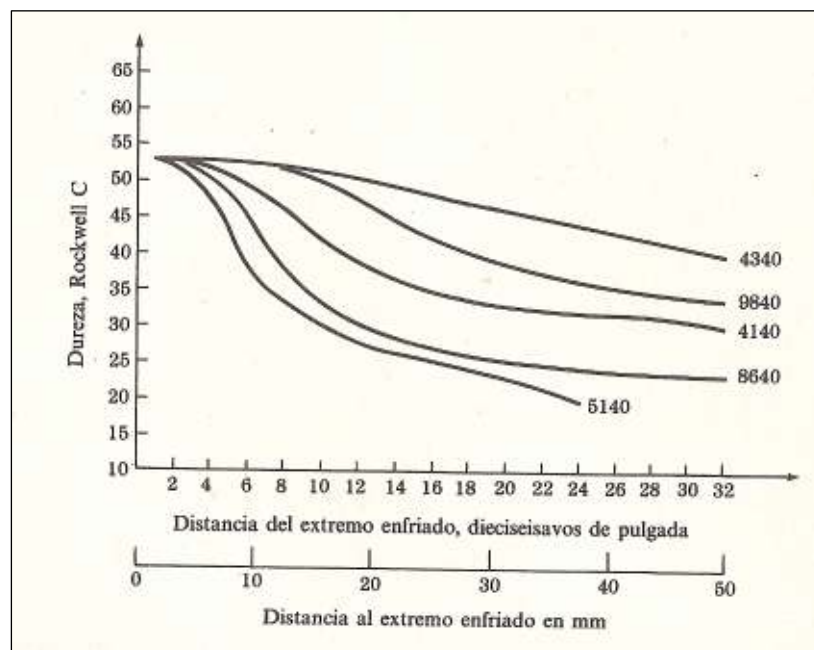


Figura 2.5. Corbes comparatives de trempabilitat per aliatges d'un acer del 0.40% de carboni [4].

Les corbes de les gràfiques de la figura 2.6. mostren la relació entre el diàmetre de la barra i la velocitat de refredament per a diferents localitzacions de les seccions transversals dins de barres d'acer usant com a agents de refredament: (i) aigua agitada, i (ii) oli agitat. Aquestes representacions poden ser utilitzades per determinar la velocitat de refredament i la distància associada des de l'extrem refredat d'una barra Jominy estàndard. Aquestes velocitats de refredament i les seves distàncies associades des de l'extrem refredat de les barres Jominy, poden ser utilitzades amb les gràfiques Jominy de duresa superficial front a distància a l'extrem refredat per a acers específics, amb l'objectiu de determinar la duresa d'un acer particular per a una localització específica en la secció transversal de la barra d'acer en qüestió.

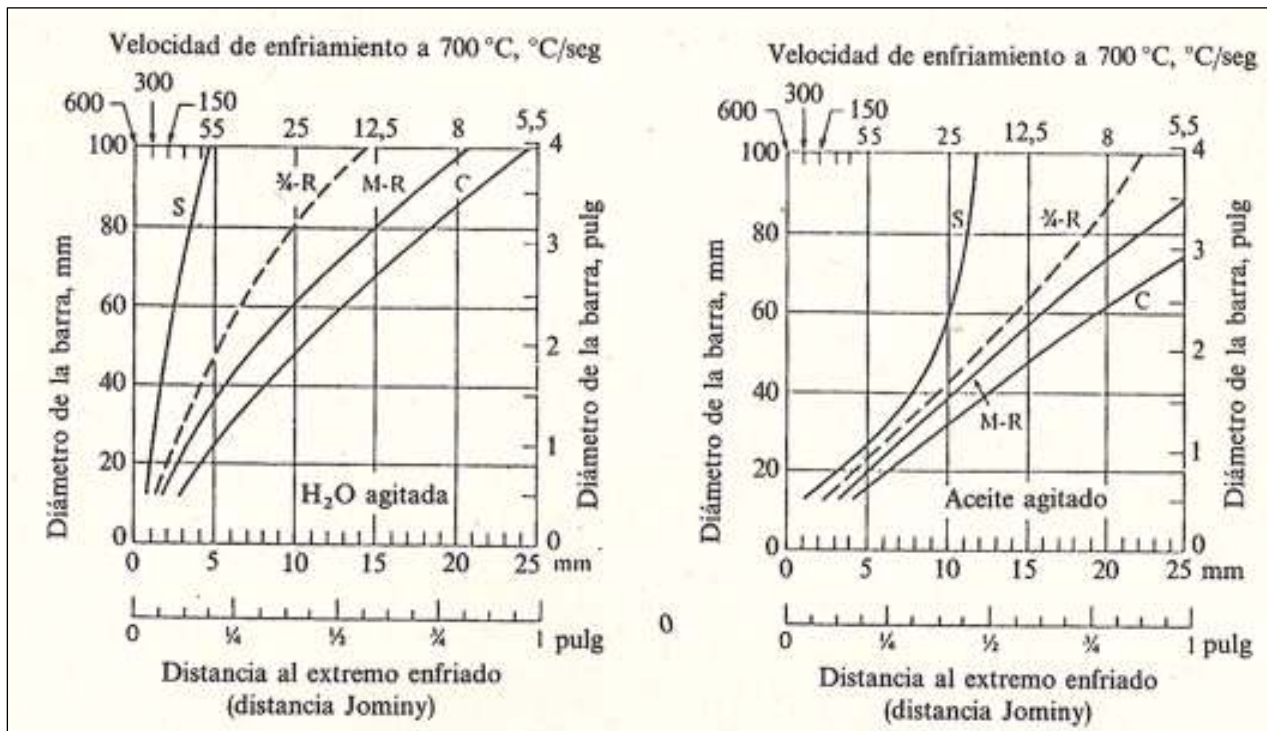


Figura 2.6. Velocitats de refredament al llarg de barres d'acer cilíndriques refredades en: (i) aigua agitada, i (ii) oli agitat. En l'abscissa superior: velocitat de refredament a 700°C; en l'abscissa inferior: posicions equivalents en l'assaig de la barra refredada en un extrem (c=centre; M-R=meitat del radi; S=superfície; línia discontinua=corba aproximada per a posicions a 3/4 del radi en la secció transversal de les barres [4].

2.3.2. Bandes de trempabilitat

Degut al gran desenvolupament adquirit per l'Assaig Jominy, la "Society of Automotive Engineers" i l'"American Iron & Steel Institute" han establert, per a la majoria dels acers aleats de construcció, corbes màximes i mínimes de trempabilitat que limiten unes zones dins les quals han d'estar situades les corbes de cada acer [2].

Als acers que compleixen una determinada banda de trempabilitat se'ls ha ampliat la designació A.I.S.I o S.A.E. normal, afegint els hi una lletra H que assenyalava que l'acer s'ha fabricat per complir una certa especificació de trempabilitat. (H. Hardenability: trempabilitat).

Aquestes corbes s'utilitzen com a especificacions de recepció de nombrosos tipus d'acer, i en molts casos s'estan substituint determinades especificacions de composició química, per les bandes de trempabilitat [2].

2.4. Corbes Jominy

L'estudi de les corbes Jominy facilita molt el coneixement de les propietats dels acers després del trempat. Les primeres conclusions teòriques que es poden treure són les següents:

1. La màxima duresa que s'aconsegueix en el trempat dels acers és funció del contingut en carboni. La màxima duresa s'obté precisament en l'extrem de la barra refredat amb l'aigua. La duresa que s'obté en l'altre extrem correspon aproximadament a l'estat normalitzat.
2. La presència d'elements d'aleació en els acers, permet obtenir després del trempat dureses elevades encara utilitzant-se baixes velocitats de refredament.
3. Petites quantitats d'elements aleats convenientment seleccionats, exerceixen una influència més efectiva en la trempabilitat, més que tenir un gran percentatge d'un sol element.

La figura 2.7. mostra la disminució de duresa amb la distància a l'extrem trempat.

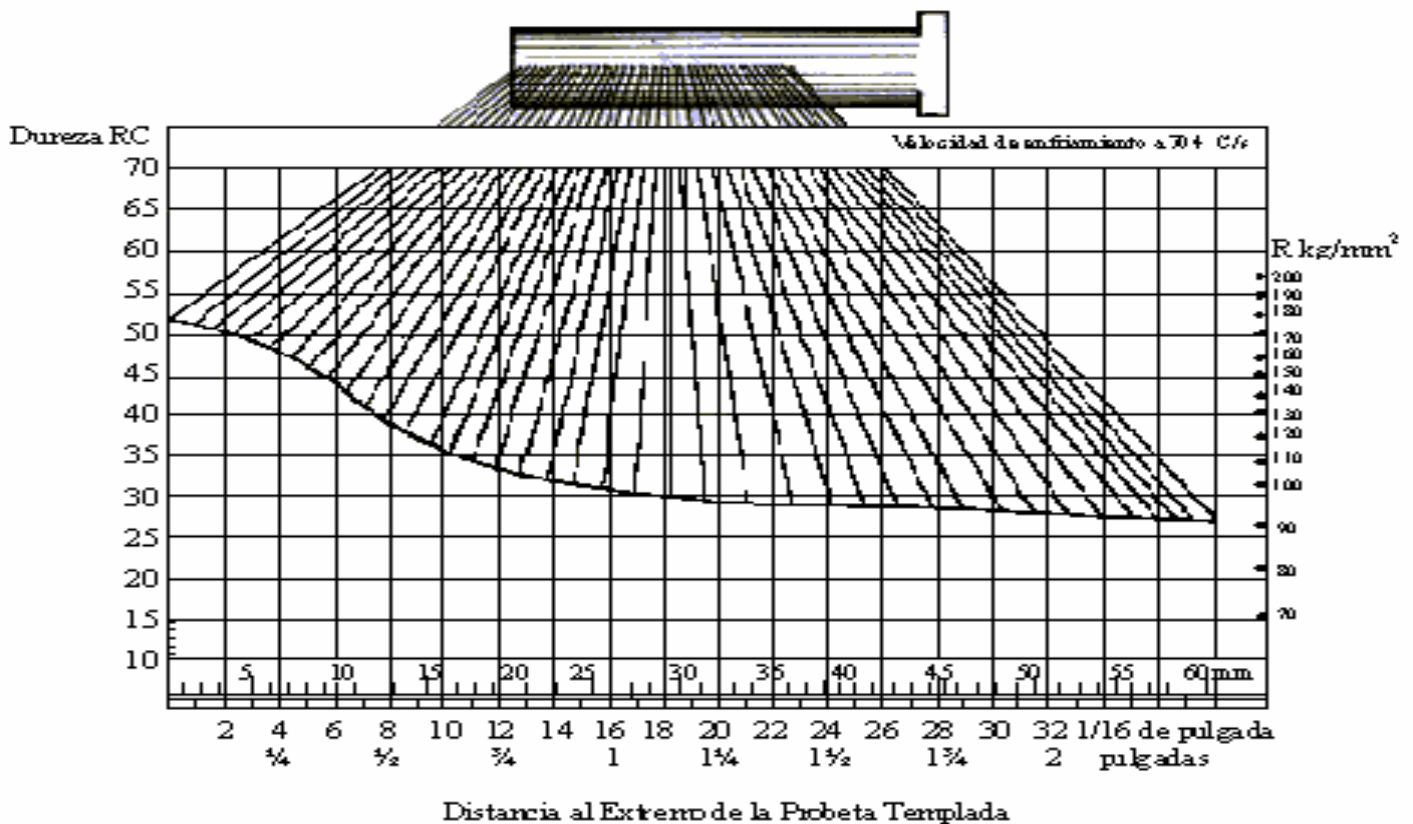


Figura 2.7. Corba de trempabilitat en l'assaig Jominy. En aquest gràfic es marquen en ordenades la dureses Rockwell-C i en abscises distàncies a la base trempada. Acer de $C=0.32\%$, $Mn=0.61\%$, $Cr=1.03\%$ i $Mo=0.23\%$ [2].

2.5. Desenvolupament de microestructures en aliatges Fe-C

Aquest apartat fa una descripció teòrica de les microestructures que poden ser produïdes en als aliatges d'acer i, les seves relacions amb el diagrama de fases Fe-C. Explica que la microestructura que es desenvolupa depèn tant del contingut en carboni com del tractament tèrmic.

• Acer eutectoide

El diagrama de la figura 2.8. que es mostra a continuació dibuixa el refredament lent d'aliatges d'acer amb un contingut de carboni del 0.77%, en el qual es mantenen contínuament condicions d'equilibri [1].

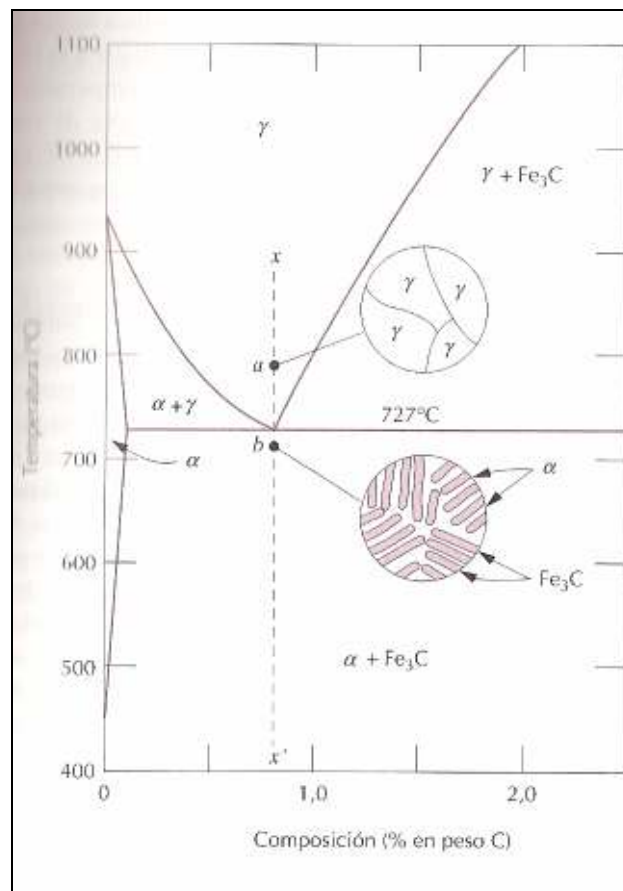


Figura 2.8. Representació esquemàtica de les microestructures d'un acer al carboni eutectoide (0.77%C) per sobre i per sota de la temperatura eutectoide. γ =austenita, α =ferrita, Fe_3C =cementita [1].

Inicialment, a la temperatura de 800°C, l'aliatge de composició 0.77%C té la microestructura austenítica. Al refredar no es produeix cap canvi fins arribar a la temperatura eutectoide (727°C). Per sota aquesta temperatura l'austenita de composició 0.77%C forma ferrita, amb baix contingut en carboni (0.022%C) i Fe₃C amb un contingut de 6.7% en carboni. Aquest canvi de fase necessita la difusió del carboni perquè les tres fases tenen diferents composicions.

La microestructura, esquematitzada en el punt *b* de la figura 2.8., és la perlita que es mostra en la figura 2.9. Les capes primes clares són de ferrita i la cementita apareix com capes primes més fosques.

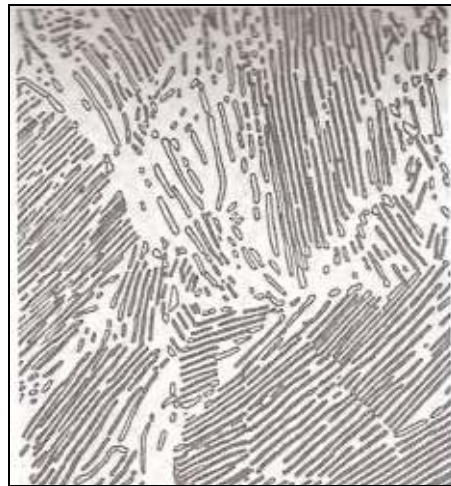


Figura 2.9. Microestructura perlítica d'un acer eutectoide [1].

· **Acers hipoeutectoides**

En un aliatge hipoeutectoide el contingut en carboni està entre 0.022 i 0.77%. El refredament des de la fase austenítica, uns 875°C, fins a arribar a una temperatura inferior a la eutectoide passa per diferents microestructures.

Cap als 875°C la microestructura està formada íntegrament de grans d'austenita (punt *a* de la figura 2.10.). Quan la temperatura baixa fins als 775°C aproximadament comencen a créixer nuclis de ferrita en els límits de gra d'austenita originals. Al disminuir una mica més la temperatura, punt *b* de la figura 2.10. i, abans d'arribar a la temperatura eutectoide, s'observa un augment dels nuclis de ferrita. La fase ferrita conté 0.022%C. La fase austenita

té la composició de l'eutectoide. La fase ferrita existent en el punt c de la figura 2.10. pràcticament no varia al passar la temperatura eutectoide. En el punt d, just per sota de la temperatura eutectoide tota la l'austenita es transforma en perlita. La ferrita de la perlita es diu ferrita eutectoide i, la ferrita formada abans de la temperatura eutectoide s'anomena ferrita proeutectoide. Les regions blanques corresponen a la ferrita proeutectoide. En la perlita, la distància entre les capes α i Fe_3C varia d'un gra a l'altre.

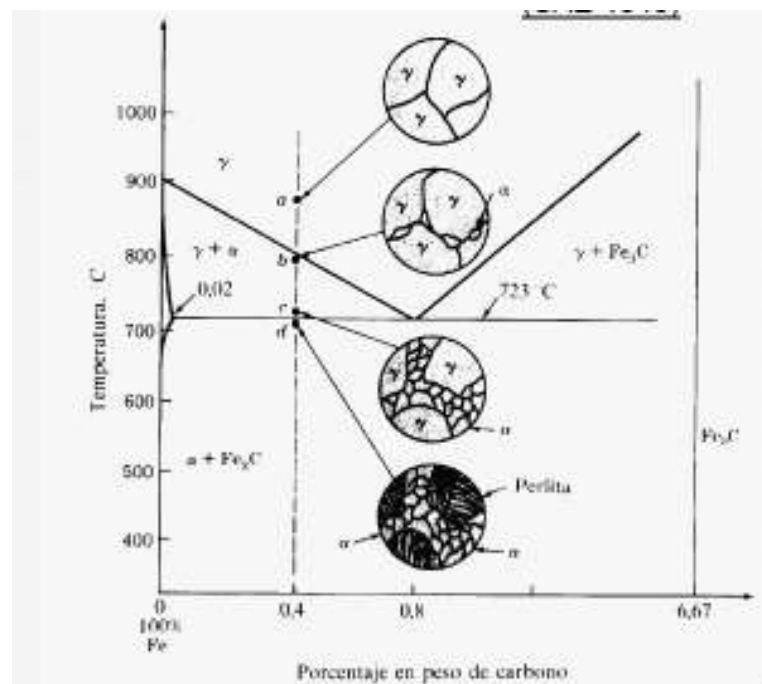


Figura 2.10. Fases presents en el refredament d'un acer hipoeutectoide. γ =austenita, α =ferrita, Fe_3C =cementita [6]

· Acers hipereutectoides

En un aliatge hipereutectoide el contingut en carboni és superior al 0,77%. Abans de començar el refredament, punt a de la figura 2.11., la microestructura està formada per grans d'austenita. Al disminuir la temperatura fins a 875°C, punt b de la figura 2.11., es comencen a formar regions bifàsiques de cementita i austenita. Les partícules de cementita es generen en els límits de

gra d'austenita originals. Aquesta cementita es diu cementita proeutectoide, perquè es forma abans de la reacció eutectoide. En el punt *c*, els grans de cementita van creixent en els límits de gra de l'austenita. La composició de l'austenita es manté constant (6.7%C) al variar la temperatura. Al baixar per sota de la temperatura eutèctica, punt *d*, tota l'austenita de composició eutèctica es transforma en perlita. D'aquesta manera la microestructura resultant consisteix en perlita i cementita proeutectoide.

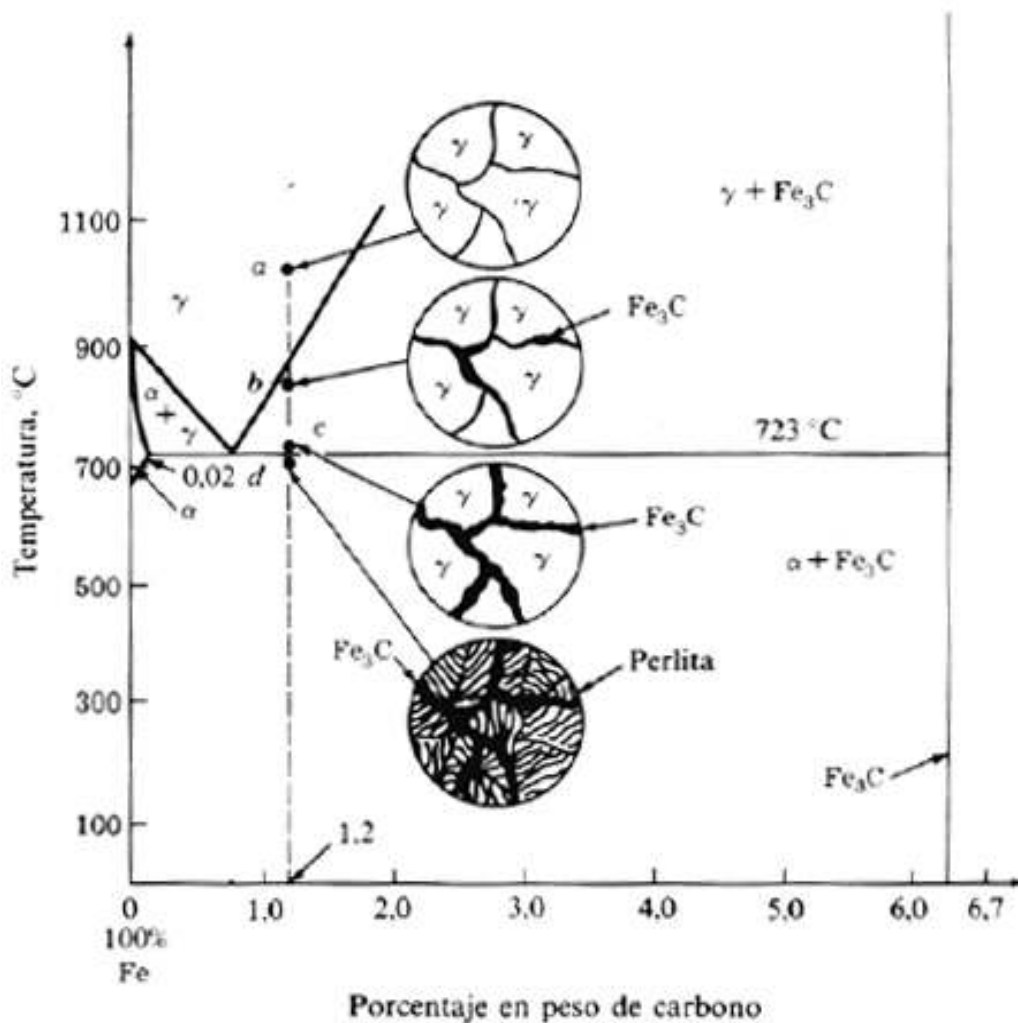


Figura 2.11. Fases presents en el refredament d'un acer hipereutectoide. γ =austenita, α =ferrita, Fe_3C =cementita [6]

3. DISSENY DEL SISTEMA

3.1. Elements i maquinària utilitzats per a realitzar l'Assaig Jominy

1. Barres de diferents tipus d'acer, és a dir, les provetes. Concretament s'han preparat 5 provetes Jominy. Per realitzar el projecte s'ha comptat amb més barres de les necessàries per possibles errors en el sistema.



Figura 4.1. 10 barres de diferents tipus d'acer.

2. Mufla, per escalfar la proveta fins a la temperatura d'austenització.
3. Pinces, guants i màscara de protecció que, s'han utilitzat en el moment que s'ha extret la barra del forn i, i s'ha introduït dins la cubeta.
4. L'element que fa la funció de cubeta ha estat una olla d'alumini de $\varnothing = 28$ cm i $h = 28$ cm. Se li han fet 2 forats en la base de \varnothing interior = 16 mm (evacuació). Un forat és per l'entrada d'aigua, i l'altre és per l'evacuació de l'aigua.



Figura 4.2. Cubeta on es farà el refredament de la barra d'acer.

L'entrada del raig d'aigua refredarà la barra per un extrem com mostra la figura 4.2. La cubeta s'anirà omplint però gràcies al forat d'evacuació de l'aigua no arribarà mai a tocar la barra.



Figura 4.3. L'entrada d'aigua dona lloc a que la barra es refredi per l'extrem.

En el sistema se li ha afegit un passamà que ha fet la funció d'aguantar la barra mentre s'estava trempant. En el passamà de la figura 4.4. que s'ha col·locat sobre la cubeta, de dimensions = 100 mm de llarg x 300 mm d'ample x 4 mm de gruix, amb un forat en el centre de $\varnothing = 26,5$ mm, s'hi han introduït les barres quan han sortit del forn.

En els extrems del passamà se li han fet 3 forats de 5mm de diàmetres en cada extrem i se li han afegit 3 cargols M-5 per tal de fixar el passamà a l'olla.



Figura 4.4. Passamà, en el centres s'hi troba situat el forat per on s'hi passaran les barres que quedaran subjectes per a ser refredades.

En la figura 4.5. el passamà s'ha col·locat sobre la cubeta i ha quedant ben fixat. També s'hi ha col·locat una barra que no ha estat prèviament escalfada que s'està mullant amb raig d'aigua per un extrem.

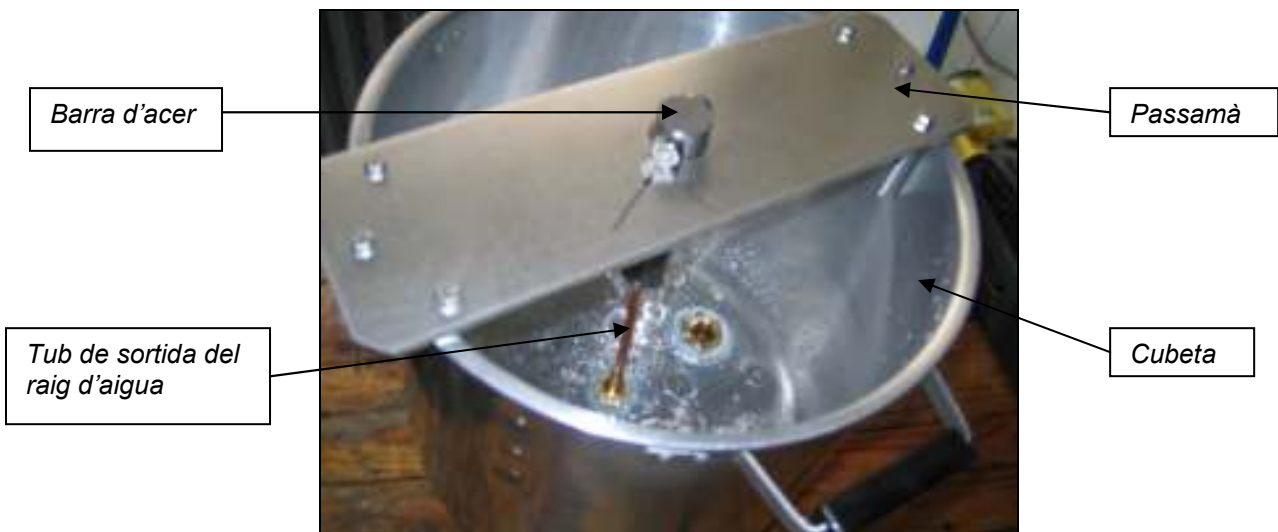


Figura 4.5. Cubeta amb passamà, barra d'acer i sortint un raig d'aigua.

5. S'ha hagut de tenir una aixeta propera per tal de refredar les barres amb un raig d'aigua.

S'han collat 2 mànegues a l'olla de $\varnothing = 15\text{mm}$, la mànega del desguàs de longitud = 1.5 metres i la mànega d'entrada de $\varnothing = 8\text{ mm.}$, com s'observa en la figura 4.5.. Una mànega s'ha connectat a l'aixeta (entrada d'aigua freda) i a la vegada a l'olla. L'altra s'ha connectat a l'olla i s'ha posat a l'aigüera per tal que l'aigua pugui evacuar.



Figura 4.6. La mànega blanca és d'entrada d'aigua. La mànega blava és la d'evacuació de l'aigua.

Per collar les mànegues a l'olla se li han col·locat uns colzes que uneixen els tubs de plàstic amb l'olla d'alumini (figura 4.7.).

Per recolzar l'olla sobre una taula s'han collat 3 suports de planxa de nylon de 1.6 mm de llarg x 90 mm d'ample i 11 mm de gruix, enganxats a la base de l'olla per dos cargols (figura 4.7.)



Figura 4.7. L'olla es recolza sobre una taula gràcies a les planxes de nylon. Els colzes connecten les mànegues amb l'olla.

6. Duròmetre Vickers.



Figura 4.8. Duròmetre Vickers, a la dreta suport per poder aguantar la barra horitzontalment.

7. Serra hidràulica per poder seccionar les barres. En l'assaig que es descriu en el projecte les barres s'han portat a tallar en un taller extern.
8. Polidora.
9. Microscopi òptic.
10. Reactius per l'atac químic .
11. Difractograma de Raigs X.

4. PROCEDIMENT EXPERIMENTAL. PRIMERS ASSAJOS

4.1. Descripció de l'assaig

S'ha fet l'assaig Jominy amb cinc barres de diferents tipus d'acer:

Les barres són de 25 mm de diàmetre i 12.5 cm de longitud, excepte la barra d'acer inoxidable que té 20 mm de diàmetre.



Figura 4.1. D'esquerra a dreta: barra AISI D2, barra AISI 1020 i la de la dreta és la barra d'acer inoxidable AISI que té $\varnothing = 20\text{cm}$.

Els diferents tipus d'acer són els següents:

Barra d'acer inoxidable A-304.

Barra d'acer per a treball en fred AISI D-2.

Barra d'acer al carboni AISI 1020.

Barra d'acer al carboni AISI 1045.

Barra d'acer de bonificació AISI 4140.

Inicialment les barres tenien 25 cm de longitud, aquestes s'han tallat per la meitat, la seva longitud final ha estat de 12.5 cm.

Una vegada preparades i tallades les barres d'acer s'ha fet l'assaig amb cada barra individualment . S'ha introduït la proveta dins la mufla a 900° C de temperatura i durant 30 minuts aproximadament. S'ha tret i ràpidament s'ha introduït en la cubeta que s'ha preparat per fer el refredament. S'ha deixat trempar amb aigua l'extrem inferior de la barra i la resta a temperatura ambient durant poc més de 10 minuts. El següent pas ha estat deixar que la barra es refredés tota en aigua.

4.1.1 Descripció dels diferents tipus d'acer

En aquest apartat es descriuen els tipus d'acer utilitzats en l'assaig. La taula de la figura 4.2. que es mostra a continuació descriu la quantitat de carboni i els elements d'aliatge de cada barra, així com les dimensions d'aquesta, el tipus d'acer i la denominació segons la norma AISI que se li dona al material.

Denominació Segons norma AISI	Tipus d'acer	Dimensions de la barra	Composició química en pes (%)
AISI 1020	acer al carboni	Ø =26 mm, l=12.5 cm	Cmax. 0,17-0,23/ Mn 0,30-0,60/ Pmax. 0,030/ S max. 0,035 (baix en carboni)
AISI 1045	acer al carboni	Ø =26 mm, l=12.5 cm	Cmax. 0,44/ Si 0,25/ Mn 0,70
AISI 4140	acer de bonificació	Ø =26 mm, l=12.5 cm	C 0,4 / Si 0,3 / Mn 0,70 / Cr 1,1 / Mo 0,20
AISI D2	acer per treball en fred	Ø =26 mm, l=12.5 cm	C 1,45-1,6 / Si 0,10-0,6 / Mn 0,20-0,60 / <P<0,03 / <S<0,03 / Cr 11-13 / Mo 0,7-0,1 / V0,7-0,1
AISI 304	acer inoxidable	Ø =20 mm, l=12.5 cm	C< 0.07 / Si<1 / Mn<2 / Cr 17-20 / Ni max 11.5

Figura 4.2. Taula que descriu els diferents tipus d'acer utilitzats en l'assaig.

A continuació es fa una descripció més detallada dels acers utilitzats en el projecte. Es descriuen algunes de les seves propietats mecàniques i, algunes de les seves principals aplicacions.

· Acer al carboni AISI 1020

Aquest tipus d'acer conté menys del 0.25% C, no respon al tractament tèrmic per formar martensita i és endurable per acritud. La microestructura consisteix en ferrita i perlita. Com a conseqüència aquests acers són relativament tous i poc resistents, però amb extraordinària ductilitat i tenacitat; a més són de fàcil mecanitzat, soldables i econòmics. S'utilitzen per a fabricar carroceries d'automòbils, bigues (en forma de L, canals i angles) i làmines per a construir tuberies, edificis, ponts i llaunes estanyades.

Resistència a la tracció = 380 MPa [5]

Límit elàstic = 205 MPa

Ductilitat % elongació = 25

· Acer al carboni AISI 1045

Acer fi al carboni d'alta qualitat. Utilitzat en la construcció de maquinària en general, per parts i peces de mitjana exigència, com eixos, arbres, peces premsades o estampades, xavetes i peces exposades al desgast per fricció.

Resistència a la tracció = 585 MPa [5]

Límit elàstic = 190 -210 GPa

Ductilitat % elongació = 12

· Acer inoxidable austenític A-304

Els acers inoxidables resisteixen la corrosió en molts ambients, especialment en l'atmosfera. El crom és el principal element d'aliatge, en una concentració mínima de l'11%. La resistència a la corrosió millora amb adicions de níquel i molibdè. Les adicions dels elements d'aliatge en concentracions significatives produeixen alteracions molt importants en els diagrames de fases ferro-carboni de ferro. En els acers inoxidables austenítics, l'austenita (fase Y) es manté estable a Ta. Ambient.

Resistència a la tracció = 586 MPa [5]

Límit elàstic = 240 MPa

Ductilitat % elongació = 55

Aplicacions més corrents: indústria alimentària i estructures soldades.

- Acer de bonificació AISI 4140

Acer especial per a bonificat amb aliatge al crom-molibdè. Molt resistent a la torsió, bona resistència al desgast i l'impacte, utilizable en temperatures fins a 450°C sense perdre la seva bonificació equivalent al AISI 4142 y ASTM a-193 Grau B-7. És aplicable en la construcció de vehicles, engranatges i motors, parts i recanvis de maquinàries tals com arbres de transmissió, braços d'eixos, bombes cardanes, cigüenyals, pines, èmbols, motlles d'injecció de plàstic com el VCN 150 on les exigències són menys estrictes. [5]

Resistència a la tracció = 655 MPa [9]

Límit elàstic = 417 MPa

Ductilitat % elongació = 25.7

Aquest és un dels acers amb alta trempabilitat a l'oli, el seu alt contingut en C una bona duresa i el seu contingut en Mo la distribueix uniformament i li dona resistència.

- Acer per a treball en fred AISI D-2

Acer que combina molt bé la resistència al desgast i la tenacitat. Té gran trempabilitat. Es pot nitrurar per incrementar les seves propietats. És entregat amb una duresa de 250 HB. Utilitzat en la fabricació d'eines destinades a modificar la forma i dimensions dels materials per tall o pressió.

D'aquest acer només s'ha trobat el E en la literatura.

Mòdul elàstic = 190-210 GPa [5]

4.2. Què cal esperar de l'assaig

L'assaig Jominy consisteix en escalfar una barra d'acer fins a temperatura austenítica i ràpidament refredar amb un raig d'aigua un dels extrems de la barra. Aquest assaig serveix per conèixer la trempabilitat del material.

Quan la barra es trempa en aigua es crea un gradient de velocitats de refredament entre l'extrem refredat en aigua i el refredat a temperatura ambient. Aquestes velocitats de refredament tenen el seu màxim valor en l'extrem de la barra que es refreda en aigua i, i les velocitats van disminuint fins que arriba al seu mínim valor que coincideix amb l'extrem de la barra refredat a temperatura ambient.

En els acers, les dureses que s'obtenen després del trempat augmenten a l'augmentar el contingut en carboni de l'aliatge. D'altra banda a partir d'un cert percentatge d'elements d'aliatge, la duresa ja no es modifica pràcticament quan s'augmenta el percentatge d'aquests elements.

Un acer amb alta trempabilitat manté valors elevats de duresa al llarg de la barra; un de baixa trempabilitat no.

La figura 4.3. mostra la descomposició isotèrmica de l'austenita. Les transformacions isotèrmiques d'acers eutectoides a les temperatures de entre 723°C i al voltant de 550°C produeixen microestructures perlítiques. A mesura que la temperatura de la transformació disminueix en aquest interval, la perlita adopta morfologies diferents que es coneixen pels noms de *perlita gruixuda*, *perlita fina (sorbida)* i *trostita*.

Si l'acer eutectoide es refreda en el rang de 550°C a 250°C i es transforma de forma isotèrmica, es produeix una estructura intermitja entre *perlita* i *martensita* dita *bainita*, com es veu en la figura 4.3.

I si la velocitat és tant alta que la corba de refredament no talla en cap punt a la corba del diagrama TTT (transformació temps temperatura) s'obté una estructura martensítica, corresponen a un acer trempat. Es denomina velocitat crítica de trempat a la mínima velocitat de refredament requerida per evitar la transformació de l'austenita en altres constituents abans d'arribar a la temperatura per obtenir martensita [10].

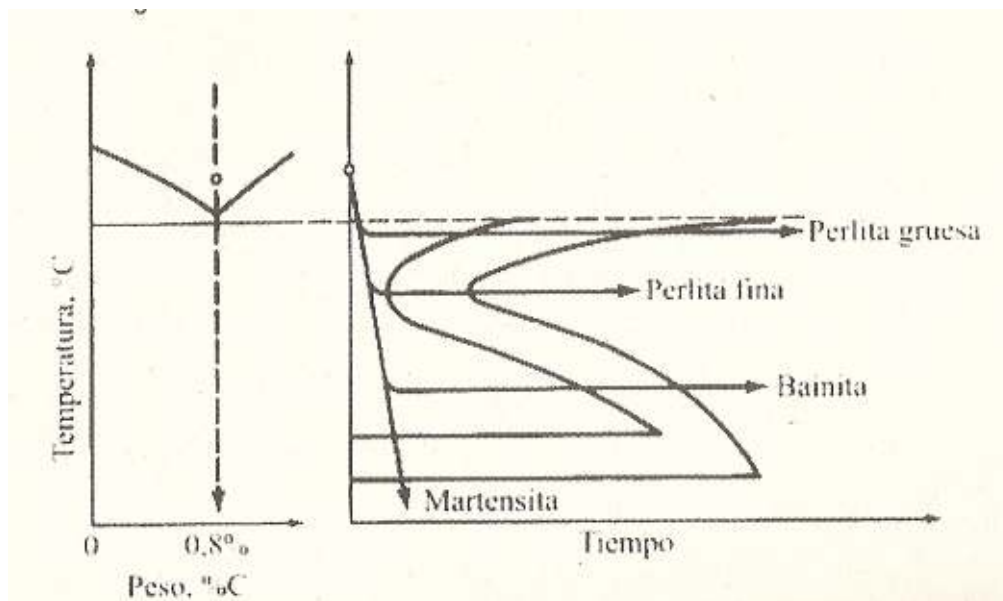


Figura 4.3. Diagrama isotèrmic per a un acer eutectoide (gràfic esquerre), en relació al diagrama d'equilibri Fe-C (gràfic dreta) [10].

4.2.1. La transformació martensítica

A l'extrem de la barra refredat directament amb raig d'aigua, es produeix una transformació de la microestructura que passa d'austenita a martensita. El tipus de martensita depèn del contingut en carboni de l'acer.

La martensita es produeix sense difusió, com que la reacció passa ràpidament, i a tant baixa temperatura no hi ha temps de que la difusió actui.

No hi ha canvis de composició en el pas d'austenita a martensita, no s'origina una migració dels àtoms de carboni.

L'estructura cristal·lina canvia de FCC (cel·la cúbica centrada en les cares), austenita, a BCT (body tetragonal center, tetragonal centrada en el cos), martensita. La tetragonalitat es deu al carboni intersticial, i el grau de tetragonalitat depèn del percentatge de carboni de l'acer, com es veu en la figura 4.4. i 4.5.. El canvi volumètric producte d'aquesta transformació, FCC a BCT, pot produir errors en la peça final.

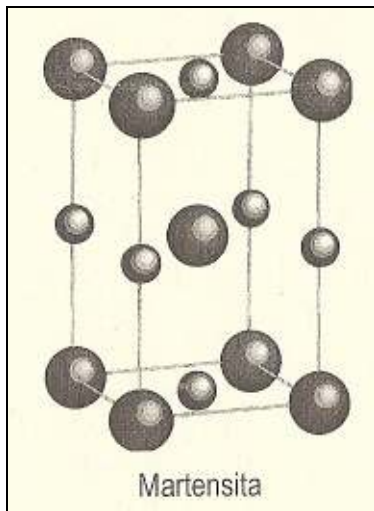


Figura 4.4. Des del punt de vista cristal·logràfic, la martensita és una estructura tetragonal centrada en el cos.

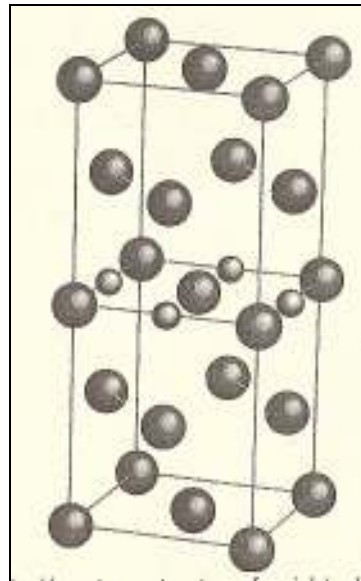


Figura 4.5. Relació entre l'estructura que hi ha entre la martensita bcc (tetragonal centrada en el cos) i l'austenita fcc.

La figura 4.6. mostra com un augment en el percentatge de C baixa la temperatura de formació de la martensita M_s .

Segons la figura 4.6. la martensita comença a formar-se a la temperatura característica de cada acer, M_s . EL percentatge de martensita format dependrà de quant hagi descendit la temperatura per sota de M_s , fins arribar al 100% de transformació a la temperatura M_f . Mentre major sigui l'avanç entre M_s i M_f , major serà el grau de transformació de l'austenita a martensita

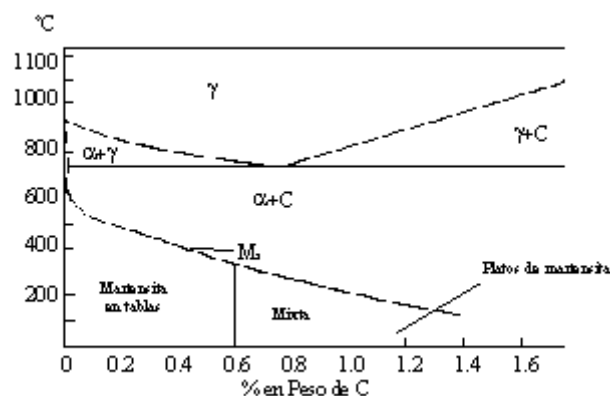


Figura 4.6. El gràfic relaciona la temperatura (°C) amb el percentatge de pes de carboni de l'aliatge.

A vegades és més convenient relacionar la duresa amb la velocitat de refredament que amb la distància a l'extrem trempat de la proveta. La relació entre distància i velocitat de refredament és la mateixa per l'acer al carboni que per l'acer aleat, perquè la velocitat de transferència tèrmica és quasi independent de la composició.

El lloc de la barra o de la peça d'on s'obtenen les provetes per l'assaig Jominy, té bastanta importància, ja que les segregacions que existeixen en els acers exerceixen una influència bastant sensible en els resultats.

Per aquest motiu es troben diferències de trempabilitat en una mateixa barra gruixuda. Hi ha diferències entre les zones superficials i el centre, sent algunes vegades lleugerament superior la trempabilitat i la duresa màxima en la perifèria que en el centre, presentant-se en altres ocasions el cas contrari.

4.2.2. Duresa i resistència de martensites Fe-C

La duresa i resistència de martensites estan directament relacionades amb el seu contingut de carboni, i ambdues propietats augmenten a mesura que el contingut en carboni augmenta, com mostra la figura següent:

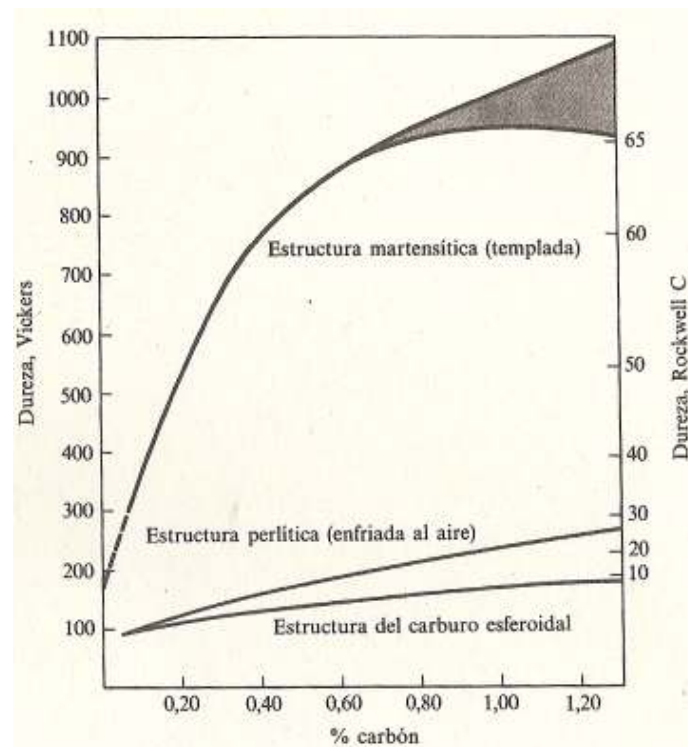


Figura 4.7. Duresa aproximada dels acers ordinaris completament consolidats en funció del contingut en carboni. La zona ombrejada indica la possible pèrdua de duresa deguda a la formació d'austenita retinguda, que és més tova que la martensita.

4.3. Primers assajos. Optimització del sistema

Els assajos s'han realitzat en el laboratori de l'E.T.S.E.. Amb el elements que s'han muntat (la cubeta i les barres) s'han començat a fer assajos i observar els primers resultats, amb la finalitat de fer alguna optimització al sistema si fos necessari.

La barra que s'ha utilitzat per a realitzar el primer assaig ha estat la d'acer al carboni AISI 1045, que té entre un 0.4 i un 0.5 % C. Teòricament aquest acer,

degut a la seu contingut en carboni, assegura la formació de martensita en el refredament.

Per començar s'ha escalfat una barra a la mufla fins a temperatura austenítica. El refredament però, no serà només en un extrem de la barra, sinó que s'ha trempat tota la barra en aigua i s'ha mesurat la duresa obtinguda.

Abans d'introduir la barra dins la mufla se n'ha observat la seva duresa. S'ha obtingut una duresa de 121.4 Hv aplicant-hi una força de 10kg.

Doncs s'ha començat a escalfar la mufla fins 900°C durant 40 minuts. S'ha introduït la barra en posició vertical i s'hi ha deixat uns 15 minuts. Passat el temps s'extreu la barra i, ràpidament s'ha trempat tota la barra sencera en aigua. Després s'ha netejat la barra per treure l'escòria. S'ha observat una duresa de 340.7 Hv en el centre de la barra i 308.9 Hv a un extrem. En aquest cas, com que s'ha trempat tota la barra en aigua les dureses han de ser teòricament homogènies al llarg de tota la barra.

S'ha tornat a fer l'assaig Jominy però amb una nova barra, AISI D2 que conté entre 1.60-1.80 % de C. Aquesta vegada s'ha programat la mufla per tal que arribi a 1.100 °C, tot i que la barra s'hi ha col·locat des de 30 °C. Posteriorment s'ha trempat altra vegada tota la barra en aigua. Aquesta vegada s'ha netejat amb àcid nítric 50 % i 50 % d'aigua (la barra ha quedat molt neta). Es fa l'assaig de duresa amb 20 kg de força, dona 340 vickers.

S'esperava haver obtingut una duresa més elevada. S'ha pensat que les mesures de duresa no són del tot exactes degut a la superfície corba de la barra. S'ha polit la superfície de la barra, per obtenir una superfície plana i així, prendre mesures de duresa més exactes.

La mateixa barra s'ha tornat a escalfar dins la mufla fins a 900°C durant 15 minuts. Ara sí, s'ha extret ràpidament de la mufla i s'ha introduït pel forat del passamà que permetrà que la barra s'aguanti. L'extrem inferior de la barra ha estat mullat amb un raig d'aigua, i la resta de la barra s'ha refredat a temperatura ambient.

La figura 4.8. mostra com la barra acabada de sortir de la mufla s'ha refredat amb raig d'aigua per l'extrem inferior, i la resta de la barra ho fa a temperatura ambient. En l'extrem inferior la velocitat de refredament és la màxima possible, i

al llarg de tota la barra existeix un gradient de velocitats de refredament que disminueix fins arribar a l'extrem superior de la barra.



Figura 4.8. Assaig Jominy aplicat a la proveta AISI D2.

L'extrem de la barra trempat dona una duresa de 153 Hv.

Ja a que les barres no es poden tallar amb una serra manual o una serra de diamant degut a la seva duresa, s'han portat a tallar a un taller on les han seccionat amb una serra refrigerada amb taladrina.

Com a última optimització s'ha modificat el tub d'entrada d'aigua, que era de coure per un tub de plàstic que ens ha permès un major caudal d'entrada d'aigua, i per tant, un trempat en l'extrem de la barra més òptim, i com a conseqüència una duresa més elevada.

Amb aquests nous paràmetres s'han tornat a escalfar (per separat) les dues barres que s'han utilitzat fins ara a 1.100 °C introduïdes des de 30 °C de temperatura, i una vegada s'ha arribat a la temperatura desitjada s'ha mantingut encara la barra dins la mufla durant 20 minuts més, per tal d'aconseguir una bona austenització de la microestructura del material. El refredament s'ha realitzat dins l'olla, amb el nou augment de caudal. Un extrem de la barra s'ha refredat amb aigua i l'altre extrem a temperatura ambient.

Passats poc més de 10 minuts s'ha deixat refredar tota la barra a temperatura ambient.

Les dureses obtingut dureses de l'ordre de 350 Hv.

4.4. Assaig definitiu amb noves barres d'acer

Una vegada s'ha fet l'optimització de l'assaig, s'han solucionat petits problemes i s'han millorat les condicions s'ha començat de nou tot el procés. Les provetes que s'han assajat són les següents : AISI 1045, AISI 4140, AISI 1020, AISI 304, AISI D2.

Aquesta vegada s'ha realitzat l'assaig amb els paràmetres òptims de temperatura d'austenització de la barra, temps d'escalfament, caudal de l'aigua, polit de la barra,...

La primera barra utilitzada ha estat la barra d'acer AISI 1045.

S'ha introduït la barra dins la mufla quan aquesta encara es trobava a temperatura de 30°C. S'ha programat la temperatura de la mufla fins a 850°C.



Figura 4.9. Barra d'acer AISI 1045 dins la mufla, aquesta a baixa temperatura (30°C).

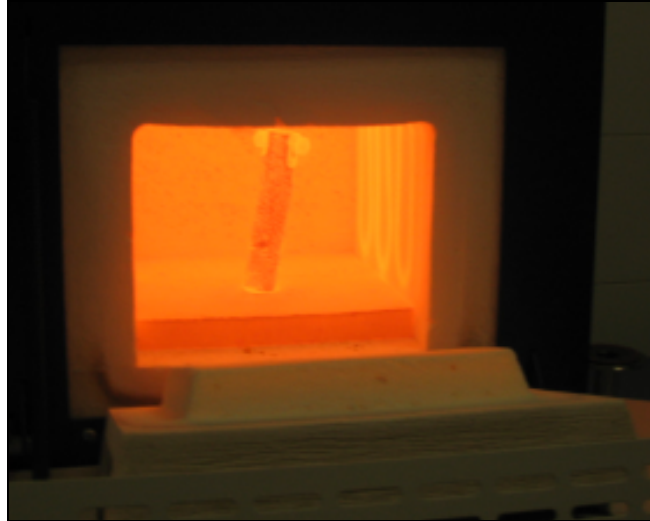


Figura 4.10. Barra d'acer AISI 1045 dins la mufla, aquesta es troba a 850 °C de temperatura.

Abans de treure la barra de la mufla, s'ha ajustat quin serà el caudal d'entrada d'aigua a l'olla.

Una vegada la temperatura de la mufla ha arribat a 850°C s'ha deixat que s'estabilitzés uns 5 minuts, després s'ha tret ràpidament la barra, utilitzant les eines adequades: mascareta, guants i pinces (Figura 4.11.) i s'ha trempat dins la cubeta.



Figura 4.11. Utensilis de protecció, mascareta, guants i pinces.

Després de que s'hagi refredat un extrem de la barra amb aigua, i que la resta de la barra ho hagi fet temperatura ambient durant uns 15 minuts, s'ha acabat de refredar tota la barra sota l'aixeta.

S'ha netejat la barra amb un fregall i aigua, posteriorment s'ha polit la superfície corba de la barra per tal d'obtenir una zona plana i així, poder prendre millors mesures de duresa.

Seguidament s'ha fet l'assaig de microduresa cada $\frac{1}{2}$ cm de la barra, al llarg de 9 cm de la barra.

A partir de les dureses obtingudes s'han analitzat i comparat els resultats per tal d'escollir les barres més representatives. S'han tallat les mostres, per a poder observar-les posteriorment al microscopi òptic, i conèixer quina microestructura tenen. Les seccions que s'han fet a les provetes són de 0.5 cm de gruix , aquestes s'han detallat en l'apartat 5.1.1..

Les barres que s'han escollit per a observar la seva microestructura han estat: la d'acer inoxidable AISI 304 , la barra d'acer especial AISI 4140, i la barra d'acer al carboni AISI 1045.

Posteriorment al tall s'han polit les mostres seccionades. Primer amb paper de polir de 800, després de 1200, després de 4200, seguit de 3 micres amb pasta de diamant i, finalment 1 micra.

Després d'haver-les polit s'han embotit, i se'ls hi fa un atac químic. L'atac químic s'ha explicat en l'apartat 5.2.1. .

S'han observat les mostres al microscopi òptic per tal de poder conèixer la microestructura.

S'ha tornat a mesurar la duresa de les mostres seccionades i embotides, ja que ara la superfície és perfectament plana. Els resultats es troben en l'apartat 5.1.2..

Posteriorment s'han realitzen proves de raigs X per tal de detectar les fases que hi ha presents en el material.

5. RESULTATS OBTINGUTS

5.1. Mesures de duresa

5.1.1. Mesures de duresa en la barra cilíndrica

A diferència de l'Assaig Jominy tradicional que mesura les duresa segons l'assaig Rockwell, en el present projecte la duresa s'ha mesurat amb el duròmetre Vickers.

S'han realitzat 18 mesures de microduresa a cada proveta Jominy, començant en l'extrem de la barra que ha estat refredat amb aigua. L'espai entre mesures ha estat de 0.5 cm. S'hi ha aplicat una força de 10 kg.

Per tal de subjectar la barra cilíndrica s'ha adaptat un suport al costat del duròmetre que sosté la barra i deixa que aquesta es mantingui horitzontal. Així, les mostres de duresa han estat el màxim de reals possibles.



Figura 5.1. Al costat dret del duròmetre s'observa el suport que ens ha permès mantenir la barra en posició horitzontal.



Els resultats obtinguts en les mesures de duresa es troben expressats en la gràfica 5.2. de Duresa en funció de la Distància.

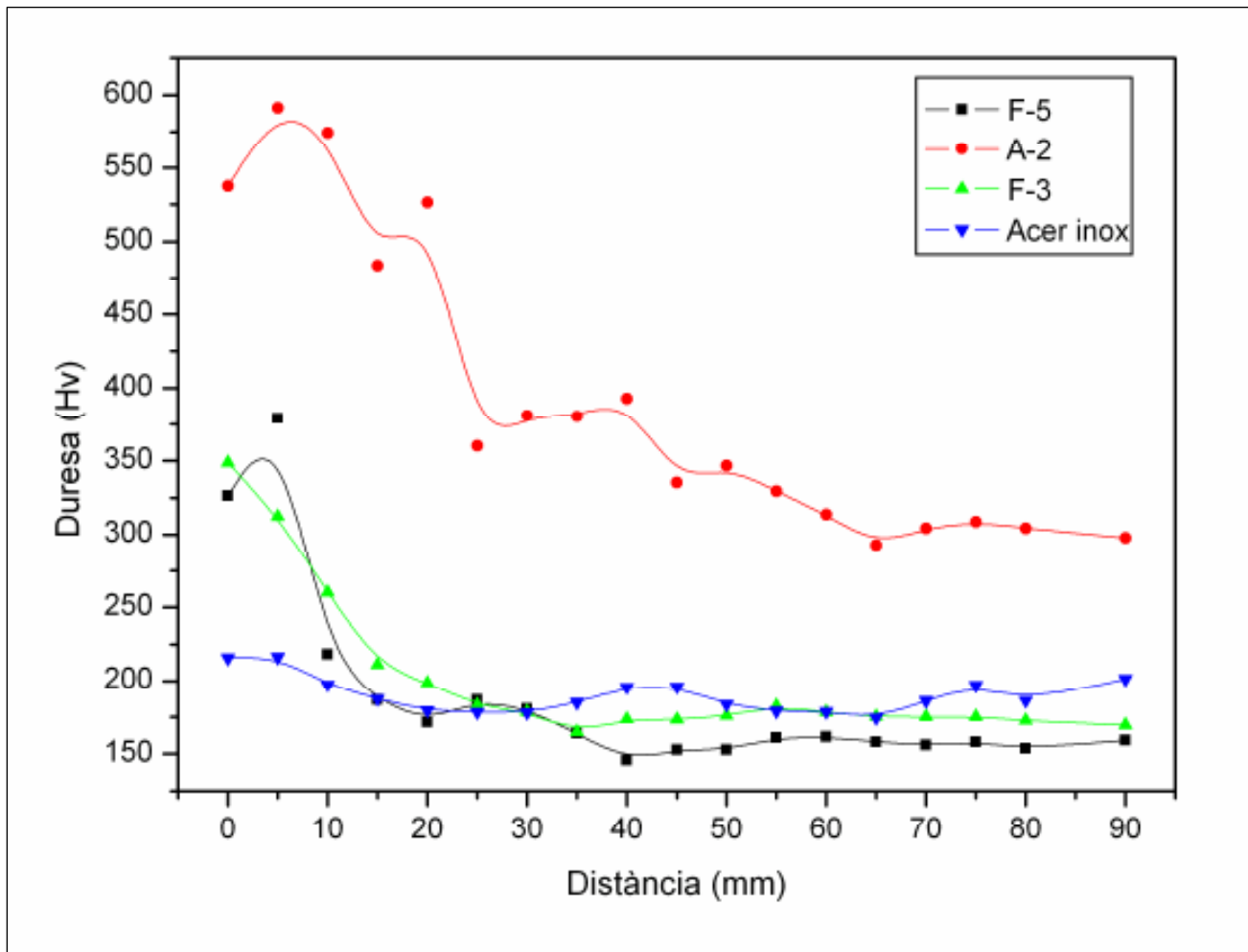


Figura 5.2. Mesures de duresa obtingudes en l'Assaig Jominy de quatre barres de diferents acers.

Abans d'avaluar els resultats obtinguts cal afegir que, tot i haver polit la superfície de la barra, els resultats de duresa obtinguts són una mica diferents que els resultats obtinguts en les mostres embotides (resultats en l'apartat 5.1.2.), ja aquestes mostres si que tenen una superfície perfectament plana.

A partir de la gràfica 5.2. s'observa que la barra d'acer A-2 (AISI 4140) és la que presenta una major variació de duresa. En els primers 2 cm de la barra és on s'observen els majors valors de duresa (en el punt de 0,5 cm és on es troba el punt de duresa més elevat de 591,2 vickers). Per tan podem dir que aquesta

barra és la que presenta una major trempabilitat. Aquest fet s'explica també, degut al seu contingut en carboni que està entre un 0.37 i un 0.43 %.

Per altra banda , segons aquest assaig de duresa, la barra que presenta una menor trempabilitat és la barra d'acer inoxidable. El seu contingut en carboni està comprès entre un 1,45 i un 1,6 %. Els valors de duresa d'aquesta barra són molt similars en tota la longitud de la barra, i oscil·len al voltant de 180 i 200 Hv. En l'assaig de duresa de les mostres embotides s'observa que l'acer inoxidable té valors de duresa molt similars al llarg de tota la barra, però aquests són molt més elevats que els que es mostren en la figura 5.2., per tant més endavant s'observa que la barra d'acer inoxidable té alta trempabilitat.

En funció dels resultats de duresa obtinguts s'han tallat diferents parts de les barres, les més representatives, per a ser observades al microscopi òptic i fer difracció de Raigs X. El tall de les mostres és de 0.5 cm de gruix.

·De la barra d'acer AISI 1045 se n'han tallat tres mostres:

Mostra 1 : extrem de la barra refredat amb aigua. Entre 0 i 0.5 cm.

Mostra 2 : entre 0.5 i 1 cm.

Mostra 3 : final de la barra, entre 9 i 9.5 cm.

·De la barra d'acer AISI 304 se n'han tallat dues mostres:

Mostra 1 : extrem de la barra refredat amb aigua. Entre 0 i 0.5 cm.

Mostra 2 : final de la barra, entre 9 i 9.5 cm.

· De la barra d'acer AISI 4140 se n'han tallat quatre mostres:

Mostra 1 : extrem de la barra refredat amb aigua. Entre 0 i 0.5 cm.

Mostra 2 : entre 2.5 i 3 cm.

Mostra 3 : entre 4.5 i 5 cm.

Mostra 4 : final de la barra, entre 9 i 9.5 cm.

5.1.2. Mesures de duresa en mostres embotides

Les mostres embotides tenen la superfície plana, els resultats de les mesures de duresa vickers són molt més fiables. S'han pres mesures en el centre de la mostra i en les vores i s'ha tret la mitjana.

Els resultats obtinguts són els següents:

Duresa Vickers AISI 1045		
Secció mostra	centre	vores
1	296.06	294.9
2	154.3	161.43
3	207.5	267.2

Duresa Vickers AISI 304		
Secció mostra	centre	vores
1	591.5	606.05
2	556.9	565.1

Duresa Vickers AISI 4140		
Secció mostra	centre	vores
1	359.6	406.3
2	323.45	343.5
3	190.25	171.95
4	186.55	156.8

5.2. Microscopi òptic

Amb el microscopi òptic s'ha observat la microestructura del material. Per revelar els detalls més importants de la microestructura és necessari preparar cuidadosament les superfícies. Aquestes s'han de devastar i polir fins que quedi com un mirall. Això s'aconsegueix utilitzant papers abrasius i pols cada vegada més fina. Es revela la microestructura tractant la superfície amb un reactiu químic apropiat, el procediment es denomina atac.

5.2.1. Atac químic

Després de prendre les mesures de duresa a les mostres embotides se'ls realitza l'atac químic per tal de poder observar la microestructura del material al microscopi òptic.

Per a les mostres de l'acer al carboni, l'acer de bonificació i l'acer per a treball en fred s'ha utilitzat el reactiu de Nital, mentre que per les mostres d'acer inoxidable s'usa un altre tipus de reactiu, que es descriu a continuació.

Reactiu per atacar químicament l'acer inoxidable:

Els 50 ml de la composició es divideixen en tres elements:

3 parts del reactiu de HCl

2 parts de glycerol

1 part de HNO₃

S'introdueix la mostra en el reactiu durant 90 segons.

Reactiu Nital:

48 ml d'etanol

2 ml d'àcid nítric

Temps de reacció 10 segons. S'ha d'agitar la mostra quan es troba en contacte amb el reactiu.

5.2.2. Fotografies obtingudes en el microscopi òptic

A continuació es mostren les microestructures dels acers seleccionats.

· AISI 1045

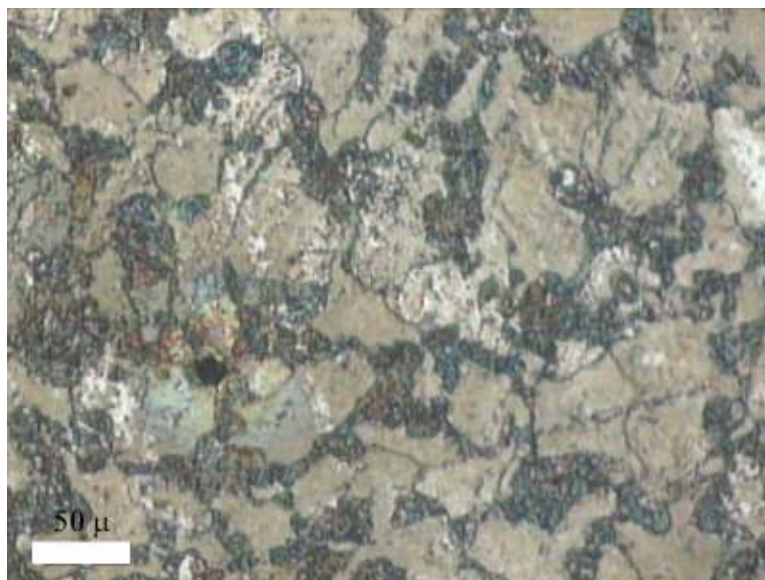
La fotografia 5.3. correspon a la proveta d'acer al carboni AISI 1045. Aquesta fotografia correspon a la mostra de l'extrem de la barra trempat amb aigua.

L'acer AISI 1045 és un acer hipoeutectoide. La quantitat de carboni que conté és superior al 0.022% i inferior al 0.7%; concretament té entre un 0.40 i 0.50 % en C.

En la figura 5.3. les regions més clares corresponen a la ferrita proeutectoide. Aquestes regions s'han anat formant en els límits de gra de l'austenita durant el refredament.

Les regions més fosques són grans de perlita. La perlita està formada per capes de ferrita i cementita. La ferrita de la perlita es diu ferrita eutectoide.

La grandària de gra és aproximadament de 20 μ .



*Figura 5.3. Microestructura de l'acer AISI 1045
Extrem de la barra trempat (x50).*

La figura 5.4. correspon a la part final de la barra, que ha refredat a temperatura ambient.

Igual que en la figura anterior les regions més clares corresponen a la ferrita proeutectoide i, les regions més fosques corresponen a la perlita.

Aquí els grans són de majors dimensions ja que el refredament ha estat més lent i han tingut més temps per créixer. La grandària de gra és aproximadament de 35 μ .

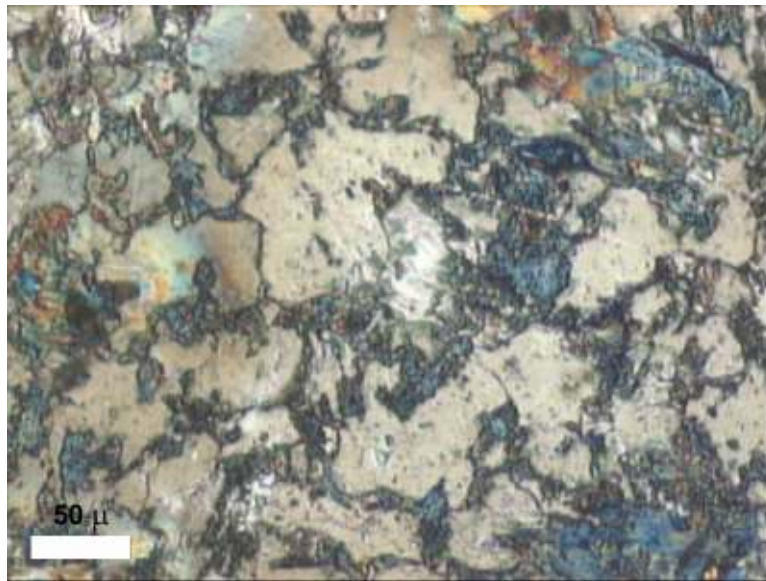


Figura 5.4. Microestructura de l'acer 1045. Extrem de la barra refredat a temperatura ambient (x50).

- AISI 304

Es tracta d'un acer hipoeutectoide, la seva composició en carboni es troba entre un 0.022 i un 0.77 %; concretament té menys de 0.07% en C.

En la fotografia de la figura 5.5. s'observa l'austenita retinguda, representada en els diagrames obtinguts dels Raigs X. L'austenita retinguda s'ha format en el trempat amb aigua.

En la fotografia s'observen clarament les macles, que són les regions de material entre els límits de macla. Els límits de macla són un tipus especial de límit de gra a través del qual existeix una simetria de xarxa especular; els

àtoms d'un costat del límit són com imatges especulars dels àtoms de l'altre costat. [1]

La fotografia 5.5. correspon a l'extrem de la barra trempat.



Figura 5.5. Microestructura acer AISI 304 (x20).

Les macles corresponents a les fotografies tenen traçades relativament rectes i paral·leles, i un contrast visual diferent de les regions no maclades.

Les fotografies de la figura 5.6. corresponen a l'extrem oposat al trempat, és a dir, al refredament a temperatura ambient de la barra.

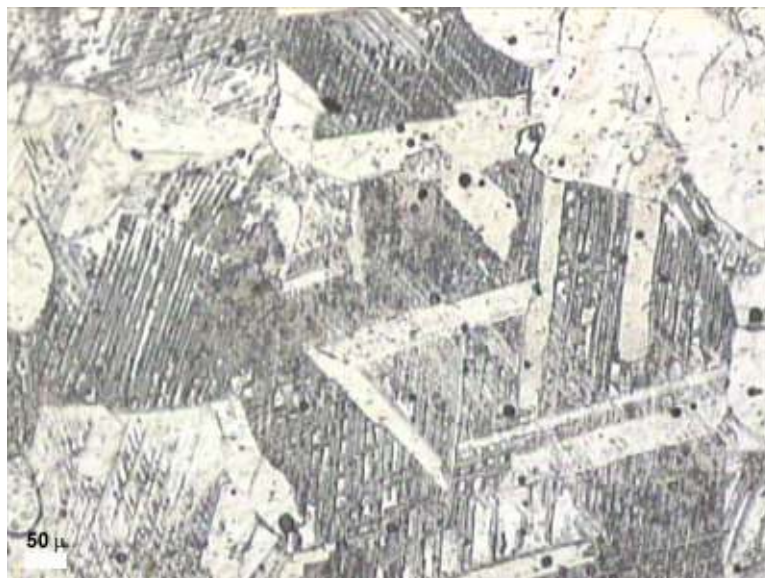


Figura 5.6. Microestructura acer AISI 304 (x50).

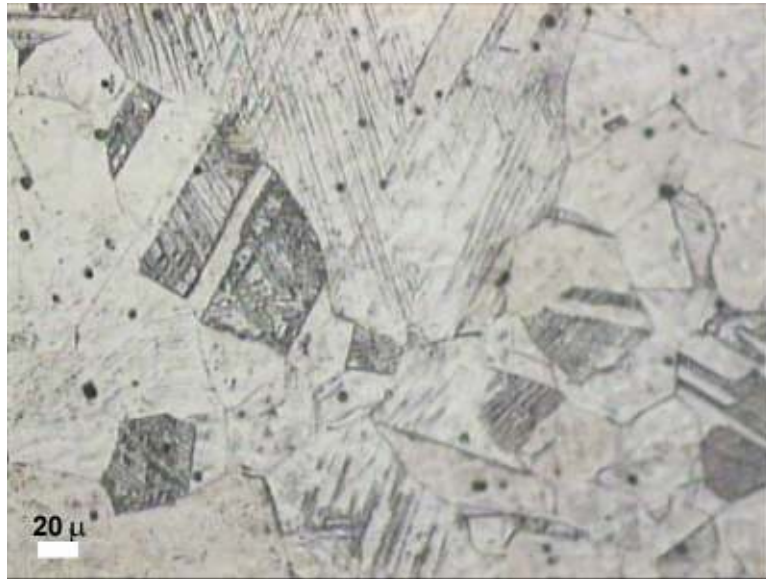


Figura 5.7. Microestructura acer AISI 304 (x20).

En aquesta mostra la microestructura pràcticament no ha variat al llarg de la barra.

· AISI 4140

L'acer AISI 4140 és un acer hipoeutectoide La quantitat de carboni que conté és superior al 0.022% i inferior al 0.7%; concretament entre 0.37 i 0.43 % en C. Al tractar-se d'un acer hipoeutectoide la microestructura obtinguda després de l'assaig és la mateixa que la de l'acer AISI 1045. Tot i que en aquest cas, i com es pot observar la figura 5.7. els grans són molt petits. Això dona a aquest acer una molt bona trempabilitat. En la microestructura s'observa com hi ha hagut molta nucleació i poc creixement, ja que els grans no han tingut temps de créixer.

L'espessor absolut d'una làmina de ferrita depèn de la temperatura de transformació. A temperatures inferiors i molt pròximes a l'eutectoide es formen làmines de ferrita i de cementita; aquesta és la microestructura denominada *perlita gruixuda*. A aquestes temperatures les velocitats de difusió són relativament altes i durant la difusió els àtoms de carboni poden difondre al llarg de les distàncies relativament llargues, formant làmines gruixudes [1].

A mesura que disminueix la temperatura, es formen làmines més primes ja que la velocitat de difusió del carboni decreix. L'estructura de làmines primes produïda als voltants dels 540 °C es denomina *perlita fina*.

La grandària dels grans és inferior a 3 μ .

La perlita fina és la microestructura de la figura 5.8.

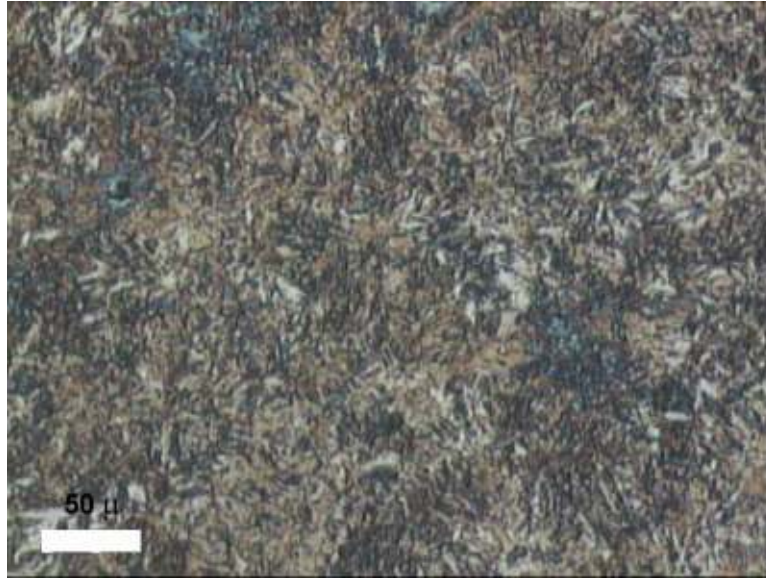


Figura 5.8. Microestructura acer AISI 4140, extrem trempat (x50).

La figura 5.9. correspon a la part final de la barra, que ha refredat a temperatura ambient. Aquí els grans són de majors dimensions ja que el refredament ha estat més lent i han tingut més temps per créixer. Tot i que com es pot observar els grans continuen sent inferiors a 3 μ .

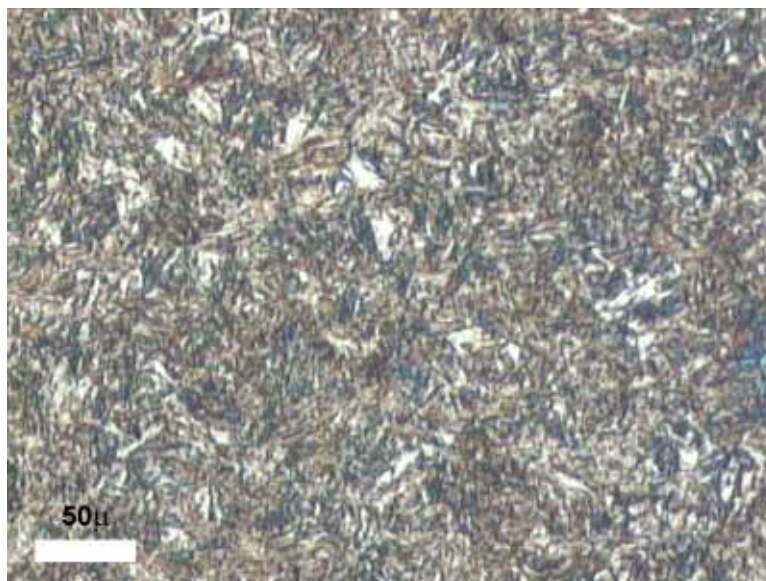


Figura 5.9. Microestructura acer AISI 4140.(x50)

5.2.3. RaigsX

Els Raigs X són una forma de radiació electromagnètica que té elevada energia i curta longitud d'ona: de l'ordre dels espais interatòmics dels sòlids. [1]

En aquest projecte s'utilitzen els raigs X per determinar les fases que es troben presents en el material.

De totes les mostres observades s'hi ha diferenciat dues fases:

- Correspon als pics de difracció de la fase ferrita.
- Correspon als pics de difracció de la fase austenita.

En les gràfiques es mostren representades la intensitat en l'eix longitudinal, i l'angle de difracció 2θ en l'eix transversal.

· AISI 1045

D'aquest acer al carboni se n'han observat dues mostres. En primer lloc l'extrem trempat, figura 5.10., i en segon lloc l'extrem refredat a Ta. ambient, figura 5.11.

Els pics de difracció corresponen a la fase ferrita.

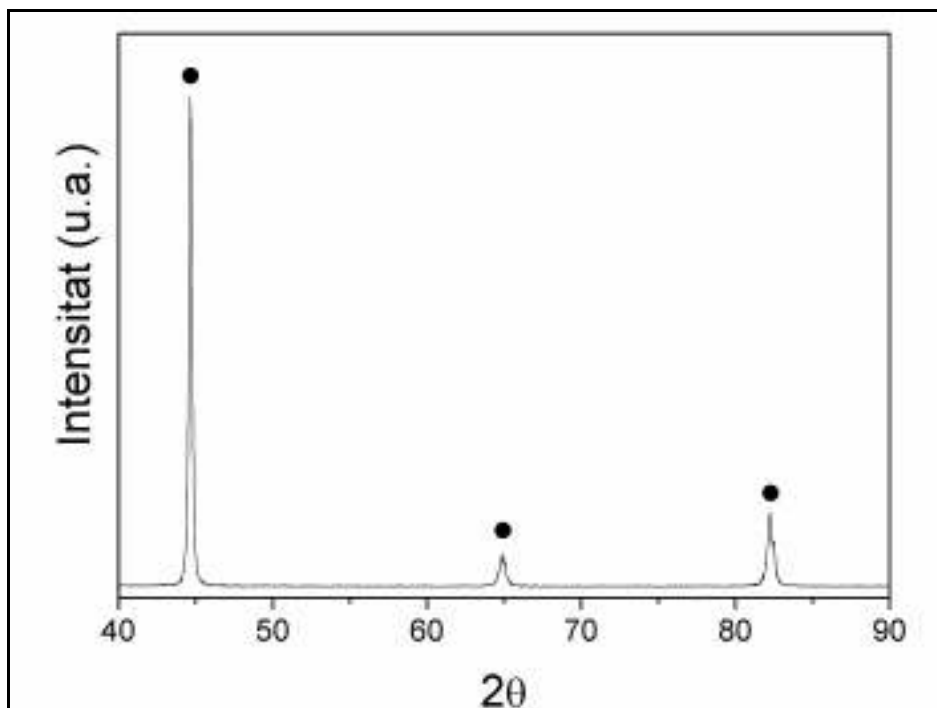


Figura 5.10. Els pics ens mostren que la fase que hi trobem present és la ferrita.

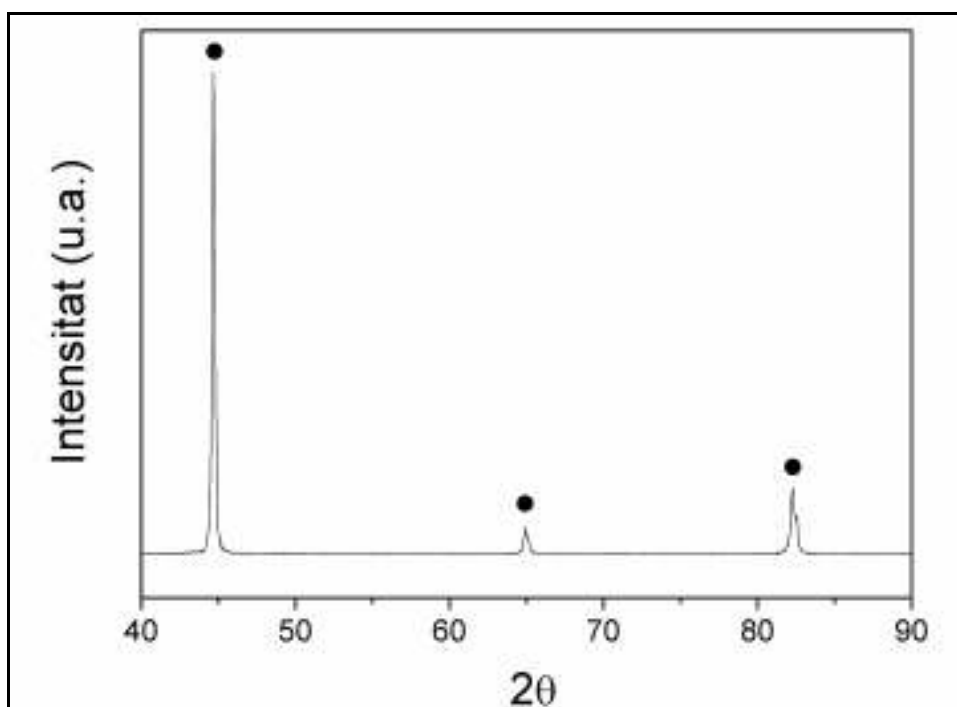


Figura 5.11. Els pics ens mostren que la fase que hi trobem present és la ferrita.

El difractograma ha detectat en les dues mostres els pics de difracció molt iguals, s'hi ha trobat igualtat en les fases.

· AISI 304

Les figures 5.12. i 5.13. corresponen a l'acer inoxidable. La primera correspon a l'extrem trempat amb raig d'aigua, i la segona a l'extrem oposat, refredat a temperatura ambient.

En aquestes dues mostres de material s'hi troba en els pics d'alta intensitat austenita retinguda, amb alguna pic de ferrita.

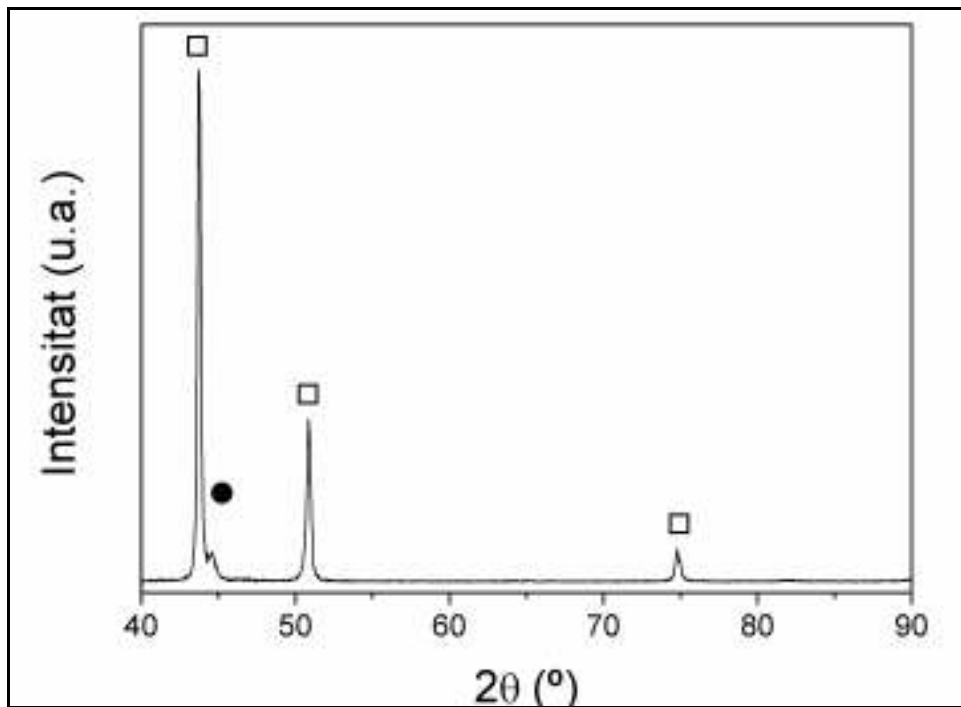


Figura 5.12. La fase majoritària és l'austenita, es troba algun pic de ferrita.

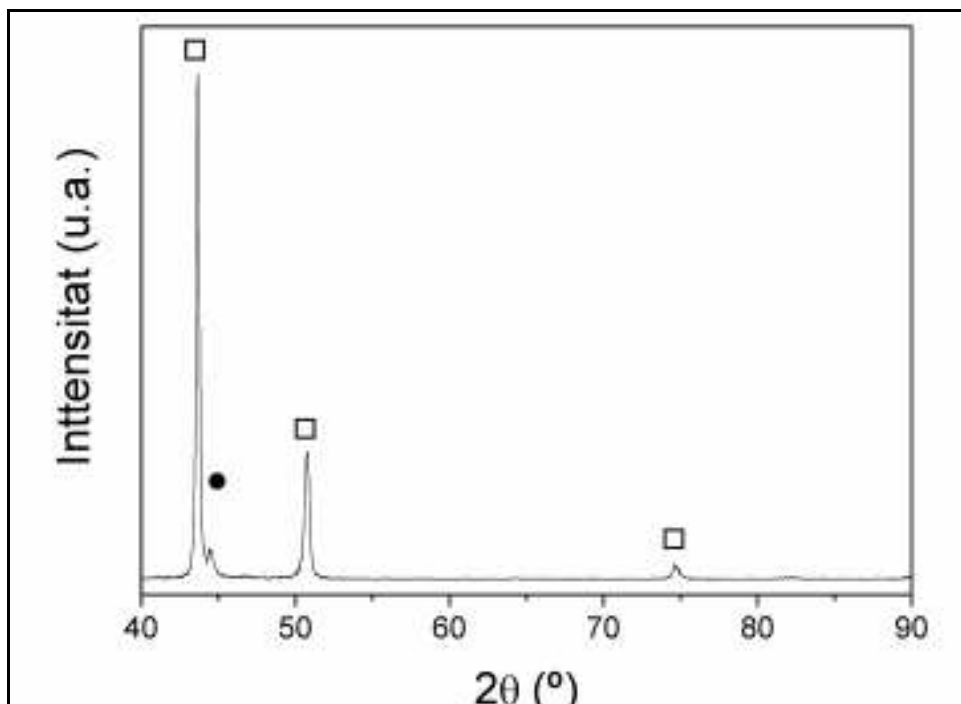


Figura 5.13. La fase majoritària és l'austenita, es troba algun pic de ferrita.

· AISI 4140

Les mostres de l'acer bonificació mostren tots els seus pics de difracció corresponents a la fase ferrita.

En aquest acer s'han trobat diferències entre les dues mostres. La figura 5.14. mostra que els pics corresponen a la fase ferrita. En canvi en la figura 5.15., que correspon a la mostra que no ha estat trempada, els pics corresponen a la fase ferrita i austenita

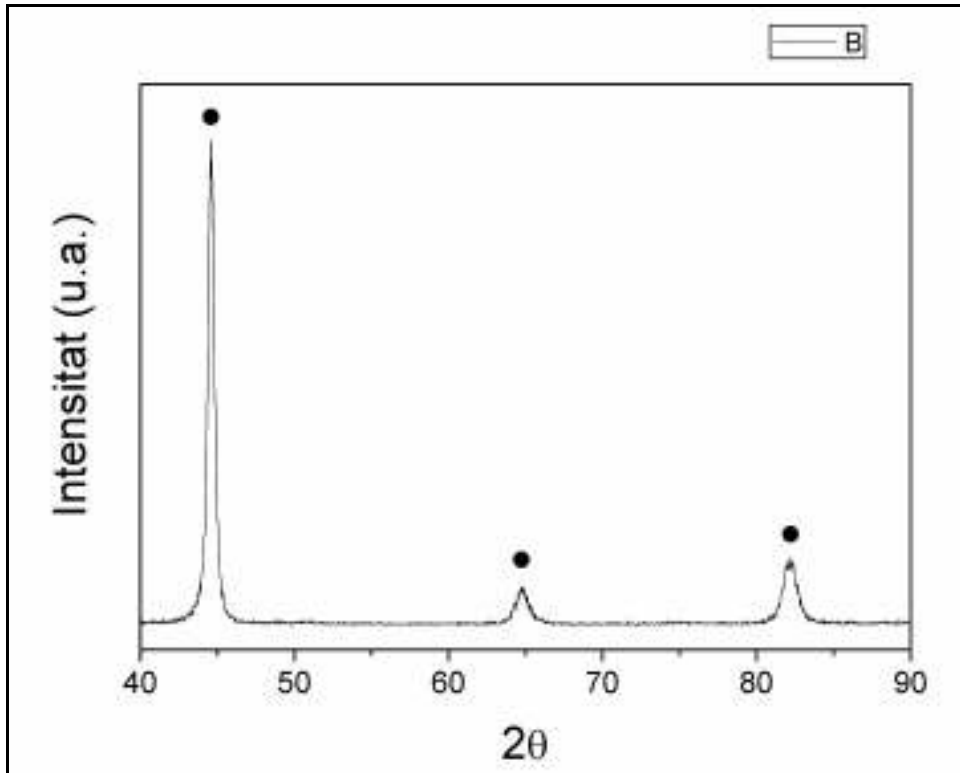


Figura 5.14. Fase majoritària és la ferrita.

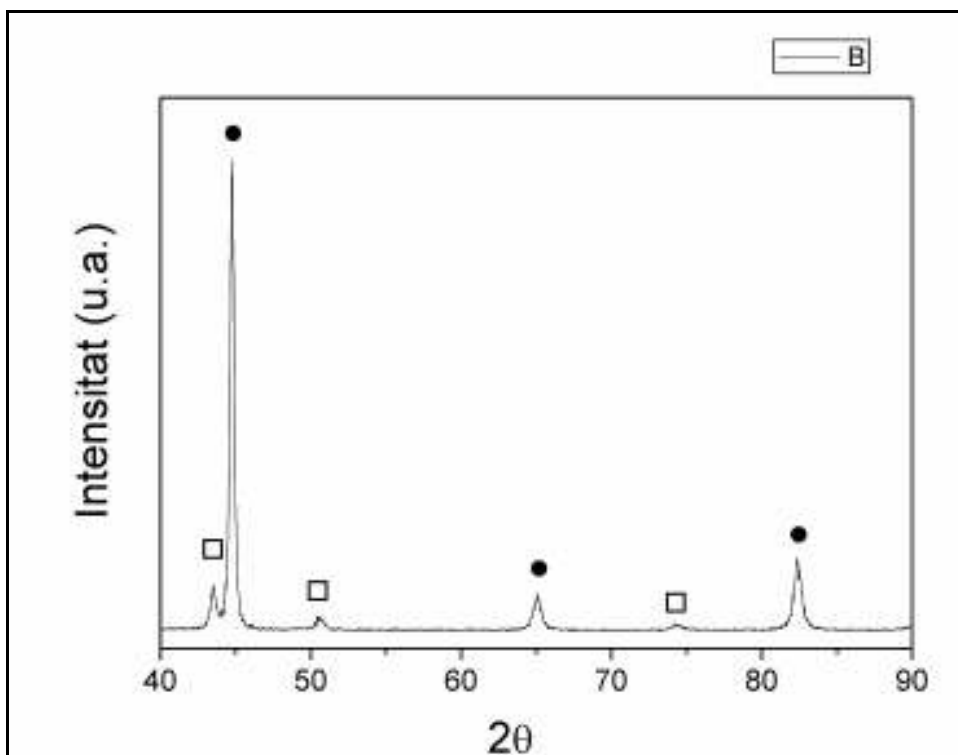


Figura 5.15. El pic de difracció més elevat correspon a la ferrita, a més, es troben altres pics de ferrita i austenita.

6. POSSIBLE MILLORA DE LA PRÀCTICA

Una possible millora del projecte millora és la gravació de la història tèrmica mitjançant l'ús d'un sistema per la adquisició de dades experimentals.

A la cubeta se li farien quatre forats, i se li posarien quatre cargols buits per dintre que, conduirien els termoparell tipus k fins a tocar la barra, com mostra la figura 6.1.. En la proveta Jominy (figura 6.1.) també se li farien quatre punts en la superfície, on el termoparell tipus k pogués fer contacte i enregistrar les dades de les velocitats de refredament en els diferents punts



Figura 6.1. A la proveta se li puntegerien quatre forats per tal que el termoparell prengués contacte.

En la figura 6.2. es pot observar clarament com la barra s'està trempant per una extrem amb aigua i la resta de la barra ho fa a temperatura ambient. El termoparell capta com disminueixen les diferents velocitats de refredament al llarg de tota la barra.



Cargols que
conduirien els
termoparells fins al
puntejat de barra.

Figura 6.2. La cubeta i la proveta compten amb quatre termoparells per captar les velocitats de refredament.

7. DESCRIPCIÓ DE LA PRÀCTICA DE LABORATORI

La pràctica que hauran de realitzar els alumnes seguirà els següents passos.

1. **Objectius.**

- 1.1. Aplicar el Mètode Jominy per determinar la trempabilitat dels acers.
- 1.2. Interpretar els resultats de l'Assaig Jominy. Aplicar aquests resultats en la classificació dels acers en funció de la trempabilitat.
- 1.3. Determinar el perfil de temperatures i de velocitats de refredament al llarg de la barra.
- 1.4. Avaluar les diferències en trempabilitat entre dos tipus d'acer.
- 1.5. Relacionar les velocitats de refredament amb les microestructures en diferents zones de la proveta Jominy.

2. **Pre-laboratori.** Abans de realitzar la pràctica l'estudiant ha d'indagar sobre els següents aspectes, relacionats amb el desenvolupament de la mateixa.

- 2.1. Normes ASTM per l'Assaig Jominy.
- 2.2. Influència dels elements d'aliatge en la trempabilitat dels acers.
- 2.3. Relació entre l'Assaig Jominy i les corbes temps-temperatura-transformació.
- 2.4. Factors que afecten als assajos de duresa i escala de duresa a utilitzar.
- 2.5. Quins punts realment interessen de la corba Jominy.
- 2.6. Característiques de les transformacions perlítiques i martensítiques.
- 2.7. Característiques de l'Assaig Jominy.

3. **Materials.**

Una proveta Jominy d'acer AISI 1045 o 4140, de dimensions estandaritzades d'acord a la norma ASTM. Adicionalment, aquestes han d'estar perforades sobre la superfície oposada a l'extrem a ser trempat.

4. **Procediment.**

- 4.1. S'introdueix la proveta Jominy en la mufla, que ha estat pre-escalfada a la temperatura d'austenització adequada. La temperatura i el temps de permanència de la proveta en el forn han d'haver estat especificats i determinats per l'alumne. Cal tenir en compte que les variables de temperatura i temps influeixen de manera determinant en els resultats de l'assaig.

4.1.1. Després d'haver transcorregut el temps de tractament determinat per l'alumne , s'extreu ràpidament la proveta del forn i es col·loca dins el forat del passamà col·locat sobre de la cubeta Jominy .

4.1.2. Es realitza el refredament durant el temps estipulat en la norma abans mencionada. Una vegada transcorregut el temps d'assaig, es retira la proveta del passamà i s'acaba de refredar amb aigua.

4.2. Una vegada les provetes estan assajades es mecanitzen dues superfícies planes, paral·leles longitudinalment i diametralment oposades, amb una profunditat de 0.5mm.

4.3. Es realitzen mesures de duresa Vickers en funció de la distància des de l'extrem trempat. Les mesures han d'estar fetes sobre la superfície mecanitzada, a poder ser polir la superfície per crear una zona plana, i amb una separació de 0.5mm entre cada mesura. A partir de les dades obtingudes es podrà realitzar la gràfica Duresa vs. Distància a l'extrem trempat.

4.3.1. Tallar les provetes en tres parts. Per a aquesta tasca l'alumne ha de justificar la seva selecció amb arguments dels coneixements adquirits. S'hauran d'observar al microscopi òptic la microestructura obtinguda, i prendre fotografies en les regions microestructurals més representatives, que posteriorment, podran ésser utilitzades en la discussió dels resultats de l'informe. Relacionar la microestructura observada amb la duresa mesurada.

5. **Elaboració de l'informe.** Elaborar l'informe de la Pràctica considerant els aspectes següents.

5.1. Resultats de les corbes de Duresa vs Distància a l'extrem trempat.

5.2. Discutir els resultats obtinguts en l'anàlisi de les microestructures. Relacionar aquests resultats amb els de duresa.

8. CONCLUSIONS

S'han desenvolupat els elements necessaris per tal que els alumnes d'enginyeria de materials puguin realitzar la pràctica de l'Assaig Jominy en un laboratori.

S'ha aconseguit optimitzar les condicions de l'assaig de tal manera que s'aconsegueixi trempar l'acer, i una nova microestructura en el material.

S'han pogut comprovar els canvis en el material després d'aplicar-li un tractament tèrmic de refredament ràpid amb raig d'aigua.

En les provetes s'han aconseguit diferents tipus de microestructura en funció de la quantitat de carboni que conté l'acer i de les velocitats de refredament.

S'han posat en pràctica els coneixements teòrics assolits al llarg dels estudis d'Enginyeria de Materials, així com poder utilitzar aparells i maquinària del laboratori sota de tutela del director de projecte.

En un principi es pensava obtenir martensita en els extrems de la barra trempats en aigua. Les microestructures obtingudes no han estat martensita ni en els extrems de les barres ni en tota la longitud de la barra.

A continuació s'han tret unes conclusions específiques de les provetes Jominy utilitzades més representatives.

La barra d'acer inoxidable AISI 304 ha mantingut valors elevats de duresa al llarg de tota la barra, per tant, es pot afirmar que aquest acer té una bona trempabilitat.

L'acer AISI 4140 presenta també una bona trempabilitat ja que presenta alts valors de duresa.

L'acer AISI 1045 presenta una baixa trempabilitat ja que presenta valors baixos de duresa al llarg de tota la longitud de la barra.

9. PRESSUPOST

En el projecte s'han calculat dos pressupostos: per una banda el cost de realitzar el projecte des del principi, és a dir, preparar l'Assaig Jominy, assajar les provetes, portar a seccionar les mostres al taller, realització de raigs X, entre d'altres. Un segon pressupost és el cost que tindria que un grup d'alumnes realitzés la pràctica.

· Pressupost 1

El primer pressupost inclou tots els costos que han suposat la preparació, muntatge i realització de l'Assaig Jominy

· Provetes acer:

5 barres d'acer de $\varnothing = 25 \text{ cm}$ i $l = 25 \text{ cm}$ x 3 € cada barra = **15 €**

· Tot el muntatge de l'assaig on es realitzen el refredament de les provetes.

Olla alumini = **36 €**

Petit material i connexions = **28.5 €**

3 suports de planxa de nylon de 1.6 mm de llarg x 90 mm d'ample i 11 mm de gruix. Planxes de nylon 0.5 € x 3 planxes = **1.5 €**

Tub de plàstic 2 metres x 3 €/m = **6 €**

Tub coure per on surt el raig que tremparà la barra = **0.5 €**

Passamà de 100 x 300 x 4 mm = **4.75 €**

· El preu del litre d'aigua és aproximadament 0.00174 €/litre, en cada assaig es gasten 5 litres aprox., hem realitzat 9 assajos + omplir dues vegades la pica que són 4 litres més cada vegada.

(5 litres x 9 assajos) + (5 litres x 2 piques) = 55 litres

0.00174 €/litre x 55 litres = **0.096 €**

· Hores de taller per seccionar les barres = **65 €**

· Preu del reactiu:

Reactiu per atacar químicament l'acer inoxidable:

Els 50 ml de la composició es divideixen en tres elements:

$$50/6=8.33$$

3 parts del reactiu de HCl (àcid clorhídric)

$$8.33 \times 3 = 24.99 \text{ ml}$$

$$24.99 \text{ ml} \times (1 \text{ l} / 1000 \text{ ml}) \times (15 \text{ €/l}) = \mathbf{0.37 \text{ €}}$$

2 parts de glicerol

$$8.33 \times 2 = 16.66 \text{ ml}$$

$$16.66 \text{ ml} \times (1 \text{ l} / 1000 \text{ ml}) \times (61 \text{ €/l}) = \mathbf{1.02 \text{ €}}$$

1 part de HNO₃ (àcid nítric) = 8.33 ml

$$8.33 \text{ ml} \times (1 \text{ l} / 1000 \text{ ml}) \times (14.70 \text{ €/l}) = \mathbf{0.12 \text{ €}}$$

Reactiu Nital:

$$48 \text{ ml d'etanol} \times (1 \text{ l} / 1000 \text{ ml}) \times (15.3 \text{ €/l}) = \mathbf{0.73 \text{ €}}$$

$$2 \text{ ml HNO}_3 \text{ (d'àcid nítric)} \times (1 \text{ l} / 1000 \text{ ml}) \times (14.70 \text{ €/l}) = \mathbf{0.03 \text{ €}}$$

· Anàlisi de Raigs X 12 €/hora cada mostra 40 minuts. S'han analitzat 6 mostres. 6 mostres x 40 minuts = 240 minuts

$$240 \text{ minuts} = 4 \text{ hores}$$

$$4 \text{ hores} \times 12 \text{ €/hora} = \mathbf{48 \text{ €}}$$

Total pressupost 1 = 207.6 €

Aquest pressupost no té en compte ni el cost d'amortització d'aparells (com la mufla, el duròmetre, la polidora o el microscopi òptic) ja que formen part del laboratori de l'ETSE, ni el cost del material reutilitzable. Tampoc no s'ha calculat l'electricitat utilitzada.

· Pressupost 2

Aquest segon pressupost inclou els costos que li suposarien a la universitat la realització pels alumnes de la pràctica de l'Assaig Jominy.

El cost de muntatge dels elements que s'utilitzen en el moment del refredament no s'inclou en aquest pressupost.

En aquest s'inclouen:

· Cost de les barres: 2 barres d'acer x 3 € cada barra = **6 €**

· El preu del litre d'aigua és aproximadament 0.00174 €/litre, en cada assaig es gasten 5 litres aprox., hem realitzat 2 assajos = 10 litres.

0.00174 €/litre x 10 litres = **0.017 €**

· Preu del reactiu:

Reactiu per atacar químicament l'acer inoxidable: **1.51 €**

Reactiu Nital: **0.76 €**

Total pressupost 2 = 8.27 €

REFERÈNCIES

[1]. Callister, W.D, Jr.; Introducció a la Ciència e Ingenieria de los Materiales I; Ed. Reverté, S.A., 2002, Barcelona.

[2]. Apraiz, J.; Tratamientos Térmicos de los Aceros; Ed. Dossat, 1985, Madrid.

[3]. <http://www.bodycotetesting.com/Category.aspx?ContId=13034&CatId=11192&lang=1> (01/09/07).

[4]. <http://www.dimetales.com/Aceroyflejes.html> (20/08/07).

[5]. <http://cactus.fi.uba.ar/~jfaig/download/biomecanica2004/Aceros-Especiales-pres.pdf>

[6]. Lasheras, J.M.; Carrasquillo J.F.; Ciencia de Materiales; Ed. Donostiarra, S.A., 1997, San Sebastián.

[7]. Di Caprio, G; Los aceros inoxidables; Inoscenter S.A.; 1999, Barcelona.

[8]. http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_steels/show_alloy.cfm?ID=AISI_4140&prop=all&Page_Title=AISI%204140

[9]. http://www.scs.gmu.edu/~mcastro/publications/proceedings/03_AFA_SEP_2001/afa.pdf