



UNIVERSITAT DE BARCELONA



FACULTAT DE QUÍMICA

Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica

Programa de doctorat: Tecnologia de Materials

Bienni: 2003-2005

ESTRUCTURES BAINÍTIQUES EN ACERS HSLA DE BAIX CONTINGUT EN CARBONI: INFLUÈNCIA DEL CONTINGUT EN MICROALEANTS I DEL TRACTAMENT TÈRMIC SOBRE L'ESTRUCTURA I PROPIETATS

Memòria presentada per **Silvia Illescas Fernández**
per a optar al grau de Doctor per la Universitat de
Barcelona sota la direcció del Professor Josep M^a
Guilemany Casadamon i del Professor Javier
Fernández González.

Barcelona, Maig 2007

II. MÈTODE EXPERIMENTAL

Solo hay un camino para llegar y mil para alejarse
Jean de La Bruyère

II. MÈTODE EXPERIMENTAL

II.1. MATÈRIES PRIMERES

Per a la realització d'aquest treball d'investigació s'han utilitzat dos acer laminats en calent (16MnNi4 i 16Mn4, Norma EN; A242-Tipo 2, ASTM; K12010, UNS). Es tracta de dos acers el percentatge del qual en carboni és del 0,165 %, englobant-se dins del grup d'acers microaleats de baixa aleació respecte al seu contingut en carboni.

II.1.1. Anàlisi composicional

Per a conèixer la composició química general s'ha dut a terme l'anàlisi per mitjà d'espectroscòpia d'emissió òptica i per a determinar amb major grau d'exactitud els continguts de C, S, O i N s'ha emprat l'analitzador elemental Leco.

a) Espectroscòpia d'emissió òptica

Per a la determinació de la composició general de la matèria primera s'ha utilitzat un Quantòmetre simultani ARL 3460 o Metals Analyzer, que mesura simultàniament la intensitat de diverses línies espectrals de la llum emesa per la mostra quan els àtoms que la constitueixen són excitats per una font d'energia exterior. La llum analitzada, se situa dins de les longituds d'ona compreses entre 150 nm i 800 nm aproximadament.

L'espectròmetre ARL 3460 utilitzat és capaç de realitzar l'anàlisi simultània de fins a 60 elements. La precisió de les mesures depèn de l'element analitzat, però per a anàlisi de materials base ferro està al voltant de les cinc xifres significatives, sent d'aproximadament 1 ppm el límit de detecció per a la major part dels elements analitzats.

b) Analitzador elemental Leco

Per a determinar amb major grau d'exactitud els continguts de C, S, O i N s'han emprat dos tipus de forns Leco: el CS-125, que serveix per a la determinació de Carboni i Sofre, i el TC-136 per a la quantificació del Nitrogen i l'Oxigen presents en la mostra.

LECO CS-125

Aquest sistema és capaç de determinar simultàniament el contingut en carboni i sofre de mostres d'acer, ferro, minerals i ceràmics, entre altres materials, en un temps d'anàlisi inferior als 30s.

Els rangs de composició per als que són vàlids les anàlisis realitzades amb aquest equip són:

Carboni: 0,00-3,5%

Sofre: 0,00-0,35%

El seu disseny es basa en un forn d'inducció ideat per a produir la combustió de les mostres, operant a una freqüència de 18 MHz.). Un microprocessador exerceix el control sobre els gasos resultants de la combustió, és a dir, l'oxidació del carboni a CO₂ i del sofre a SO₂. Aquests gasos són analitzats per mitjà de detectors infrarojos, que minimitzen el soroll de fons existent, augmentant de la precisió de les mesures.

La precisió dels resultats en funció de l'element analitzat és la següent:

Carboni: ± 0,0002 o el 0,5% del Carboni present

Sofre: ± 0,0002 o el 5% del Sofre present

Les mostres emprades han estat d'aproximadament 1 gram.

LECO TC-136

Aquest dispositiu és capaç de determinar simultàniament el contingut en Oxigen i Nitrogen en diversos tipus de materials.

Aquest sistema empra el mètode tradicional de fusió a través d'un gas inert per a extraure els elements de les mostres.

Els rangs de composició per als que són vàlids les anàlisis realitzades són:

Oxigen: 0,00001-0,2%

Nitrogen: 0,00001-0,5%

El mode de detecció d'ambdós elements és diferent: en el cas de l'Oxigen el que es discrimina és la presència de CO₂ a través d'absorció d'infrarojos, i en el cas del Nitrogen, aquest es distingeix per mitjà d'un sistema de conductivitat tèrmica.

Es tracta d'un forn d'inducció de 18 MHz, igual que en cas del forn CS-125, però aquest opera en atmosfera inerta (generalment He), a diferència del model anteriorment descrit que treballava en atmosfera oxidant (Oxigen).

La precisió dels resultats en funció de l'element analitzat és la següent:

Oxigen: $\pm 0,0002$ o l'1% de l'Oxigen present

Nitrogen: $\pm 0,0002$ o l'1% del Nitrogen present

La quantitat de les mostres emprades ha estat aproximadament d'1 gram.

II.2. CARACTERITZACIÓ ESTRUCTURAL

II.2.1. Caracterització per mitjà de microscopia òptica

a) Preparació de mostres

Per a dur a terme una òptima caracterització estructural s'han seguit els processos convencionals de tall, embotició, desbast, polit i atac de les mostres.

Tall: El tall de les provetes d'acer a estudiar es realitza per mitjà d'una talladora STRUERS Labotom que treballa amb refrigeració per aigua amb taladrina i discos de tall de SiC. Per als casos on ha estat necessària una major precisió, s'ha utilitzat una talladora CM4-100 de disc diamantat refrigerada per oli.

Embotició: Per a l'etapa d'embotició en calent de les mostres s'ha utilitzat una embotidora Struers LaboPress-3 que ha treballat a una pressió al voltant dels 20 KN i una temperatura de 180°C, fixant-se un temps d'escalfament de 5 minuts, i un temps de refredament de 3 min. Ja que l'adherència de la resina a l'acer no era determinant, s'ha optat per la utilització d'una resina BUEHLER KONDUCTOMET I, conductora, molt útil per a la posterior observació a través de microscopia electrònica de rastreig.

Desbast i polit: L'etapa de desbast s'ha efectuat per mitjà de diversos tipus de desbastadora de disc giratori STRUERS, que funcionen refrigerades per aigua i a una velocitat seleccionable entre 150 i 300 rpm. Els papers de desbast BUEHLER utilitzats han estat discos de SiC de 8" de granulometria variable (120, 240, 600 i 1200). L'etapa de polit s'ha realitzat per mitjà de draps amb pasta de diamant de 6 i 1 μm i lubricació per mitjà d'un lubricant específic base alcohol.

Atac: En funció dels trets microestructurals a revelar s'han utilitzat diferents tipus d'atac químic.

Nital 5%: Es tracta d'una dissolució de 5 ml de HNO_3 en 95 ml d'alcohol etílic. A través d'aquest reactiu es revela la microestructura de l'acer, ja sigui martensítica, bainítica o ferrític-perlítica. El temps d'atac aproximat ha estat de 10 segons.

Reactiu base àcid pícric: Consisteix en una solució sobresaturada d'àcid pícric en aigua destil·lada a la que s'afegeix un agent tensioactiu. L'atac es realitza a temperatura elevada (al voltant de 60°C). Per mitjà d'aquest atac s'aconsegueix revelar els límits de gra austenítics. El temps d'atac recomanat ha oscil·lat entre 1 i 3 minuts.

b) Microscopi òptic

Totes la peces han estat examinades per mitjà de microscopia òptica en camp clar amb un equip OLYMPUS BH2-UMA de llum reflectida que permet treballar en un rang entre 50 i 1000 augments. El microscopi OLYMPUS disposa d'una cambra digital per a captar les imatges.

II.2.2. Caracterització per mitjà de microscopia electrònica de rastreig

a) Preparació de mostres

La preparació de mostra és la mateixa que ja s'ha descrit per al cas de l'observació per mitjà de microscopia òptica, en el punt II.2.1.a., encara que en aquest cas els temps d'atac han de ser superiors als ja mencionats. D'esta manera s'assegura el complet realç dels detalls microestructurals a observar.

b) Microscopi Electrònic de Rastreig (SEM)

Per a l'estudi de mostres per mitjà de microscopia electrònica de rastreig (SEM) en el present treball, s'ha utilitzat un equip de microscopia JEOL 5510.

El microscopi JEOL disposa d'un detector d'electrons secundaris JEOL que permet treballar amb una resolució horitzontal de 4 nm, i un detector ROBINSON de retrodifossos, que permet distingir fases la diferència del qual en número atòmica mitjana sigui superior a 0,003. Posseeix una resolució horitzontal de 2,5 nm.

L'equip JEOL disposa d'un sistema informàtic de digitalització d'imatges SEMAFOR, per mitjà de l'adaptació d'una targeta que traspasa directament la imatge adquirida pel microscopi a l'ordinador. Aquest sistema permet realitzar mesures directes sobre la imatge adquirida, així com el tractament de la mateixa a nivells de brillantor i contrast.

II.2.3. Caracterització per mitjà de microscopia electrònica de transmissió

a) Preparació de mostres

Les mostres a observar per mitjà de microscopia electrònica de transmissió s'han preparat de forma convencional.

Els passos a seguir per a la preparació són:

- Tall de peces d'acer d'entre 1 i 2 mm de grossor.
- Conformació, per mitjà d'una serra ultrasònica GATAN 601, d'un disc, les dimensions del qual són 3mm de diàmetre (a fi de poder ser observat en qualsevol microscopi electrònic de transmissió amb portamostres convencional).
- Desbastat i polit de les dos cares d'aquest peces fins a aconseguir un grossor de, aproximadament, 80 µm.
- Polit còncau, fins a aconseguir 35 µm de grossària en el centre de la proveta.
- Una vegada obtingut aquest disc, es procedeix a aprimar-ho per mitjà d'un afinament electroquímic usant com a reactiu d'atac una dissolució al 4% d'àcid perclòric en àcid acètic, treballant a 4V.

b) Microscopi Electrònic de Transmissió (TEM)

S'ha treballat amb tres equips diferents de microscopia electrònica de transmissió (TEM): HITACHI H-800MT (200kV), Philips CM20 (200kV) i Philips CM30 (300kV).

S'han registrat imatges tant per exposició de placa fotogràfica amb una posterior digitalització dels negatius, com per mitjà de cambra digital inserida en el propi microscopi usant el programari Digital Micrograph.

A més s'ha treballat amb microanàlisi EDX.

II.2.4. Caracterització per mitjà d'Electron Backscattered Diffraction (EBSD)

L'EBSD és una tècnica adaptada al Microscopi Electrònic de rastreig (SEM) que proporciona informació cristal·logràfica obtinguda a partir de patrons de línies de Kikuchi i que resulta ser una tècnica rutinària i de fàcil maneig.

En EBSD un feix d'electrons impacta sobre una mostra cristal·lina tiltada 70° i els electrons difractats formen el patró corresponent sobre una pantalla fluorescent. Aquest patró és característic de l'estructura cristal·logràfica i de l'orientació de la zona de la mostra que ho ha generat. El patró de difracció pot ser utilitzat per a mesurar l'orientació cristal·logràfica i texturització del material, mesurar la misorientació del límit de gra, discriminar entre diferents materials i fases, i aportar informació sobre la perfecció cristal·lina local.

Quan un feix d'electrons incideix sobre una zona d'una mostra policristal·lina, el mapa resultant permet revelar la morfologia de gra, orientacions i límit de gra. A més aquest mapa pot emprar-se per a mostrar l'orientació cristal·logràfica preferent (textura) present en el material. Per mitjà del mapa d'orientació obtingut en SEM i una anàlisi per ordinador, cridat OIM (orientation imaging microscopy), es poden arribar a reproduir les microestructures dels materials, mantenint-se la informació d'orientació en cada punt.

L'EBSD s'usa per a obtenir informació cristal·logràfica addicional a la tradicional observació per TEM. Comparant ambdós tècniques, per mitjà d'EBSD la preparació de mostra és molt més simple i es poden obtenir resultats d'una àrea major. Això fa que l'EBSD pugui resultar una tècnica una mica més efectiva. No obstant, l'EBSD presenta una baixa resolució espacial i angular, comparada amb l'anàlisi per TEM, i a causa d'esta limitació en resolució, és difícil analitzar una petita àrea amb petites misorientacions com ara plaques.

a) Preparació de mostres

Les mostres han estat preparades seguint allò que s'ha descrit en la preparació de mostres de SEM amb un polit final amb alumina de $0,5 \mu\text{m}$. El polit final és crític per a poder observar bé les línies de Kikuchi i així poder portar una correcta indexació d'aquests.

b) Electrò Backscattered Diffraction (EBSD)

S'ha treballat amb un equip EBSD associat a un SEM Camscan 4 adaptat amb un detector de 5 canals hkl i un programari d'anàlisi. S'ha utilitzat una font d'electrons de tungstè generant una intensitat de feix de $10^{-8/9}$, i s'ha treballat amb la mostra tiltada 75° respecte al detector. S'han utilitzat diferents steps en les zones analitzades, sent el mínim permès de $1\mu\text{m}$.

Els principals components de l'EBSO es mostren en la Figura 1.

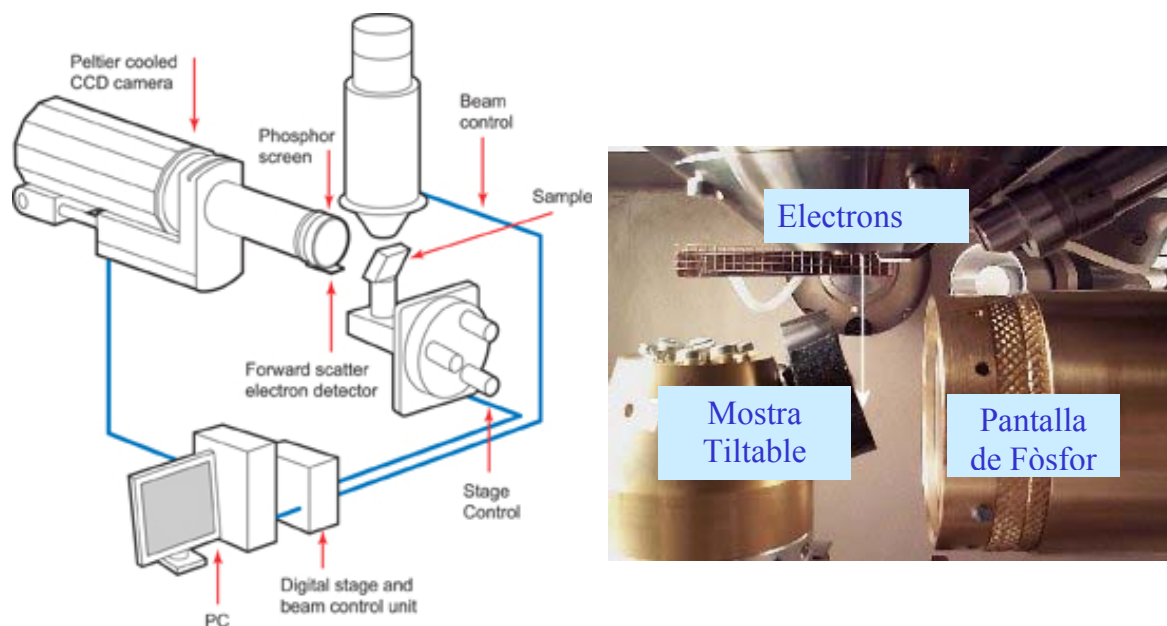


Figura 1. Principals components de l'EBSO.

Així, el sistema EBSO està constituït per:

- Mostra tiltada 70° de l'horitzontal.
- Pantalla de fòsfor, fluorescent respecte dels electrons per a formar el patró de difracció.
- Vídeo cambra CCD (charge coupled device) per a veure el patró de difracció en la pantalla de fòsfor.
- Interfase de buit per a muntar la pantalla de fòsfor i la cambra en el SEM.
- Maquinari per a controlar el SEM incloent la posició del feix, l'enfoc i la magnificació.
- Ordinador per a controlar els experiments d'EBSO, analitzar els mapes d'orientació i processar els resultats.

II.2.5. Caracterització per mitjà de difracció de Raigs X

Per mitjà de difracció de Raigs X s'ha procedit a la identificació de forma inequívoca les fases presents en els acers problema, així com la seva estructura cristal·lina. L'equip utilitzat és un difractòmetre SIEMENS D500 tipus BRAGG-BRENTANO $\theta/2\theta$ amb radiació $K_{\alpha_{1+2}}$ del Cu ($\alpha_1=1.5406 \text{ \AA}$, $\alpha_2=1.54443 \text{ \AA}$) a 40kV i un corrent de 30mA. L'equip representa gràficament la intensitat dels pics *versus* l'angle 2θ . Totes les mostres es van analitzar en les mateixes condicions per a poder-les comparar entre elles.

Les mostres s'han preparat per tall fins a obtenir rectangles d'aproximadament $1 \times 1 \times 0,5 \text{ cm}^3$.

La interpretació dels difractogrames obtinguts s'ha realitzat per mitjà de la utilització d'una base de dades informatitzades (Diffrac-AT) amb les fitxes JCPDS.

II.2.6. Anàlisi dilatomètric

El fonament teòric de la dilatomètria està basat en les variacions de longitud que experimenta una proveta com a conseqüència de la seva expansió durant l'escalfament, o contracció en el refredament, a les que se superposen les variacions dimensionals provocades per les transformacions al·lotròpiques i microestructurals produïdes en el si del material durant els processos d'escalfament i refredament en estat sòlid. Les dites variacions de longitud són diferents en magnitud i fins i tot en sentit d'aquelles expansions i contraccions lineals que es produeixen en el material seguint les lleis generals de dilatació tèrmica de sòlids. Esta és la causa que facilita la determinació experimental dels punts de principi i fi de les diferents transformacions que tenen lloc en un determinat aliatge sotmès a cicles tèrmics específics i controlats.

a) Preparació de mostres

S'han mecanitzat cilindres de $12 \pm 0,1 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ de diàmetre en sentit longitudinal a l'eix de laminació. Esta geometria permet un refredament de la proveta sense que existeixin pràcticament gradients en la velocitat de refredament, a causa del seu reduït diàmetre.

b) Descripció de l'equip

S'ha emprat el dilatòmetre d'alta resolució ADAMEL LHOMARGY DT1000. Es tracta d'un equip típic per a realitzar anàlisi dilatomètric modern. Les variacions dimensionals de la mostra es transmeten a través d'una barra de sílice amorfa. Aquests variacions es mesuren a través d'un sensor transformador lineal de variable diferencial (LVDT) en una cambra que permet l'anàlisi en condicions de buit o atmosfera inerta (per a minimitzar l'oxidació i/o decarburització de la mostra durant l'escalfament a temperatures elevades). Una bomba primària és la que permet aconseguir un buit de l'orde de 10^{-1} PA.

El dilatòmetre està equipat amb un forn de radiació per a escalfar caracteritzat per una elevada velocitat de transferència d'energia a la mostra, una gran quantitat d'energia transferida i una baixa inèrcia tèrmica.

La temperatura es mesura amb un termoparell tipus K de 0,1mm de diàmetre soldat a la superfície de la mostra i el refredament es realitza a través d'un flux d'Heli que incideix directament sobre la mostra.

L'excel·lent eficiència de la transmissió de calor unida a la baixa inèrcia tèrmica del sistema, asseguren que les velocitats d'escalfament i refredament (el rang de les quals és de 0,003 a 500°C/s) es mantinguin constants durant els assajos. La corba dilatomètrica es monitoritza al llarg del cicle tèrmic amb l'ajuda d'un dispositiu electrònic assistit per ordinador.

La resolució de les mesures obtingudes és menor que 0,1mm.

S'han realitzat assajos de refredament continu a velocitats de refredament compreses entre 80 i 0,125°C/s, i amb condicions d'austenització de 1050°C durant 5 minuts per a l'acer 16MnNi4 i 1000°C durant 5 minuts per a l'acer 16Mn4.

II.3. DETERMINACIÓ DEL TAMANY DE GRA AUSTENÍTIC

II.3.1. Preparació de mostra.

Per a l'estudi del creixement de gra es realitza el tall amb una talladora STRUERS Labotom amb refrigeració per aigua i discos de tall de SiC a partir les planxes obtingudes per laminació en calent. Les mostres així preparades presenten unes dimensions de $1 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$.

Una vegada realitzat el tractament tèrmic es procedeix a la preparació de les peces per a l'estudi de cada un dels tres plans.

II.3.2. Tractaments tèrmics realitzats.

Una vegada obtingudes les peces de $1 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$ les mostres han estat austenitzades segons els temps i temperatures indicades en la Taula 1 en un forn HOBERSAL-CR32 de resistències de SiC i posteriorment refredades en aigua a Temperatura ambient.

		t (min)							
		5	10	15	30	60	90	120	180
T(°C)	1050	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1150	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1200	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1250	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1300	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Taula 1. Resum dels tractaments tèrmics d'austenització realitzats.

II.3.3. Processat de les imatges.

Una vegada s'han preparat les mostres els límits de gra són revelats per mitjà de l'atac amb reactiu a base d'una solució sobresaturada d'àcid pícric en aigua destil·lada, i es realitzen micrografies de l'estructura revelada.

Una vegada obtingudes les imatges dels límits de gra austenítics, es realitza una màscara amb paper de transparència on es dibuixen a través d'un procés de calcat els límits de gra.

Posteriorment es procedeix a escanejar les màscares amb un escàner HP ScanJet 5370C adaptat a un ordinador que permet el maneig de les imatges digitalitzades a través del programa Matrox Inspector 1.7.

El mètode emprat per a la determinació de la tamany de gra és el planimètric de Jeffries detallat en la norma ASTM E-112. Els diferents paràmetres determinats en cada cas són:

1. Nombre de grans per mm².

$$N_A = f \left(n_1 + \frac{n_2}{2} \right) \quad (\text{ec.1})$$

on: $f = \frac{(\text{magnificació})^2}{5000}$

n_1 = nombre de grans dins del cercle

n_2 = nombre de grans intersectats pel cercle.

2. Diàmetre mitjà en mm.

$$d = \frac{1}{(N_A)^{1/2}} \quad (\text{ec.2})$$

3. Tamany de gra ASTM.

$$G = 3.322 \times \log N_A - 2.95 \quad (\text{ec.3})$$

S'ha utilitzat una mitja de 200 grans per a caracteritzar cada mostra.

II.3.4. Determinació de la anormalitat de gra.

Les distribucions experimentals de tamany de gra quan es produeix creixement normal segueixen una distribució de tipus log-normal (Figura 2).

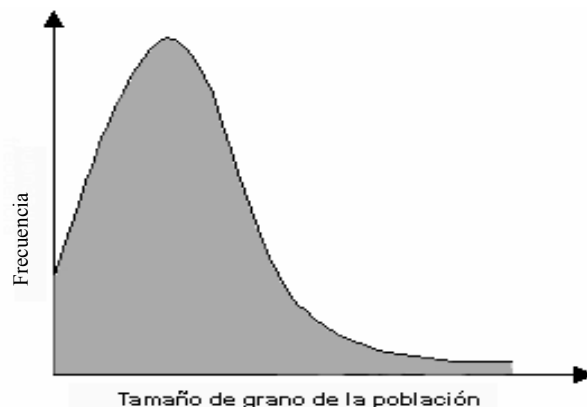


Figura 2. Representació del tamany de gra de la població en funció de la freqüència. S'observa que presenta una tendència normal.

Però també pot produir-se un creixement anormal, que teòricament genera una distribució de tipus bi-modal, tal com s'observa en la Figura 3. Encara que en la pràctica, els valors de tamany de gra anormal queden pràcticament integrats en la cua dreta de la distribució global per ser poc freqüents.

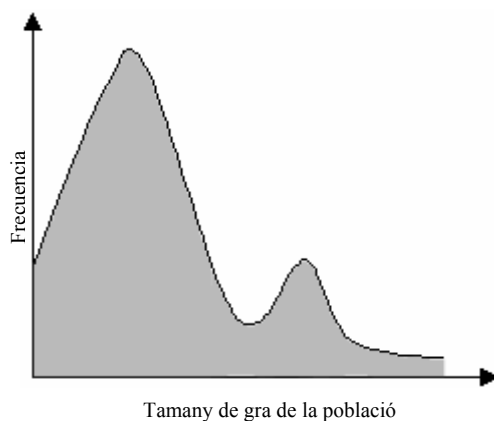


Figura 3. Representació del tamany de gra de la població en funció de la freqüència. S'observa que presenta una tendència bi-modal.

Més que mesurar el tamany de gra, la qual cosa té un interès pràctic és poder dilucidar quantitativament quan un gra és normal o anormal, és a dir, distingir les dos famílies de gra quan aquests són mesurats. Per tant per a efectuar una caracterització del tamany de gra anormal, s'ha de procedir a efectuar un estudi detallat de les cues de distribució dels tamanyes de gra de tota la mostra.

Un mètode adequat de caracteritzar la cua dreta de les distribucions consisteix a dividir la distribució global en dos, de manera que aquells grans el logaritme de tamany de gra dels quals sigui major que la mitjana de la distribució més dos vegades la desviació estàndard de la distribució logarítmica global són considerats inicialment com a candidats a ser grans anormals.

Cada distribució per tant queda caracteritzada per un valor de tamany de gra normal (TGNormal, corresponent al valor mitjà de la distribució) i per valor de tamany de gra anormal (TGANormal, sent la mitjana de la cua dreta de la distribució, és a dir, el conjunt de valors que supera el valor normal més dos vegades la seva desviació estàndard. En el cas que no es trobin grans que compleixin la condició d'anormalitat, TGAnormal s'associarà amb la tamany de gra màxim de la distribució global).

II.4. CARACTERITZACIÓ DE PROPIETATS MECÀNIQUES

II.4.1. Duresa i microduresa

La macroduresa dels acers s'ha mesurat amb un duròmetre CM4-50 que permet treballar amb càrregues d'1, 2, 5, 10, 20 i 50 Kg segons la norma UNIX 7-423/1. Els assajos s'han realitzat utilitzant una càrrega de 10 Kg sobre la superfície lliure de les mostres després d'un desbast i polit.

S'han realitzat també indentacions Vickers amb un microduròmetre MATSUZAWA MXT sota una càrrega de 300g aplicada durant 15 segons, sobre superfície polida.

II.4.2. Nanoindentació

S'han realitzat assajos de nanoindentació amb un equip Nanoindenter XP a diferents càrregues aplicades de 5, 10, 20, 50, 100 i 500 mN.

II.4.3. Tenacitat. Assaig Charpy

L'assaig Charpy s'ha dut a terme baix norma ASTM A370-8a (E23-88, EN 100045). Es tracta d'un assaig d'impacte dinàmic en que una mostra mecanitzada, a la que s'ha produït una entalla, es colpeja i trenca d'un sol cop, en una màquina especialment dissenyada perquè l'energia absorbida durant la ruptura es mesura directament.

a) Preparació de mostra

S'han mecanitzat 44 peces en direcció longitudinal a partir de cada un dels materials en estat original, o bé després de ser sotmesos a tractament tèrmic. Les dimensions de les peces són la que es mostren en la Figura 4 a les que s'ha realitzat una entalla en V.

A causa de la influència del procés de mecanitzat de l'entalla sobre els resultats obtinguts, s'ha prestat especial atenció en la introducció d'esta (s'ha emprat una serra de disc en V i lubricació base oli) i s'ha procedit a la inspecció i control del 100% de les entalles obtingudes.

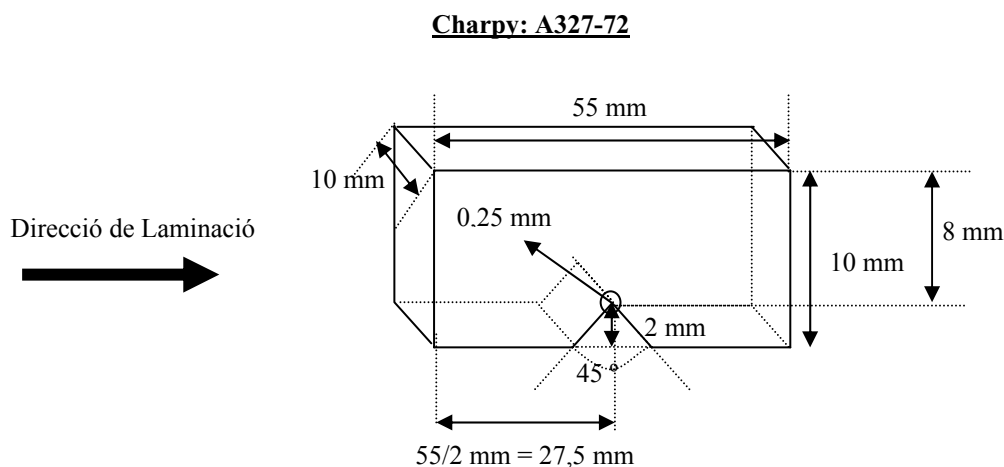


Figura 4. Dimensions de les peces de l'assaig Charpy

b) Descripció de l'equip

S'han dut a terme els assajos en un Pèndol Charpy que posseeix una maça de 300J tipus C. El procés que s'ha seguit per a cada peça és el següent:

- Immersió de les peces en un bany d'alcohol etílic i neu carbònica durant un temps de 15 minuts, per a garantir l'homogeneïtat de temperatura en les peces. La temperatura ha sigut controlada a través de termoparells tipus K.
- Posicionament de la peça en el suport del pèndol.
- Alliberament del pèndol, sense vibració, de manera que la mostra es trenca abans de 5 segons d'haver estat extreta del mig de refrigeració.

Els experiments es realitzen en dos exemplars per a garantir la reproductibilitat dels resultats.

Cal destacar que han estat tres els tipus de provetes assajades per a cada tipus d'acer, respecte a la seva microestructura:

TIPUS I: Microestructura inicial.

TIPUS II: Microestructura martensítica.

TIPUS III: Microestructura bainítica. Obtingudes en distintes condicions isotèrmiques amb l'objectiu d'establir diferències de comportament entre elles.

II.4.4. Límit Elàstic i Resistència Màxima

Ambdós paràmetres s'han calculat a través dels resultats obtinguts per mitjà de l'assaig de tracció realitzat segons norma ASTM E8M (EN 1002). L'assaig de tracció referit a l'estudi de productes d'acer, sotmet una mostra de material mecanitzada a examen, sota una càrrega quasi-estàtica determinada, suficient per a causar la ruptura.

a) Preparació de mostra

Es mecanitzen 18 peces en direcció longitudinal a partir de cada un dels materials font d'estudi, ja sigui en estat original o bé després de tractament tèrmic. La geometria i dimensions de les peces són les que es mostren en la Figura 5. Es tracta de mostres apropiades per a l'assaig d'aquests materials segons indica la norma ASTM-E8M.

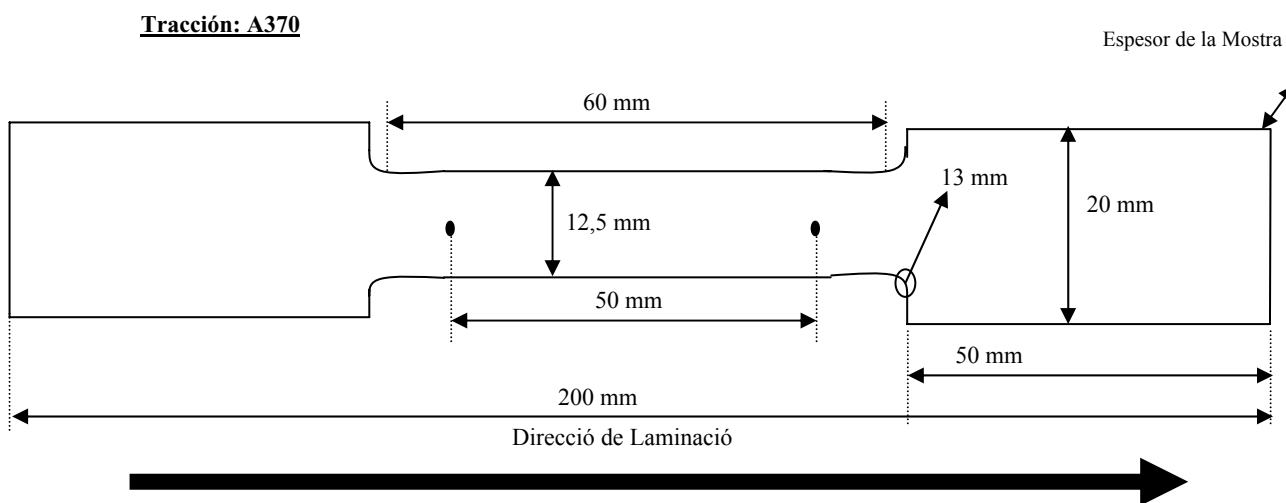


Figura 5. Geometria de les provetes de tracció

b) Descripció de l'equip

S'han dut a terme els assajos en una màquina de tracció electromecànica de doble columna amb cèl·lula de càrrega de 30KN la precisió de la qual és de $\pm 0,5\%$. El rang de velocitats d'aplicació de càrrega és de 0,0005 a 500mm/min, havent-se emprat en la present Tesi una velocitat de 1mm/min.

