

Projecte Final de Carrera

Enginyeria de Materials

Estudi del procés de tall per a la millora dels esbocats en materials AHSS

MEMÒRIA

Autor:

Jordi Escaler Sala

Directors:

Pau Solsona Mateos (UAB)
David Gutiérrez Castillo (CTM)

Convocatòria:

Febrer de 2011

El sotasignant, Dr. Pau Solsona Mateos, professor associat del departament de Física de la la Universitat Autònoma de Barcelona,

FA CONSTAR que ha fet el seguiment mitjançant tutories del treball de final de carrera concloent a la titulació d'Enginyeria de Materials titulat "Estudi del procés de tall per a la millora dels esbocats en materials AHSS " de l'alumne Jordi Escaler Sala.

Al mateix temps considera que és apte i autoritza el projecte per la seva presentació i posterior defensa.

I per que així consti, signo el present escrit, a Bellaterra, 3 de Febrer de 2011.

Índex

Índex	1
1.- Introducció	3
1.1- L'ús de l'acer a l'automoció	3
1.2- La problemàtica actual	5
1.2.1- Antecedents	5
1.2.2- La necessitat d'abordar el projecte	7
1.3- Objectiu	8
1.4- Finalitat	9
2.- Estat de l'art	9
2.1- Acers AHSS	9
2.1.1- Tipus de AHSS	10
2.1.2- Descripció d'acers DP (Dual Phase)	12
2.1.3- Descripció dels acers MART o MS (Martensítics)	13
2.2- Punxonat i esbocat	14
2.3- Tall per aigua	18
3.- Fase experimental	20
3.1- Materials	20
3.2- Procés de Punxonat i esbocat	21
3.3- Preparació de provetes per microestructura i microdureses	25
3.3.1- Microestructura (Anàlisi de rebava)	26
3.3.2- Dureses	27
3.4- Nanoindentació	28

4.- Resultats experimentals i anàlisi de resultats	33
4.1- Ràtios d'esbocat	33
4.2- Microestructura (Anàlisi de rebava)	39
4.3- Dureses	44
5.- Pressupost	57
6.- Impacte ambiental	58
6.1- Indicadors del impacte ambiental.	58
6.2- Impacte ambiental per consums	59
6.2.1- Consum elèctric.	59
6.2.2- Movilitat	61
6.3- Resum final	62
7.- Conclusions	63
8.- Bibliografia	64
9.- Resum del projecte	67

1.- Introducció

1.1.- L'ús de l'acer a l'automoció

El sector de l'automoció és el segon mercat de l'acer després de la construcció i l'obra pública. Xassís i carrosseria, peces del motor, la direcció o la transmissió, el sistema d'escapament, etc., són d'acer, amb el que aquest representa del 55 al 70% en pes del vehicle.

Els acers presenten els següents avantatges respecte altres aliatges més lleugers com les aleacions d'Alumini, Titani i les resines epòxi.

- L'acer té una bona embotibilitat en elements de carrosseria.
- Presenta una bona soldabilitat en comparació amb l'alumini i el titani.
- És fàcilment reciclable.
- És econòmic.

En els últims anys, el sector automobilístic està experimentant importants canvis en quant a les exigències dels nous models: més seguretat en les proves d'impacte però amb un menor pes per aconseguir una reducció de consum i en conseqüència menys emissions. Per assolir totes aquestes exigències de mercat s'estan incorporant els acers (AHSS, *Advanced High Strength Steels*), que per les seves bones característiques mecàniques permeten reduir els gruixos en peces de carrosseria, tals com els muntants B, muntants A, taloneres, reforços laterals, etc., Fig.1.1.

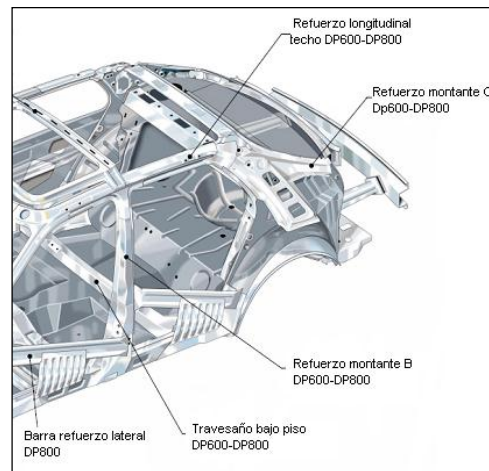


Fig.1.1- Aplicacions DP en acers estructurals de l'automòbil [2].

Els acers d'alta resistència (HSS) es caracteritzen per presentar valors de límit elàstic entre 450 i 550 MPa. Per sobre d'aquests acers, des del punt de vista mecànic hi trobem els acers avançats d'alta resistència mecànica (AHSS) o acers de ultra alta resistència, el límit elàstic dels quals és superior a 700 MPa.

L'elevada resistència en aquests acers fa factible el desenvolupament de dissenys eficients en termes de massa, que economitzen el consum de combustibles, i de manera simultània, generen un increment en la resistència als impactes i col·lisions. A diferència de molts altres materials competitius, els AHSS poden complir amb aquests objectius sense causar un augment del cost total pel fabricant. (Alguns dissenys conceptuals de vehicles complets i dissenys conceptuals de sistemes han presentat un estalvi del 25% en termes de massa, sobre aquells dissenys convencionals actuals que utilitzen acers d'alta resistència).

L'història dels acers d'alta resistència per aplicacions estructurals de components d'automòbils s'il·lustra en la Fig.1.2, on s'indica aproximadament la data d'aparició en el mercat Europeu del primer

grau industrial de cada acer. S'aprecia que el desenvolupament dels acers d'alta resistència és previ al 1980.

Els acers DP van esser els primers AHSS en desenvolupar-se, però el seu ús industrial, igual que els acers TRIP no comença fins al 1995, impulsat pel consorci ULSAB (*Ultra Light Steel Automotive Body*, és a dir xassís ultralleuger d'acer) [1].

L'objectiu del consorci ULSAB era fabricar xassís lleugers amb acer, reduint els gruixos dels seus components mitjançant el desenvolupament d'acers de major resistència mecànica. Els resultats del projecte ULSAB [2] arriba a una implementació a nivell industrial a mitjans dels anys 90.

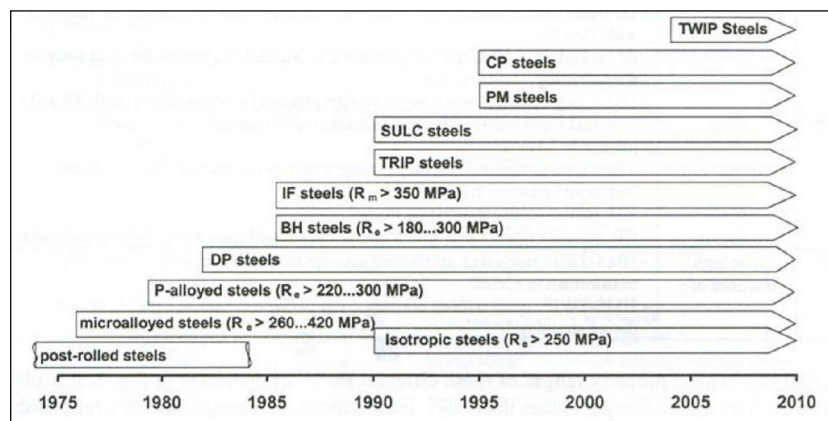


Fig.1.2- Evolució històrica del desenvolupament d'acers d'alta resistència [2].

1.2.- La problemàtica actual

1.2.1.- Antecedents

L'elevada resistència mecànica d'aquests acers avançats, obliga a utilitzar majors pressions durant el conformat i en general augmenta la dificultat de tot el procés. Entre els principals problemes associats a la incorporació dels AHSS es troba el desgast molt més sever dels

útils de conformat, inclús la seva ruptura prematura després de la fabricació de poques peces. Un altre problema de molta importància és la forta recuperació elàstica posterior al conformat (*Springback*) [3], generada pel seu alt límit elàstic. A més, la contínua evolució del sector de l'automoció està exigint operacions de conformat altament complexes per les sol·licitacions mecàniques a què es sotmeten els utilatges.

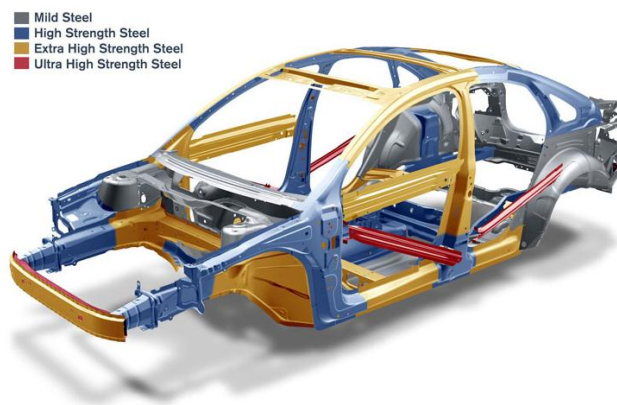


Fig.1.2- Elements d'un automòbil fabricats amb acers d'alta resistència. (Font: Stahl Informations Zentrum).

Els principals problemes d'implementació d'aquests acers son:

- El trencament de les eines a causa dels elevats requeriments de tonelatge necessaris per la formació de peces.
- El desgast de les eines: els inserts endurits (casquets, contraplaques) i els fils de les fulles de tall poden desgastar-se en el transcurs d'una sola producció a causa de la duresa dels materials AHSS, semblant a la duresa del material amb que està fet el troquel.

- Problemes de qualitat en les dimensions de les peces que sorgeixen a causa de la recuperació elàstica (*springback*) associat a la alta resistència, i amb l'augment de sensibilitat en el procés per la variabilitat en les propietats del material a nivells superiors de resistència.
- La manca de dades metal·lúrgiques detallades del acer, per donar suport en les simulacions del procés de conformat i d'aquesta manera assegurar la continuïtat en l'ús del mateix material a través de tot el procés de desenvolupament i proves; el que ajudaria molt a disminuir els errors al predir l'efecte de la recuperació elàstica (*springback*).

1.2.2.- La necessitat d'abordar el projecte

Els acers d'alta resistència es plantegen com a potencials candidats per aquelles aplicacions on s'hagi d'optimitzar la relació resistència-pes i hagin de ser fabricats amb materials metàl·lics. Tot i les seves excel·lents perspectives, la seva efectiva i ràpida implementació depèn en gran mesura de la capacitat de les indústries del sector metal·mecànic per conformar-los i fabricar correctament components amb aquests materials.

A partir de diversos problemes que apareixen durant les etapes de conformat al treballar amb aquest tipus d'acers (els AHSS), varies indústries estableixen un conveni per l'estudi exhaustiu dels problemes que es produeixen amb la finalitat de trobar solucions i d'aquesta manera seguir amb l'evolució i implementació d'aquests acers en el mercat.

El present projecte es desenvolupa a la Fundació CTM Centre Tecnològic on es porta a terme part d'aquest gran projecte sobre conformat de xapes amb AHSS.

Per realitzar aquestes tasques, és necessari un bon coneixement de les propietats mecàniques de cada material, ja que permeten predir mitjançant la simulació com actuarà el material davant dels diferents processos als que serà sotmès i consegüentment, seran les que determinin les possibilitats i límits de cadascun dels materials.

Aquest projecte, pretén valorar la capacitat que tenen alguns materials per a ser esbocats i quina és la millor manera d'aconseguir una qualitat òptima i amb garantia per la seva industrialització.

1.3.-Objectiu

L'objectiu principal d'aquest projecte és estudiar el procés de tall per a la millora dels esbocats en materials AHSS (*Advanced High Strength Steels*).

Per assolir aquest objectiu principal ens plantejem els següents objectius secundaris.

- Estudi de les toleràncies de tall i afectació al resultat de l'esbocat.
- Estudi del procés de tall per aigua i afectació al resultat de l'esbocat.
- Comparació dels diferents mètodes de tall.
- Anàlisi dels resultats en funció de la microestructura i les propietats mecàniques dels processos de tall.

1.4.-Finalitat

La finalitat dels objectius anteriors be donada per la necessitat de conèixer la raó per la qual els materials tenen o no una bona resposta a ser esbocats en determinades condicions de tall.

Aquest coneixement ens serà de gran utilitat a l'hora de l'elecció de determinat material per aplicacions en que s'hagi d'efectuar alguna operació d'esbocat.

2.- Estat de l'Art

2.1.- Acers AHSS

La principal diferencia entre els acers convencionals (HSS) i els acers avançats d'alta resistència o Advanced High Strength Steels (AHSS) es troba en la seva microestructura [4].

Els HSS son acers que tenen una única fase, la ferrítica. En canvi, els AHSS son acers que tenen una estructura formada per diferents fases, segons el tipus de AHSS. Aquests poden contenir ferrita, martensita, bainita i austenita retinguda en quantitats suficients per produir unes propietats mecàniques úniques. Alguns d'aquests AHSS tenen una major capacitat d'enduriment per deformació o treball en fred. Aquesta alta capacitat d'enduriment per deformació permet augmentar la resistència mecànica de la xapa d'acer sense reduir la seva conformabilitat, inclús augmentar-la, al resistir millor l'estricció localitzada durant el conformat.

La bona combinació de resistència i conformabilitat dels acers AHSS s'aconsegueix gràcies a la combinació controlada de fases estables i metastables en una microestructura final, la que es veu significativament modificada en el procés de conformat.

Aquests materials són relativament tous i augmenten la seva resistència al ser deformats, essent per tant, fàcilment conformables i extremadament resistents una vegada han estat deformats (de l'ordre de 4 a 5 vegades més que un acer convencional). A més, gràcies a la seva capacitat de guanyar resistència amb la deformació, poden ser embotits amb menor risc de ruptura, ja que les zones més deformatades o amb més tendència a trencar-se, són les que més resistència desenvolupen.

2.1.1.- Tipus de AHSS

Els acers AHSS, Fig.2.1, més comuns són els DP, TRIP, CP i MART o MS [5]. En els acers DP (*Dual Phase*) el terme dual prové de la coexistència de illes de martensita o bainita dins d'una matriu de ferrita. Els acers TRIP (*Transformation Induced Plasticity*) es caracteritzen per presentar com a mecanisme d'enduriment per deformació la transformació d'austenita a martensita induïda per el camp de tensions generat a alts nivells de deformació. La seva microestructura consisteix en una matriu ferrítica que conté una dispersió de martensita i bainita, juntament amb una fracció d'austenita retinguda, entre el 5 i el 20%.

Els acers CP (*Complex Phase*) presenten una microestructura molt fina de ferrita amb una elevada fracció volumètrica de fases dures que s'endureixen per precipitació de fins intermetàl·lics (precipiten petits carburs amb micoaleants com el Ti).

Per fabricar els acers MART o MS (Martensítics) l'austenita present durant la laminació en calent, es transforma totalment en martensita durant el refredament. Són els acers de major resistència per conformat en fred, arribant fins als 1400 MPa de ruptura màxima.

Més enllà d'aquests nivells es situen els acers de conformat en calent, on l'austenita es transforma totalment en martensita durant el tremp que segueix a l'operació de conformat a alta temperatura (800-900°C). Entre els acers de conformat en calent destaquen els acers al Bor, amb una resistència del ordre de 1500 MPa (el Bor, desplaça la corba CCT i aconsegueix una millor templabilitat i l'obtenció de fase martensítica sense fase bainita). Els acers AHSS es solen denominar per les seves sigles seguides del seu valor mínim de resistència a ruptura (DP780, DP980, etc).

En la figura Fig.2.1 es classifiquen els acers d'alta resistència en funció de la seva conformabilitat en termes d'allargament a ruptura, de resistència mecànica i de resistència a ruptura.

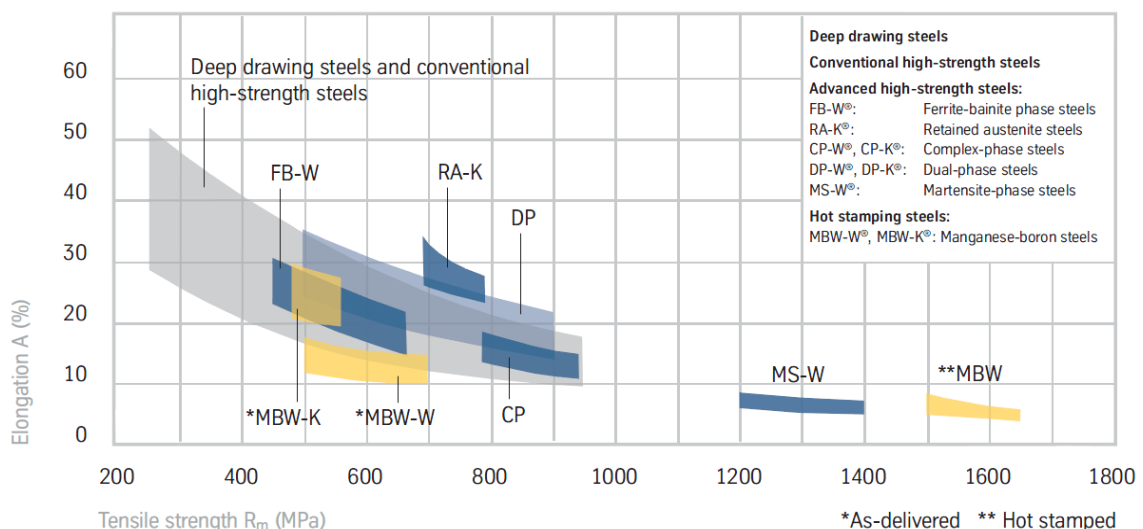


Fig.2.1- Diverses famílies d'acers segons el comportament mecànic. (Font: ThyssenKrupp).

2.1.2.-Descripció de l'acer DP (*Dual Phase*)

Els acers de doble fase o DP, com s'ha comentat en l'apartat anterior, consisteixen en una matriu de ferrita que conté una segona fase de martensita en forma de illes. Generalment incrementant la fracció en volum de segones fases dures s'incrementa la resistència del material.

Els acers DP, són produïts mitjançant el control de refredament a partir de la fase austenita (per productes elaborats mitjançant laminat en calent) o des de la doble fase, ferrita amb austenita (per productes laminats en fred amb recuit continu o amb tremp en calent, per transformar part de l'austenita a ferrita abans que el refredament ràpid transformi l'austenita restant en martensita.

Depenent de la composició i el procés d'obtenció, els acers laminats en calent requereixen d'una millora de la seva capacitat de resistència a l'allargament, pot ser doncs que la microestructura contingui quantitats significants de bainita.

En la Fig. 2.2 s'observa un esquema de la microestructura típica d'un acer DP, matriu de ferrita i illes de martensita. La fase tova de ferrita és generalment continua, aportant en aquests materials una excel·lent ductilitat. Quan aquest acer es deforma, la deformació es concentra en la fase ferrita al voltant de les illes de martensita, creant un alt rendiment en el treball d'enduriment exhibit per aquests acers.

Ferrite-Martensite DP

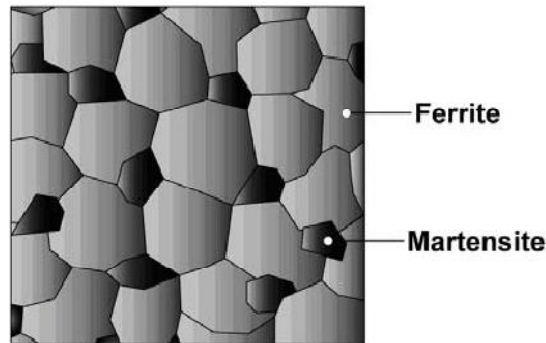


Fig.2.2 - Esquema de la microestructura d'un acer DP; es veuen il·lustrades les illes de martensita en la matriu de ferrita.

2.1.3- Descripció dels acers MART o MS (Martensítics)

Els acers martensítics estan caracteritzats per tenir una matriu de martensita contenint petites quantitats de ferrita i/o bainita, Fig.2.3. Dins dels acers AHSS són els que posseeixen una major resistència mecànica. Són fabricats a partir d'un ràpid refredament perquè es produeixi la transformació d'austenita a martensita.

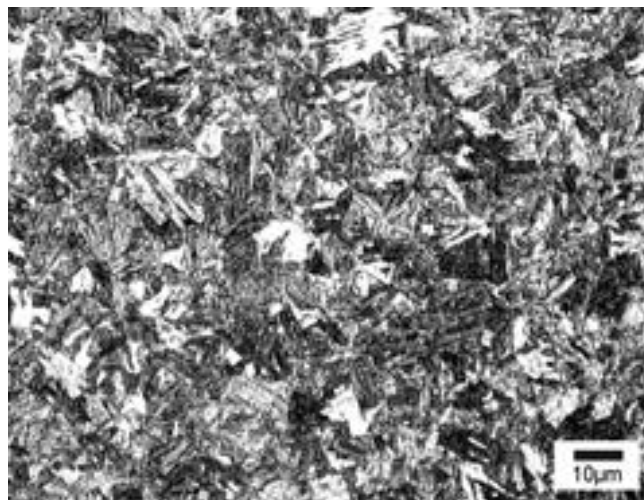


Fig.2.3- Microestructura acer MS amb matriu martensítica.

A partir del següent gràfic, Fig.2.4, considerem que els materials amb un Límit elàstic superior a 1000 MPa estarien dintre dels acers martensítics.

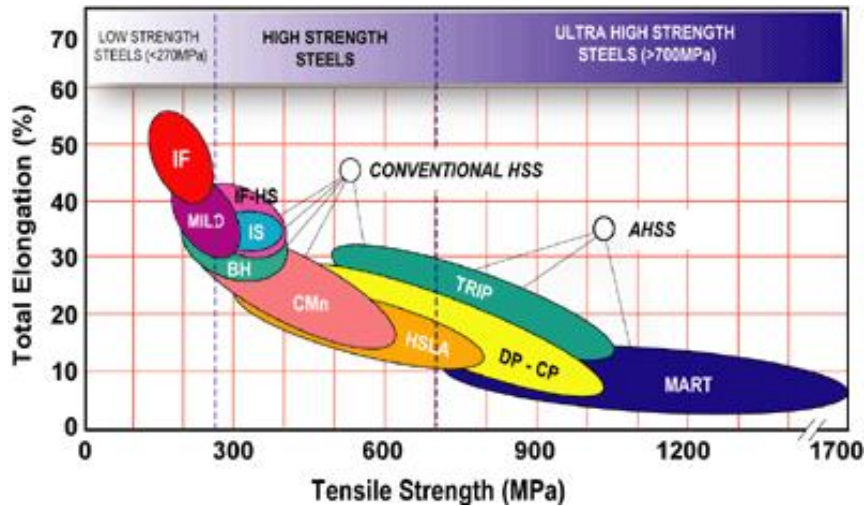
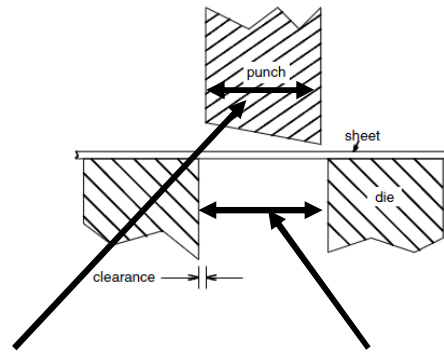


Fig.2.4 -Classificació d'acers AHSS en funció de la seva conformabilitat [5].

2.2.- Punxonat i esbocat

Els mètodes moderns durant la fabricació de components de l'automòbil, ja siguin llantes, peces de suspensió i components estructurals amb xapa d'acer impliquen principalment: processos de tall, doblegat i operacions d'embotició.

Definim el punxonat, com aquell procés bàsic de tall mitjançant un esforç mecànic utilitzant un punxó i un contrapunxó. El punxó, de geometria determinada, permet realitzar el forat (troquelat) i el contrapunxó o contramotlle, ens evitarà la deformació de la peça, Fig.2.5.



Diàmetre del punxó

Diàmetre del casquet de tall

Fig.2.5 – Esquema d'una matriu de tall o punxonat [9]. Indicat el diàmetre del punxó de tall i el diàmetre del casquet de tall.

Una de les falles freqüents durant les operacions d'estampat són les esquerdes nucleades a les vores que han estat troquelades en operacions anteriors (punxonat). La determinació de la resistència de les vores cisallades es porta a terme mitjançant assajos de creixement d'orificis que han estat anteriorment troquelats en la xapa (esbocat).

L'assaig d'expansió de forat (*Hole Expansion Test*) és un dels millors mètodes per avaluar la idoneïtat de la xapa d'acer per a la formació d'aquestes "ales", ja que s'assembla molt al procés que s'utilitza en condicions de producció, Fig. 2.7.

L'interès d'aquest assaig radica en que el creixement límit disminueix amb l'augment de resistència de la xapa i es mesura mitjançant la relació:

$$\lambda(\%) = \left[\frac{d - d_0}{d_0} \right] \times 100$$

on d_0 diàmetre inicial del forat i d diàmetre final del forat (una vegada ha estat esbocat, en el nostre cas sempre serà 30 mm)

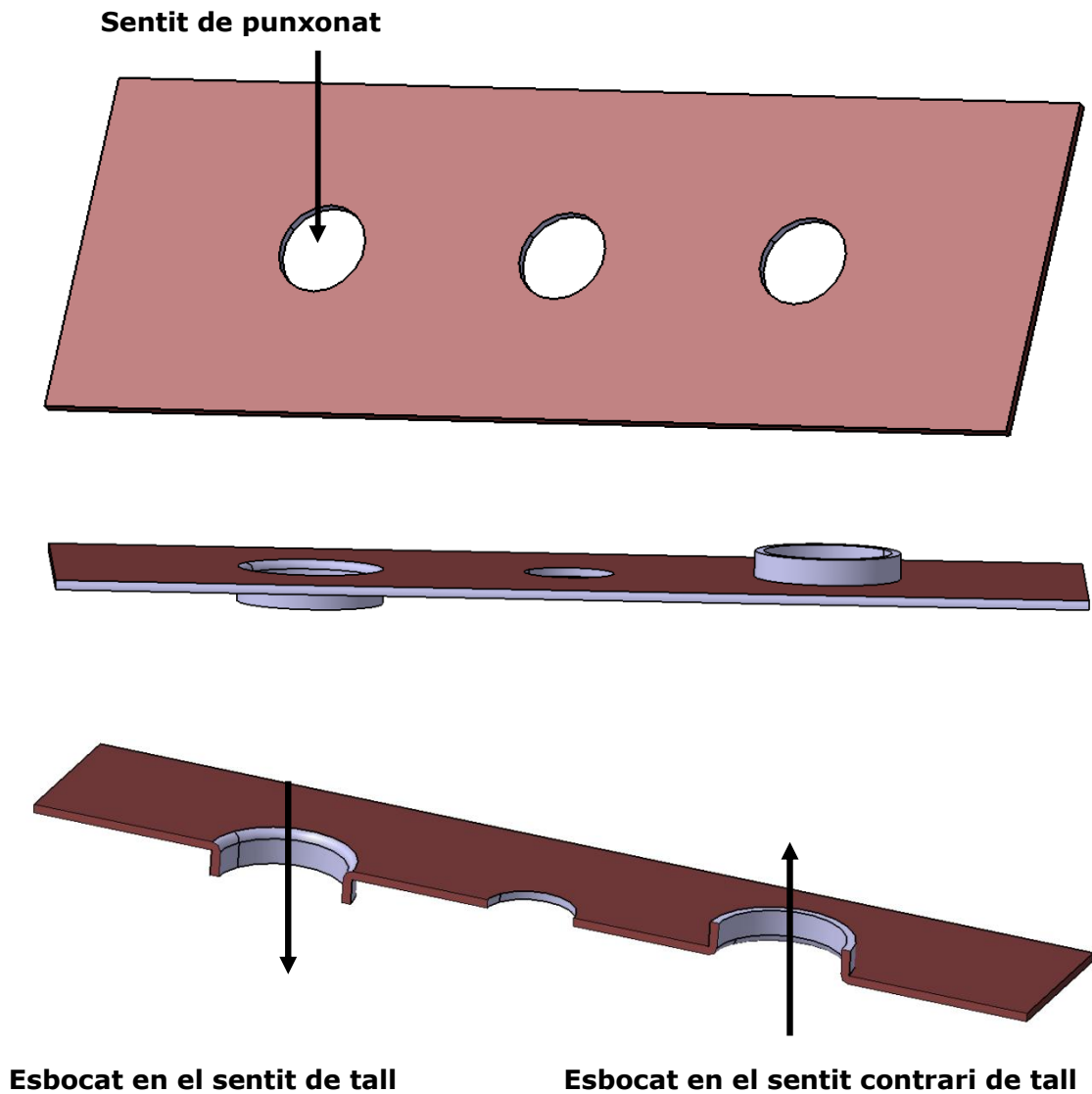


Fig.2.6 - Esquema de l'assaig de punxonat i esbocat.

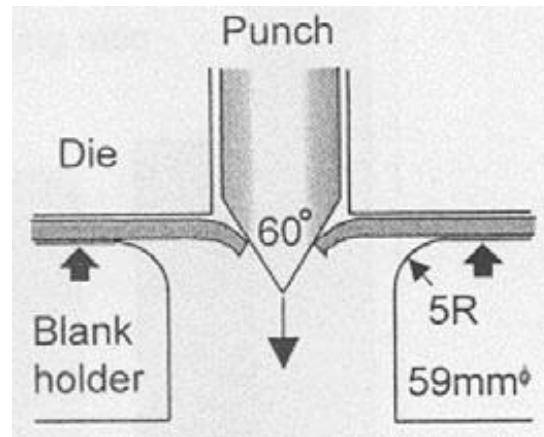


Fig.2.7 - Esquema de l'assaig de eixamplament d'orificis (Hole Expansion Test) [9].

Durant el procés de tall mitjançant punxonat, es distingeixen varies àrees a la zona de tall tal i com es mostra a la Fig.2.8. Aquestes àrees tenen més o menys importància en funció de la tolerància de tall, per tant analitzant la zona fracturada, podríem ser capaços de saber quina ha estat la tolerància en la que s'ha tallat la peça.

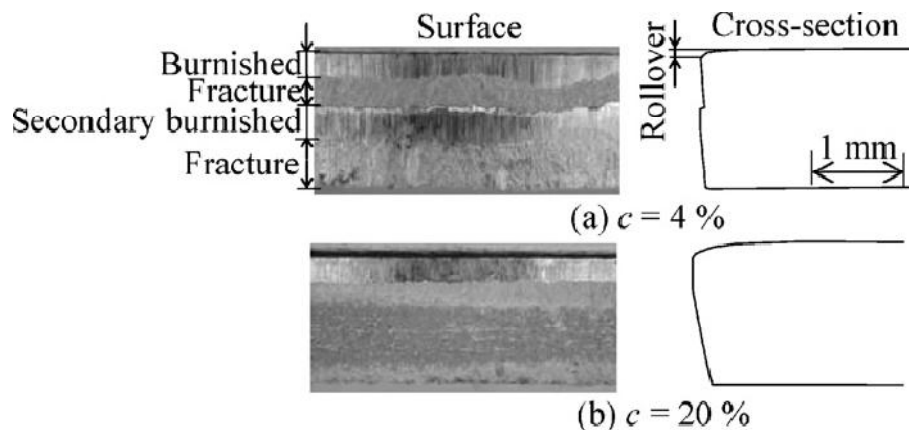


Fig.2.8 – Esquema de les diferents àrees en la zona de tall [10].

Una d'aquestes àrees, es l'anomenada rebava o *burr*, tal i com es mostra a la Fig.2.9. La rebava és la zona que queda deformada a la part inferior del tall una vegada realitzat el punxonat.

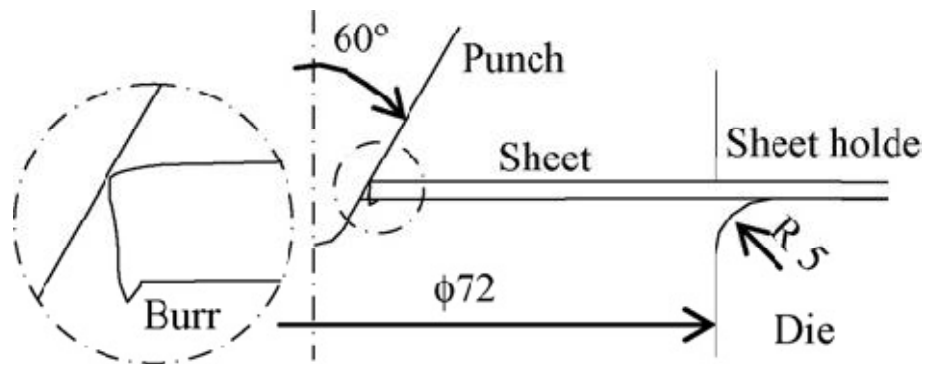


Fig.2.9 – Esquema de formació de les rebaves en el procés de tall [10].

2.3.- Tall per aigua

Hi ha diferents processos industrials, alternatius al tall per punxonat: tall per làser; tall per aigua; oxitall... En aquest projecte s'han realitzat proves amb tall per aigua ja que les seves propietats s'ajusten al que es vol observar en els resultats dels nostres assaigs.

El tall per aigua, talla en fred i per erosió, produint una excel·lent qualitat en els marges dels materials tallats, sense zones afectades per l'inducció del calor ni pel desgast mecànic.

El tall per aigua s'obté fent impactar un flux d'aigua amb abrasiu de pocs mil·límetres de diàmetre a pressions que superen els 4000 bars.

Aquesta tecnologia va tenir la seva primera aplicació als anys 70, destaca perquè durant el procés de tall no afecta a la microestructura dels materials: no els escalfa, no els endureix ni els deforma no és sensible a la resistència química del material i no preocupa si el material és òpticament reflectiu o elèctricament conductor [13].

Es tracta d'un tall lliure de tensions i d'una tecnologia molt neta i eficient. També és un procés molt útil perquè no es desaprofita material ja que es pot optimitzar molt el tall entre peces. La utilització de més d'un capçal, augmenta la productivitat del procés.

El procés dirigeix l'aigua a una velocitat de 1000 m/s gràcies a un intensificador de pressió de fins a 4000 bars. Cap altre màquina talla tant amplia varietat de materials i és un procés sense límits en gruixos. No té problemes amb materials refractaris.

Aquest procés contempla aplicacions de tall d'una, dos i tres dimensions. Dins d'aquest últim grup, podem distingir les aplicacions robotitzades i les taules de tall on a l'eix Z se li suma un eix de rotació i gir. Les aplicacions robotitzades són capaces de tallar materials per automòbils ja que poden ser útils on les premses no són accessibles. La Fig. 2.10 mostra una imatge d'un forat tallat per tall per aigua.



Fig.2.10- *Imatge del forat tallat amb tall per aigua*

3.- Fase experimental

3.1.- Materials

Per l'elaboració del present projecte, hem seleccionat 5 acers avançats d'alta resistència: DP780; DP980; DOCOL1000; DOCOL1200 i MSW1200. Amb la finalitat de poder determinar i comparar les seves propietats davant de l'operació d'esbocat. El nom del material acompanya el valor de resistència màxima segons el sistema de classificació d'acers utilitzat per el programa ULSAB-AVC (*Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concepts*). Els acers DP i DOCOL són acers laminats en fred, mentre que el MSW1200 és un acer laminat en calent.

A la taula, Fig.3.1. es detalla les composicions químiques d'aquests materials:

	Aleants										
Provetes 2mm	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Ni	Al%	%Nb	Ti%
DP780	0,130	0,209	1,892	0,023	<0,001	0,179	0,008	0,037	0,026	0,011	0,021
DP980	0,144	0,221	1,837	0,016	<0,001	0,176	0,010	0,032	0,029	0,011	0,020
DOCOL1000	0,165	0,478	1,555	0,012	0,001	0,050	0,005	0,045	0,046	0,024	0,003
DOCOL1200	0,138	0,205	1,450	0,008	0,001	0,033	0,017	0,038	0,046	0,022	0,002
MSW1200	0,113	0,091	1,449	0,018	<0,001	0,202	0,025	0,057	0,032	0,011	0,039

Fig.3.1- Composicions químiques dels materials utilitzats en el projecte.

Per tal de poder entendre més bé els resultats obtinguts en el procediment experimental del projecte, la taula, Fig. 3.2. mostra les propietats mecàniques bàsiques d'aquests materials.

	Propietats Mecàniques			
	Límit Elàstic [MPa]	Resistència Max. [MPa]	Def. a ruptura [%]	η_{global}
DP780	517	757	21	0,163
DP980	730	965	15	0,138
DOCOL1000	785	1045	12	0,134
DOCOL1200	1079	1204	6	0,102
MSW1200	1110	1266	7	0,102

Fig.3.2- Propietats mecàniques dels materials estudiats.

3.2.- Procés de punxonat i esbocat

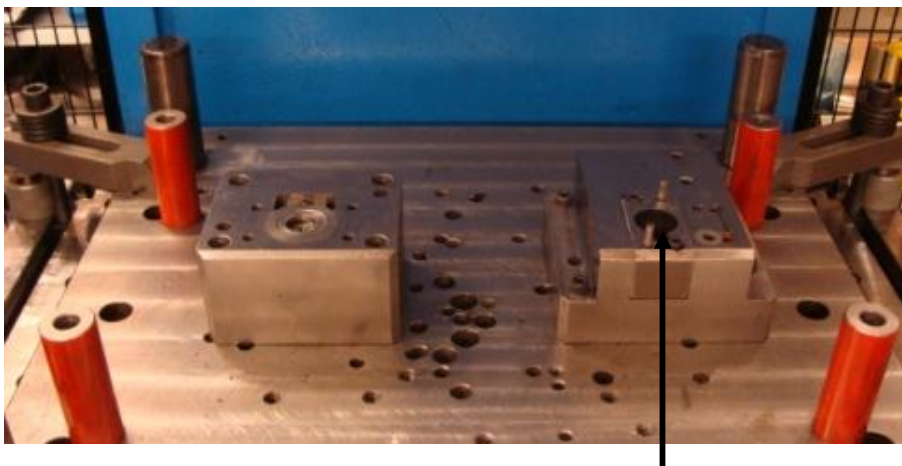
Per la realització de tots els assajos de punxonat i esbocat, hem utilitzat la premsa hidràulica de 150 Tn del CTM, Fig. 3.3.



Fig.3.3- (a) Premsa hidràulica; (b) detall matriu d'esbocat / punxonat.

El procediment una vegada tenim les provetes (de 240 mm x 80 mm x 2 mm de gruix) dels 5 diferents materials tallades ha estat el següent:

Es col·loca el punxó de tall de diàmetre major (d23), Fig. 3.4. I col·locar el casquet de tall amb la tolerància del 20%. Una vegada realitzats tots els punxonats dels materials en aquesta tolerància es canvia el casquet de tall i es col·loca el de tolerància del 12%. Realitzarem altre vegada tots els assajos. Per últim col·loquem el casquet de tolerància 5% i repetim els assajos, per als diferents diàmetres tal i com s'indica a la taula següent, Fig.3.5.



Casquets de tall

Fig.3.4- Contraplaca de la premsa esbocat / punxonat on s'intercanvien els diferents casquets amb les diferents toleràncies.

En la primera fase experimental es realitzen els assajos de punxonat i esbocat amb diferents toleràncies de tall (5%; 12% i 20%).

Es defineix tolerància de tall:

$$\text{Tolerància de tall} = \frac{\text{Diferència de diàmetres}}{2 \cdot \text{Diàmetre}} * 100$$

Una vegada realitzats tots els assajos amb el diàmetre de 23 mm, es canvia el punxó i es realitza el mateix exercici amb el diàmetre 21 mm. Fig.3.5. Es procedirà de la mateixa manera amb el punxó de

diàmetre 19 mm i amb el de 17 mm en els materials que hagin superat l'esbocat en el diàmetre superior.

D esbocat (mm)	D punxó (mm)	Toleràncies	D matriu (mm)	Ràtio esbocat
30	23	T=5%	23,20	1,30
		T=12%	23,48	
		T=20%	23,80	
30	21	T=5%	21,20	1,43
		T=12%	21,48	
		T=20%	21,80	
30	19	T=5%	19,20	1,58
		T=12%	19,48	
		T=20%	19,80	
30	17	T=5%	17,20	1,76
		T=12%	17,48	
		T=20%	17,80	

Fig.3.5- Taula de característiques dels diferents diàmetres de tall i de les diferents toleràncies.

Es realitzen tots els esbocats amb un punxó en forma de punta de bala i de diàmetre 30 mm, Fig. 3.6.

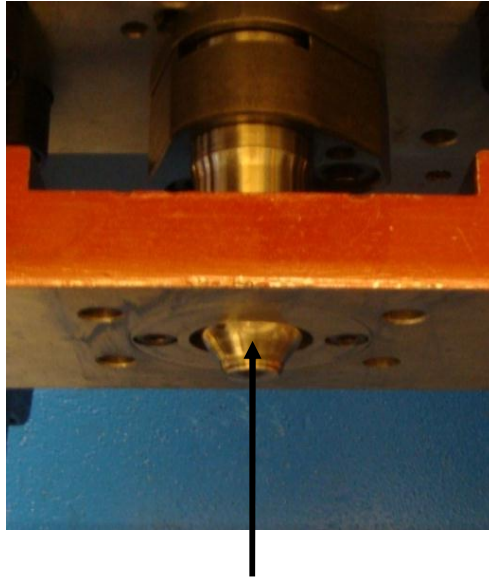


Fig.3.6- Punxó en forma de punta de bala muntat a la premsa. .

El que es vol aconseguir amb tots aquests assajos és veure quin és el ràtio d'esbocat per cadascun dels materials en cadascuna de les condicions de tall, és a dir, l'alçada màxima d'esbocat sense fractura.

S'ha anomenat ràtio d'esbocat a la relació següent:

$$\frac{\text{Alçada màxima d'esbocat}}{\text{D23}} = \frac{\text{Ràtio d'esbocat}}{\text{Ràtio d'esbocat}} = \frac{\text{Ràtio d'esbocat}}{\text{Ràtio d'esbocat}}$$

En els gràfics següents es parla de ràtio <1.3 en aquells casos en que el material punxonat a D23 no s'ha aconseguit un esbocat sense fractura. Al estar per sota del ràtio mínim assajat es considera d'aquesta forma que el valor és inferior a 1.3 sense saber quin és el valor real.

Els resultats obtinguts en aquest apartat es mostren a continuació juntament amb algunes de les imatges representatives (la resta d'imatges s'inclouen a l'annex del projecte).

Com a mètode alternatiu al procés de tall mitjançant punxonat, s'han tallat algunes provetes amb tall per aigua per veure si es milloren els resultats a l'hora d'esbocar ja que l'influència de l'enduriment del material suposadament és menor.

3.3.- Preparació de mostres per microestructura i microdureses

Una vegada realitzats tots els punxonats i esbocats segons el procés anteriorment detallat, es procedeix a fer un anàlisi microestructural d'algunes de les mostres assajades per intentar veure el perfil de la mostra una vegada realitzat el tall i per posteriorment realitzar un estudi de dureses Vickers 0,2Kg.

A continuació es mostra el procés d'obtenció de les mostres, Fig.3.7.

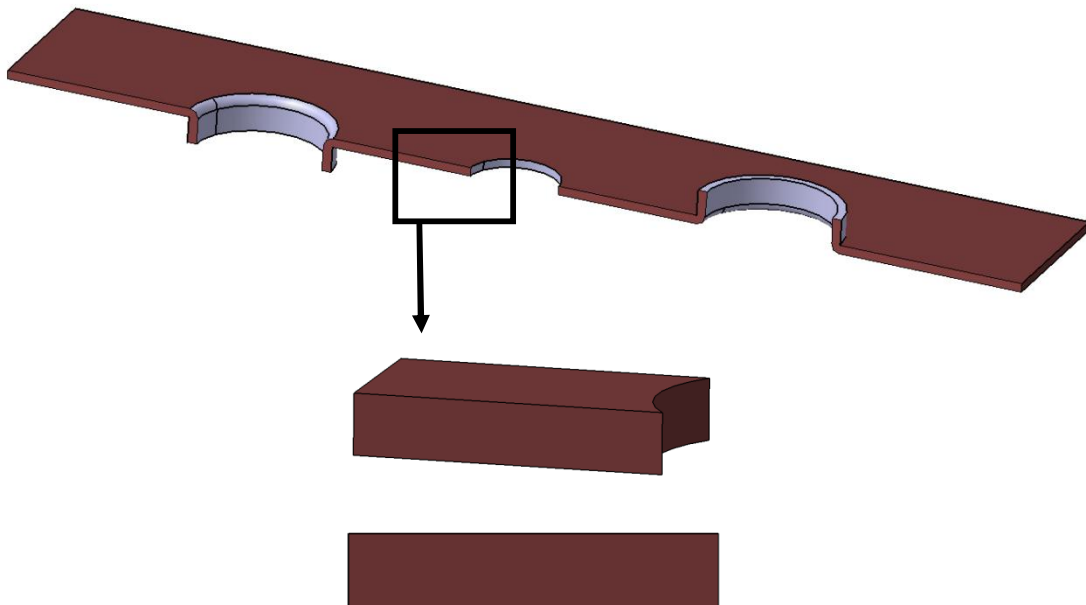


Fig.3.7.- Esquema d'obtenció de les mostres per analitzar.

Imatges de les provetes una vegada han estat punxonades i esbocades i una imatge de les provetes ja preparades per l'anàlisi microscòpic i per realitzar les dureses, Fig. 3.8.

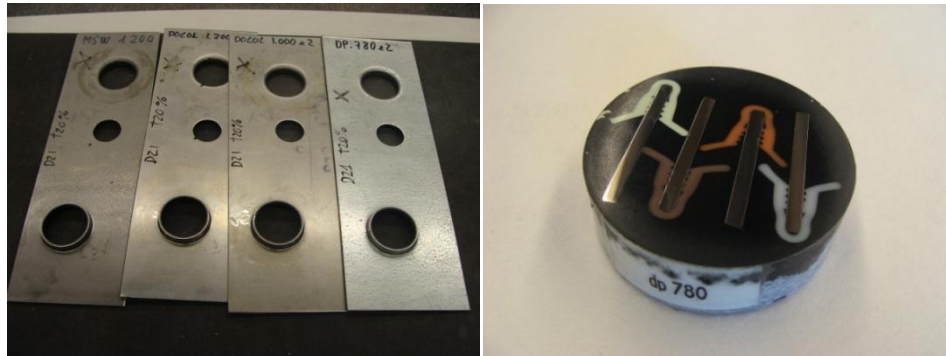


Fig.3.8.- (a) Imatge de 4 provetes punxonades i esbocades; (b) imatge de la mostra de baquelita per mirar al microscopi.

3.3.1. Microestructura (Anàlisi de rebava)

En aquest apartat s'han analitzat mitjançant microscòpia òptica diferents mostres per veure quina és l'influència de la tolerància en el procés de punxonat en la geometria de les mostres. La Fig. 3.9. mostra els diferents microscòpics òptics (Olympus i Nikon) del laboratori del CTM on s'han observat les microestructures.



Fig.3.9.- Microscòpics òptics del laboratori del CTM.

3.3.2. Dureses

Per realitzar l'estudi d'empremtes de duresa de les mostres seleccionades, utilitzarem un perfil de dureses HV a 0.2Kg de càrrega, per tal de poder realitzar més petges i per tant obtenir un perfil més exacte. La creació de les petges ha estat segons esquema adjunt, Fig. 3.10., per tal de poder crear mes mesures en l'espai desitjat.

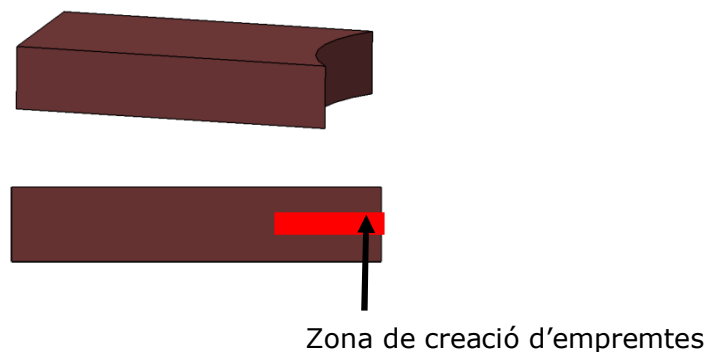


Fig.3.10.- Esquema de la zona de creació de les empremtes Vickers.

La Fig 3.11. mostra el microduròmetre Futuretech emprat per realitzar les dureses als laboratoris del CTM.



Fig.3.11.- Microduròmetre del laboratori del CTM.

3.4.- Nanoindentacions

Aquest apartat experimental ha estat realitzat conjuntament amb la responsable de Nanoindentacions del Departament de Tractament de Superfícies del CTM. Per les mesures s'ha utilitzat el Mètode de Oliver & Pharr [6].

Aquest és el mètode utilitzat convencionalment en nanoindentació per extreure les propietats mecàniques de la majoria dels sòlids. Aquest mètode es basa en la relació elàstica desenvolupada per Sneddon entre la càrrega, el desplaçament i l'àrea de contacte per qualsevol indentador que pugui ser descrit com un sòlid de revolució, és a dir, indentadors axisimètrics com indentadors cònics o piramidals. Aquest anàlisi basat en la elasticitat, s'aplica a la corba de descàrrega i

s'assumeix que el comportament del material a descàrrega està caracteritzat únicament per la recuperació elàstica [7].

Físicament, la recuperació elàstica del material es produeix instantàneament al començar la descàrrega. A la Fig. 3.12. es pot observar una corba càrrega-profunditat de penetració i els paràmetres del contacte associats.

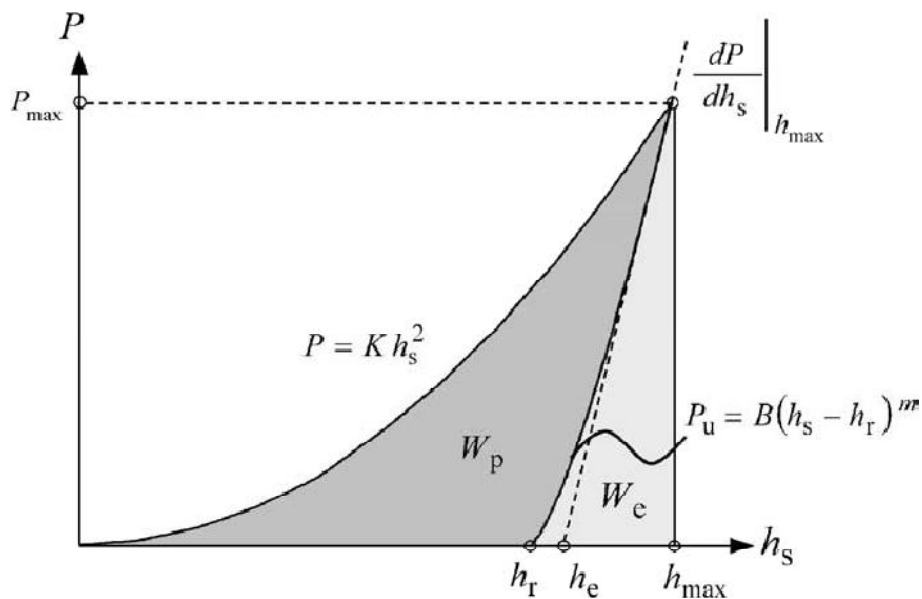


Fig.3.12- Representació esquemàtica d'una corba $P-h$ amb els paràmetres de contacte associats [6].

Per tant, la resposta elàstica verdadera únicament pot ser avaluada quan comença la descàrrega. Una vegada es calibra la rigidesa de la màquina, el desplaçament de la columna de càrrega s'elimina i la profunditat de penetració h representa únicament el desplaçament de la punta en la mostra. La profunditat de contacte, h_c , està relacionada amb el comportament de la deformació del material i amb la forma del indentador, com es mostra a la Fig. 3.13., i ve donada per $h_c = h_{\max} - h_s$, on h_s es defineix com el desplaçament elàstic de la superfície en el perímetre de contacte i h_{\max} és la profunditat màxima

de penetració. Aquest desplaçament elàstic ve donat per $h_s = \varepsilon P_{\max} / S$ on ε depèn de la geometria del indentador utilitzat ($\varepsilon = 1$ per un cilindre pla, 0.75 per un paraboloides de revolució i $2(\pi-2)/\pi$ per un con), S és la rigidesa del contacte i P_{\max} és la càrrega màxima aplicada. Per tant, la profunditat de contacte ve donada per la següent expressió:

$$h_c = h_{\max} - \frac{\varepsilon P_{\max}}{S}$$

Per aquest mètode $h_c < h_{\max}$ per el que aquesta equació no és vàlida quan es produeix apilament en el material, es a dir, quan el material és forçat a desplaçar-se cap amunt per les parets del indentador. Per geometries d'indentador esfèriques, còniques i piramidals s'acostuma a escollir un valor de 0.75 per ε .

En nanoindentació es solen utilitzar puntes de diamant Berkovich (punta piramidal de tres cares) ja que són més fàcils de mecanitzar, es a dir, d'obtenir radis de curvatura molt més petits que en un indentador piramidal de quatre cares tipus Vickers. Aquest fet, a la pràctica es tradueix en que una punta Berkovich convergeix més fàcilment en un únic punt que no una punta Vickers.

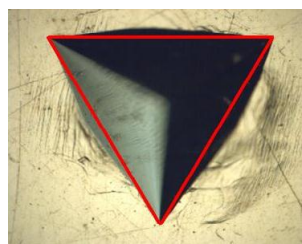
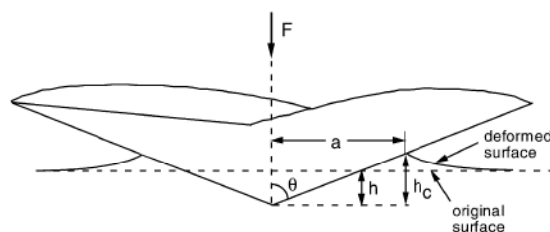


Fig.3.13.- (a)

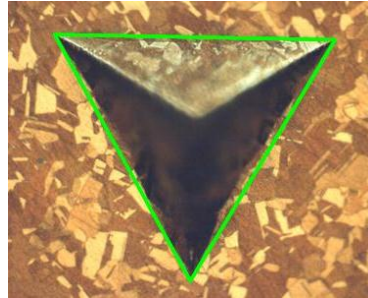
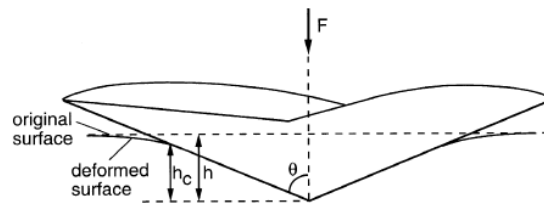


Fig.3.13.- (b)

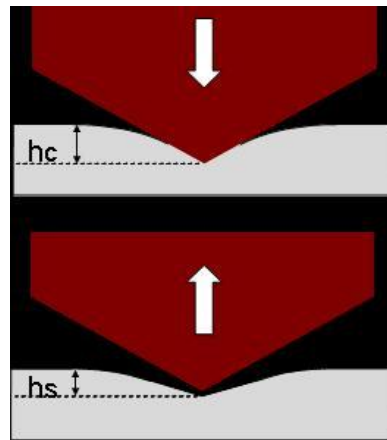


Fig.3.13.- (c)

Fig. 3.13- Representació esquemàtica de: (a) apilament, (b) enfonsament al voltant de la perifèria de una indentació Berkovich y (c) profunditat de contacte h_c i del desplaçament elàstic de la superfície del contacte h_s . [6]

Una vegada s'ha determinat h_c , es determina la funció de forma de l'àrea de contacte $A(h_c)$, que s'utilitza per calcular el mòdul elàstic i la duresa a partir del conjunt d'equacions:

$$\begin{aligned}
 A &= \sum_{n=0}^8 C_n (h_c)^{2-n} \\
 \frac{1}{E_r} &= \frac{1 - (\nu_{material})^2}{E_{material}} + \frac{1 - (\nu_{indentador})^2}{E_{indentador}} \\
 S &= \left. \frac{dP}{dh} \right|_{h_{max}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A} \\
 H &= \frac{P}{A}
 \end{aligned}$$

On E_r es el mòdul elàstic reduït, ν el coeficient de Poisson, S la rigidesa del contacte, H la duresa, P la càrrega aplicada i A L'àrea de contacte.

La Fig. 3.14 mostra l'equip Nano Indenter XP (MTS) utilitzat al laboratori del CTM per realitzar les nanoindentacions.

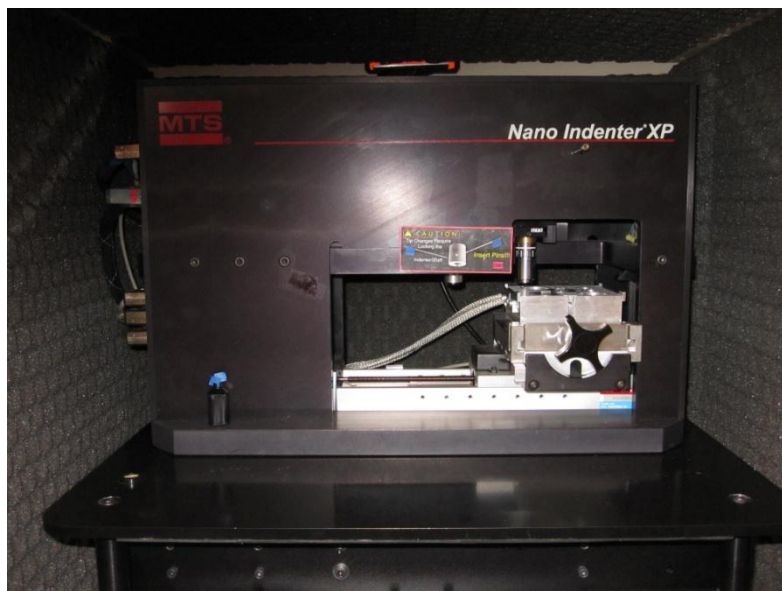


Fig. 3.14- Equip de nanoindentació.

4.- Resultats experimentals

En aquest apartat es mostraran tots els resultats obtinguts a partir dels assajos experimentals realitzats i explicats anteriorment.

4.1.- Ràtios d'esbocat

La Fig.4.1. mostra els resultats obtinguts dels diferents materials amb el procés de tall a diferents toleràncies, en aquest cas s'ha realitzat l'esbocat al mateix sentit que el punxonat. La Fig. 4.2. mostra un exemple dels resultats obtinguts per al MSW1200.

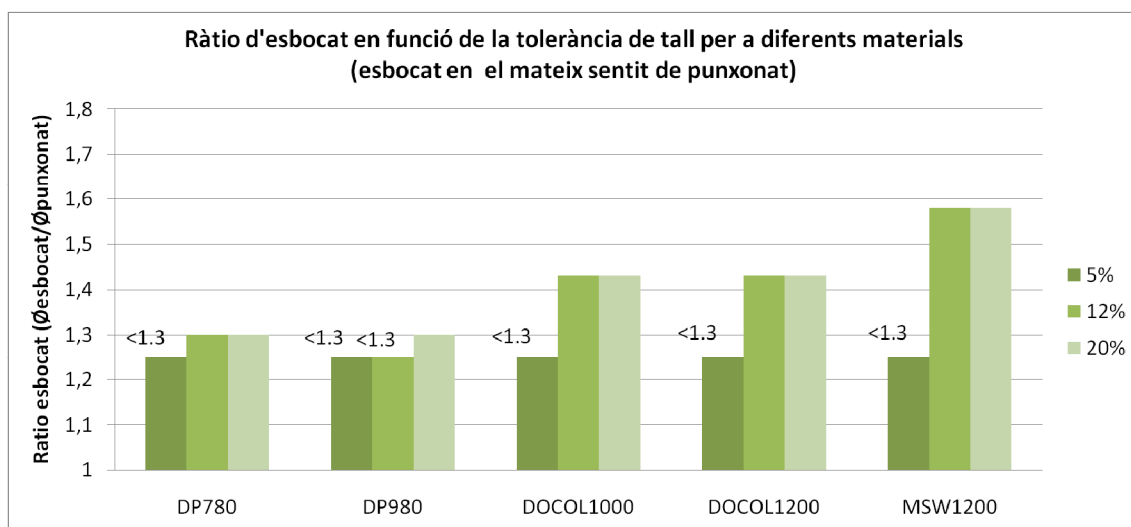


Fig.4.1- Ràtio d'esbocat en funció de la tolerància de tall per a diferents materials (esbocat en el mateix sentit de punxonat).



Fig.4.2- MSW1200: (a) proveta punxonada a D23 T5%; (b) proveta punxonada a D19 T12%; (c) proveta punxonada a D17 T20%

La Fig. 4.3. mostra els resultats obtinguts dels diferents materials amb el procés de tall a diferents toleràncies, en aquest cas amb l'esbocat en sentit contrari al punxonat. La Fig. 4.4. mostra un exemple dels resultats obtinguts per al DOCOL1200.

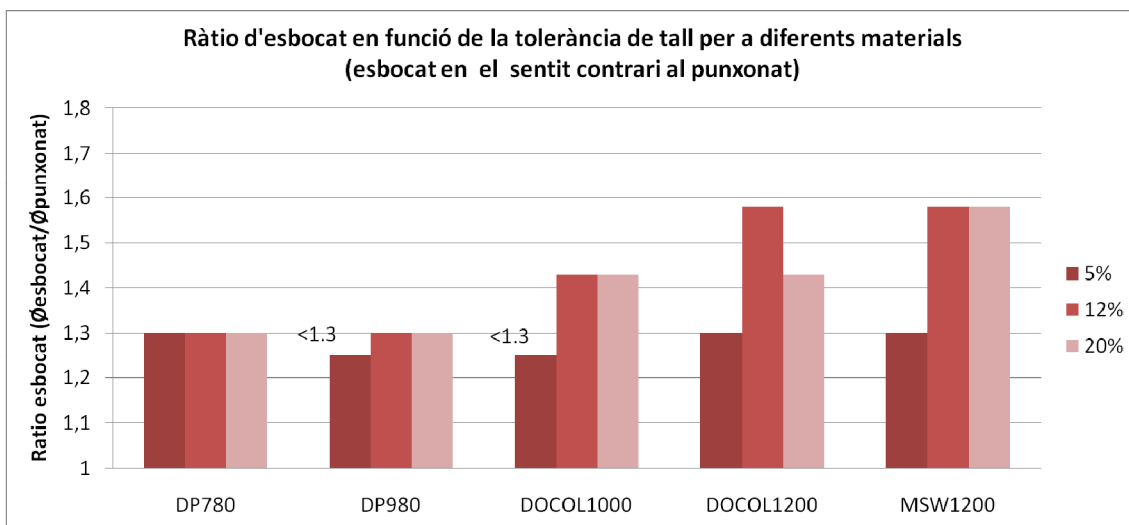


Fig.4.3- Ràtio d'esbocat en funció de la tolerància de tall per a diferents materials (esbocat en el sentit contrari al punxonat).



Fig.4.4- DOCOL1200: (a) proveta punxonada a D23 T5%; (b) proveta punxonada a D19 T12%; (c) proveta punxonada a D19 T20%

Una vegada realitzats tots els assajos d'esbocat, es creen dues gràfiques per veure quin és el ràtio màxim d'esbocat per cadascun dels materials estudiats i en funció de la direcció d'esbocat. Analitzant les dues gràfiques s'observa una millora en alguns materials i en concret amb la tolerància de tall del 12% per als esbocats realitzats en el sentit contrari al punxonat.

Per tal de poder veure l'afectació de l'enduriment causat pel punxonat, s'han tallat unes provetes amb tall per aigua. Fig.4.5.

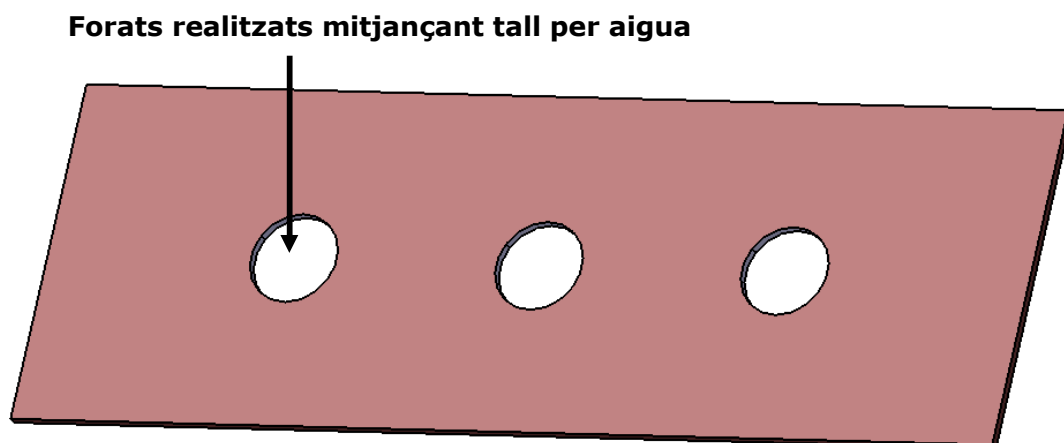


Fig.4.5- Esquema d'una mostra tallada mitjançant tall per aigua.

A continuació es mostra la gràfica de tall per aigua dels diferents materials i igualment els resultats en funció de la direcció d'esbocat respecte el tall.

La Fig. 4.6. mostra els resultats obtinguts dels diferents materials amb el procés de tall per aigua, es mostra una comparativa entre els esbocats en el mateix sentit de tall i en el sentit contrari de tall.

La Fig. 4.7. mostra un exemple dels resultats obtinguts per al DP980.

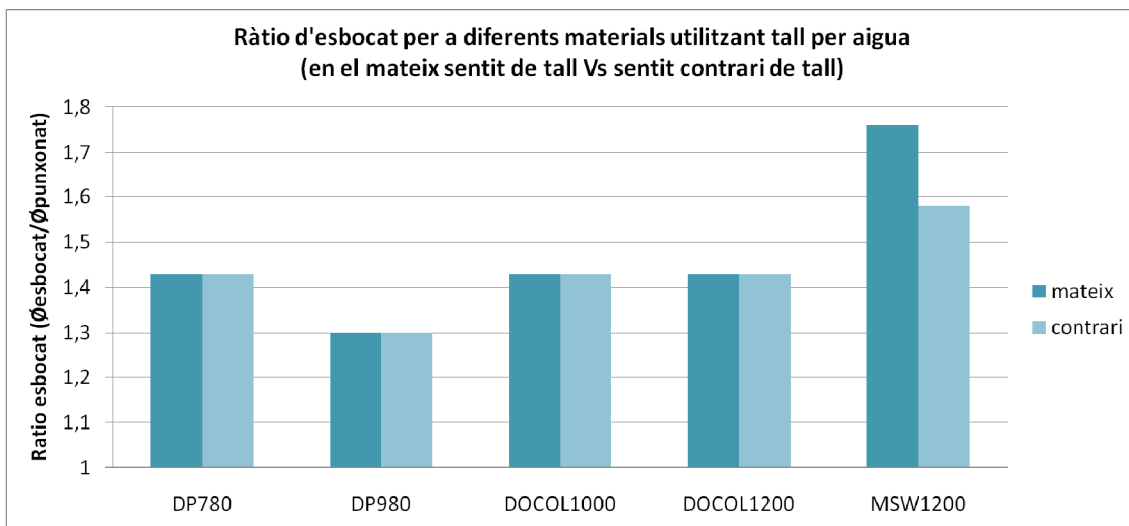


Fig.4.6- Ràtio d'esbocat per a diferents materials utilitzant tall per aigua (en el mateix sentit de tall Vs sentit contrari de tall).



Fig.4.7- DP980: (a) proveta tallada amb aigua D19 i esbocada en el mateix sentit de tall; (b) proveta tallada amb aigua D19 i esbocada en el sentit contrari de tall.

S'observa a la Fig. 4.6. que únicament en un dels materials hi ha una millora en funció de la direcció d'esbocat en el tall per aigua.

La Fig. 4.8. mostra una comparativa entre els millors resultats obtinguts mitjançant punxonats i els millors resultats obtinguts amb el tall per aigua.

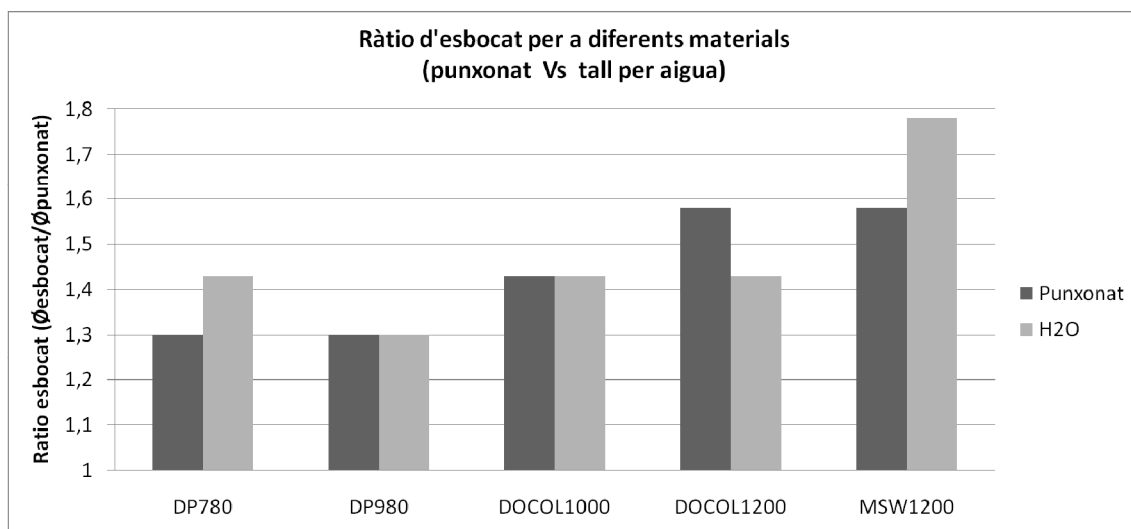


Fig.4.8- Ràtio d'esbocat per a diferents materials (punxonat Vs tall per aigua)

Per tal de veure la millora en el ràtio d'esbocat utilitzant el tall per aigua, s'han graficat els millors resultats del mètode mecànic comparant-lo amb els millors resultats obtinguts amb tall per aigua. S'observa que el tall per aigua millora l'esbocat en tots els casos menys en el DOCOL 1200.

Al observar els resultats obtinguts, ens adonem a diferència del que es podia pensar abans de realitzar els assajos, que els materials amb més alt límit elàstic tenen millor comportament a l'hora de ser esbocats.

Anàlisi de resultats

La relació entre els resultats obtinguts amb el DOCOL1200 i el MSW1200 són millors que els obtinguts amb el DOCOL1000, és a dir, materials amb major resistència mecànica presenten un major ràtio d'esbocat. A la Fig.4.9. es mostra que en estudis realitzats amb altres materials, curiosament en el cas del DOCOL1400, també s'obtenen millors resultats que en el cas del DOCOL1000 [8]. En aquesta gràfica s'observa també l'importància que pren el desgast dels punxons.

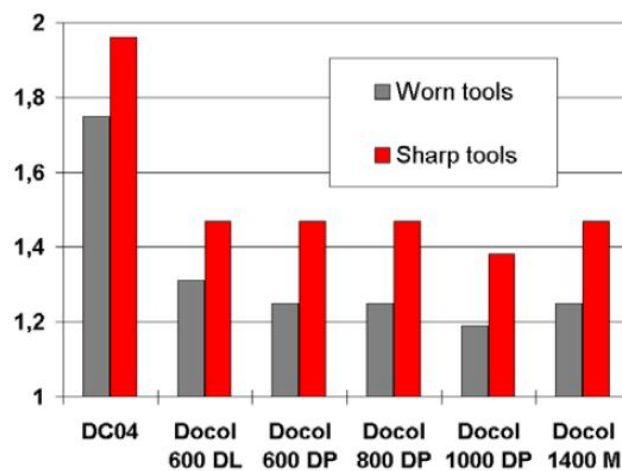


Fig.4.9 - Ràtio d'esbocat per a diferents materials. Relació entre punxó de tall usat i punxó de tall nou [9].

Els resultats obtinguts en el projecte demostren que la tolerància millor per esbocar és la del 12%. Així mateix, d'acord amb el Mètode *Hole Expansion Test*, segons la norma ISO/TS 16630 [9], aconsella realitzar els assajos en aquesta tolerància.

4.2.- Microestructura (Anàlisi de rebava)

A continuació s'adjunten algunes de les imatges extretes mitjançant microscòpia òptica de les estructures dels materials a estudi. La resta d'imatges pertanyents a l'estudi microscòpic estan adjuntes a l'annex del projecte, Fig. 4.10.

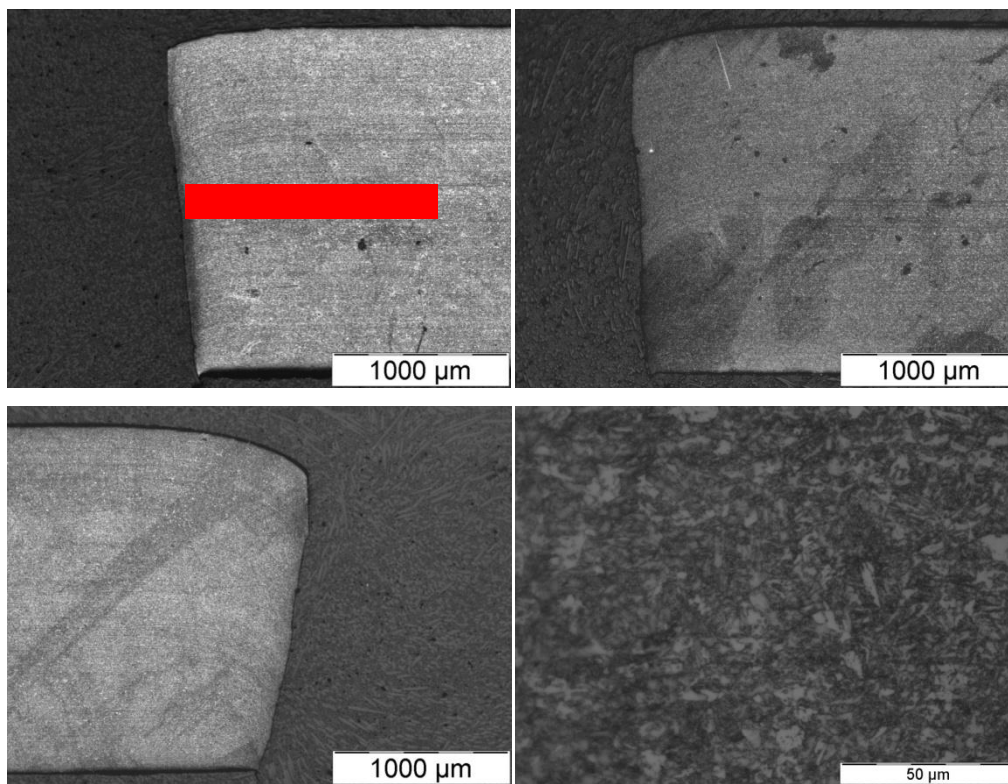


Fig.4.10- (a) DP780 Tolerància del 5% (en vermell, la zona de creació d'empremtes); (b) DP780 Tolerància del 12%; (c) DP780 Tolerància del 20%; (d) DP780 estructura

A continuació es mostren les imatges de diferents materials tallats amb la tolerància en que s'han obtingut els millors resultats al procés d'esbocat, que és la del 12%, Fig. 4.8.

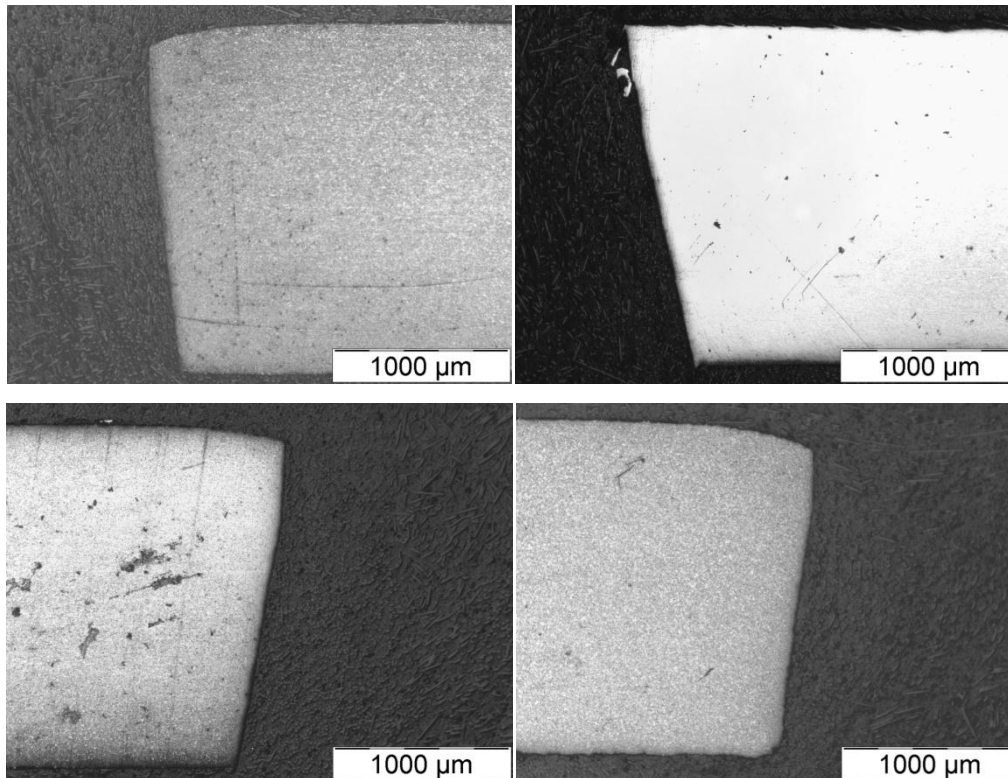


Fig 4.11 - (a) DOCOL1000 Tolerància del 12%; (b) MSW1200 Tolerància del 12%; (c) DOCOL1200 Tolerància del 12%; (d) DP980 Tolerància del 12%.

Anàlisi de resultats

Amb l'anàlisi microscòpic de les provetes s'observa que el perfil de la xapa punxonada és diferent en funció de la tolerància de tall. Per tant i fent referència a la Fig.2.8 i la Fig.2.9 es troba que la zona de rebava i l'angle de fractura del material és diferent en funció d'aquesta tolerància, Fig 4.12 – 4.14.

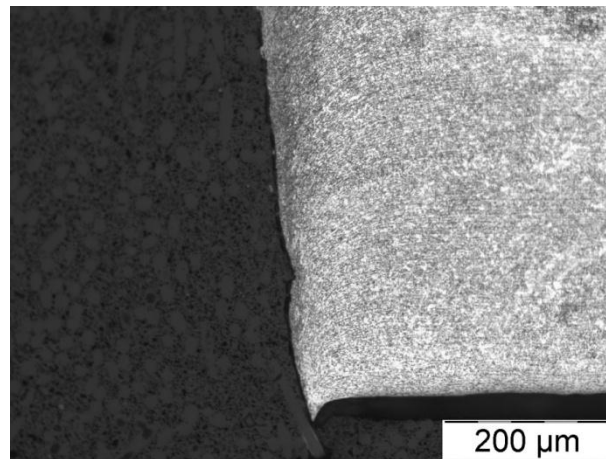


Fig. 4.12- DP780. Diàmetre 21mm. Tolerància de tall 5%.

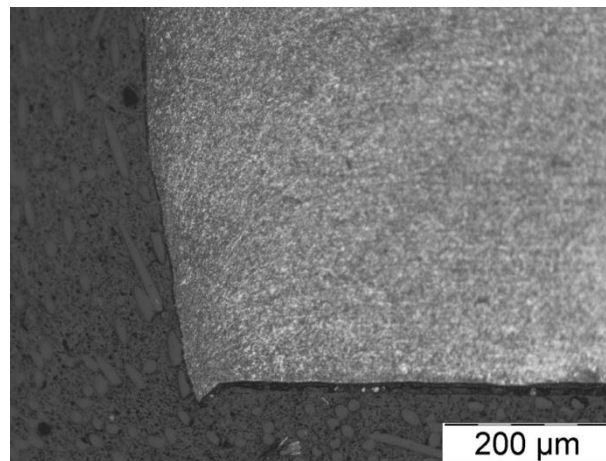


Fig. 4.13- DP780. Diàmetre 21mm. Tolerància de tall 12%.

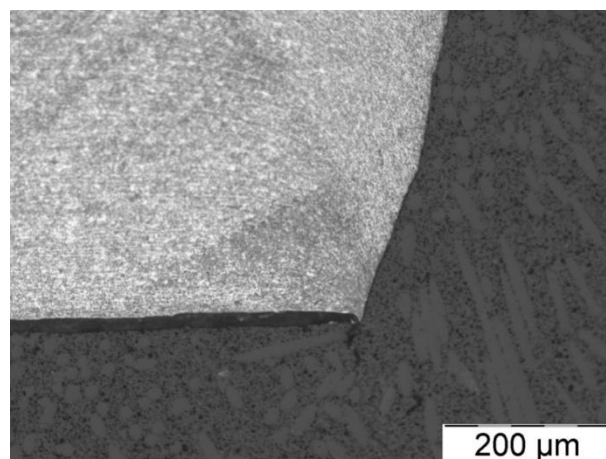


Fig. 4.14- DP780. Diàmetre 23mm. Tolerància de tall 20%.

D'acord amb Picas et al. [10] s'ha estudiat l'efecte de la microestructura dels acers d'eines i el nivell de duresa i com això afecta a la vida de les eines en la perforació d'acers AHSS. En aquest article s'han tingut en compte també les toleràncies de tall i els radis de les eines en la formació de rebaves a les xapes.

A continuació s'observa un gràfic, Fig.4.15 de càrrega vs tolerància i la formació de rebaves en funció de la tolerància de tall. Es troba que la formació de rebaves no es produeix entre el 2.5 i el 20% de tolerància.

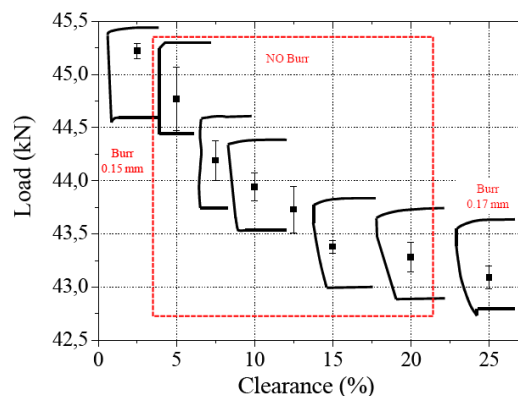


Fig.4.15.- Perfil de la xapa en funció de la tolerància de tall [10].

Els resultats obtinguts mostren que hi ha rebava a les toleràncies que s'han estudiat, 5, 12 i 20 %, encara que s'observa, igual que mostra la Fig. 4.15, que l'angle de fractura augmenta al augmentar la tolerància de tall i disminueix la rebava.

La microestructura dels materials té un gran efecte a les propietats mecàniques, així com a la conformabilitat. Als acers, normalment, es troba que al augmentar la resistència mecànica presenten menor conformabilitat. D'acord amb això, els resultats han mostrat que els

acers de major resistència presenten un major ràtio d'esbocat, contrari al que es pensava inicialment. Aquesta conclusió també l'han trobat altres autors per acers DP (*Dual Phase*) [11].

La Fig. 4.16. mostra el valor de HER (*Hole Expansion Ratio*) per acers amb diferents continguts de ferrita amb diferents tractament tèrmics. En general, a mesura que augmenta la fase dúctil (ferrita) s'obtenen valors de HER més petits.

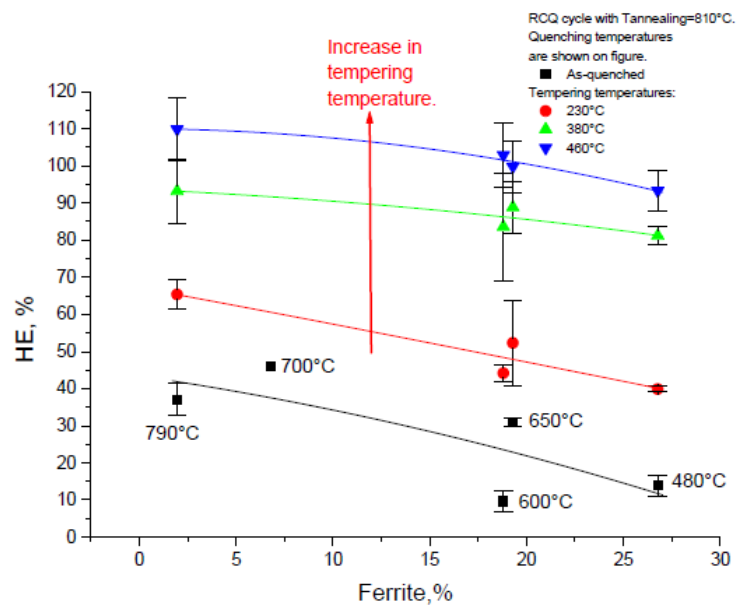


Fig.4.16- Evolució del valor de HER amb el contingut de ferrita [11].

Per tant, pensem que existeix un mecanisme de dany durant el procés de tall que depèn d'altres paràmetres com la nucleació d'esquerdes i posterior formació i distribució de cavitats durant el procés de tall.

4.3.- Dureses

En la Fig. 4.19 es mostren els resultats de les dureses del DOCOL1200 T12% realitzant dos perfils de dureses un superior i un inferior segons es mostra a la Fig. 4.17., per tal de verificar si hi ha diferències entre el perfil superior i l'inferior en una mateixa proveta, amb la finalitat d'establir un criteri de mesura de dureses.

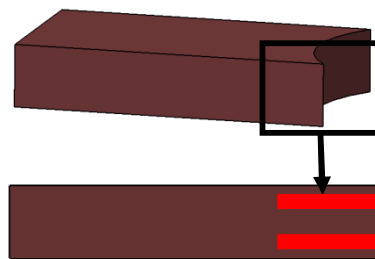


Fig.4.17.- Imatge de creació de petges inferior i superior (distància de 0,2 mm del perfil).

S'observa que els resultats obtinguts no mostren diferències substancials, per tant en la resta de provetes es realitzarà un únic perfil a la part central de la proveta tal i com s'indica a la Fig. 4.18., anteriorment comentada.

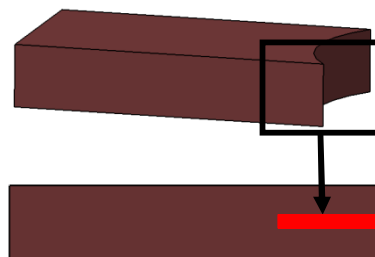


Fig.4.18.- Imatge de creació de petges a la part central de la proveta.

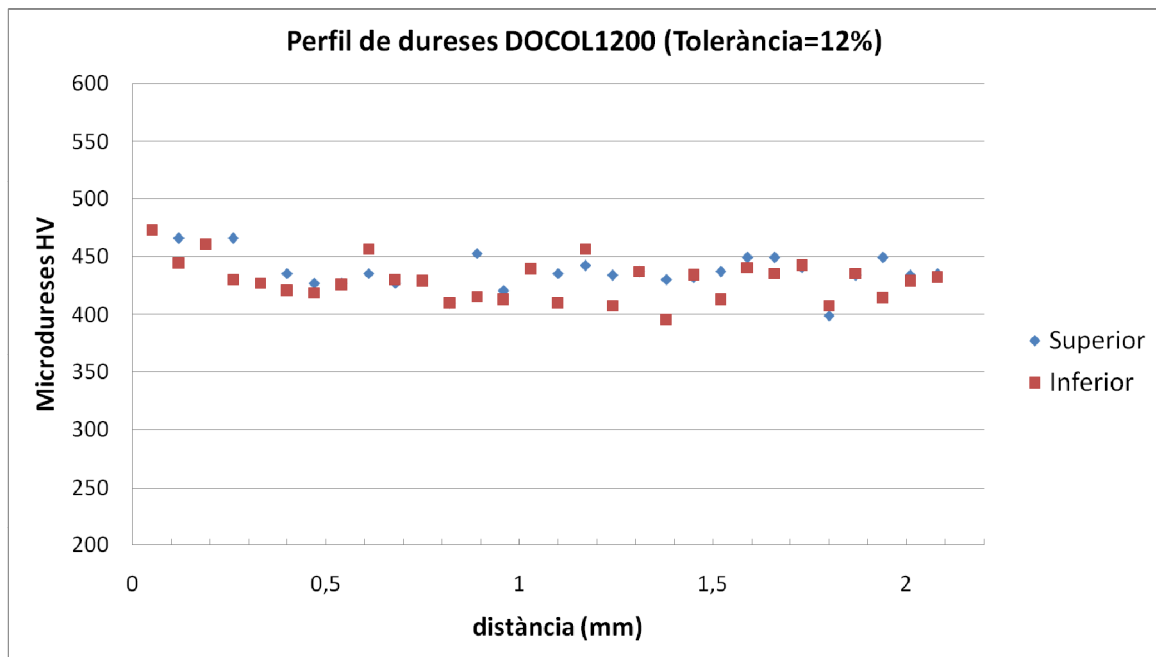


Fig.4.19 - Perfil de dureses DOCOL1200 (tolerància del 12%; perfil superior Vs Perfil inferior)

En la Fig. 4.20 es mostra el perfil de dureses del DOCOL1200 amb totes les seves toleràncies de punxonat (5%; 12% i 20%), amb la finalitat de veure si hi ha alguna diferència en l'enduriment en funció de la tolerància de tall.

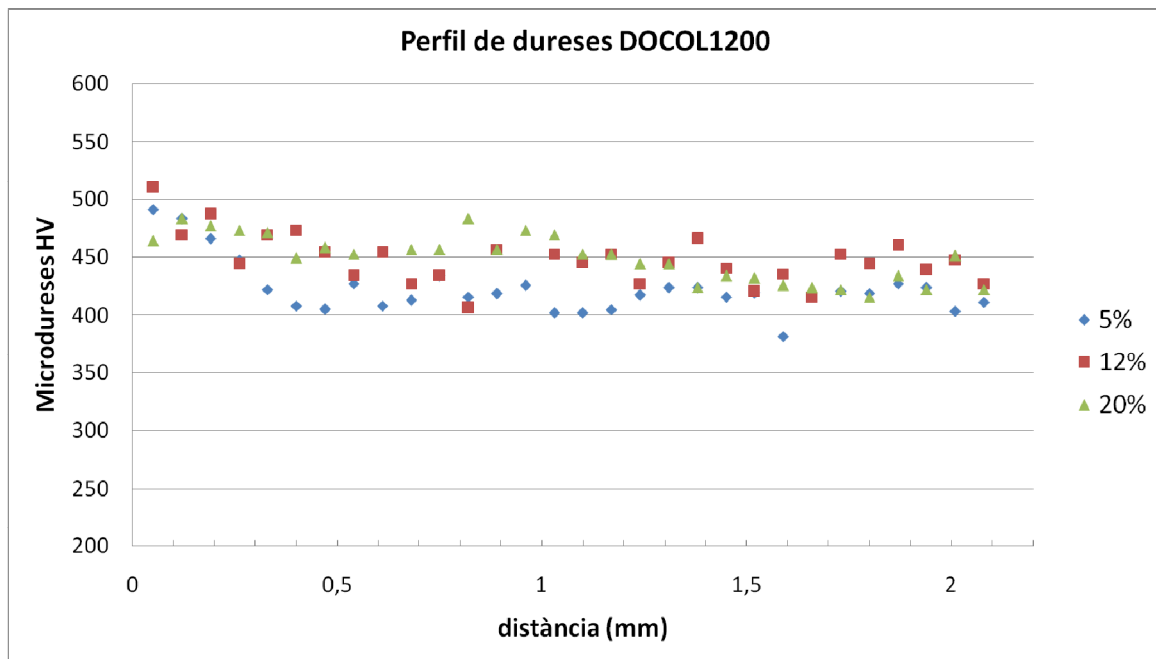


Fig.4.20- Perfil de dureses DOCOL1200 (toleràncies del 5%; 12% i 20%)

En la zona propera al tall no s'observen diferències, es per aquest motiu que es decideix realitzar un estudi més acurat mitjançant nanoindentacions.

A continuació es realitza el mateix treball de calcular les dureses del material MSW1200 amb totes les toleràncies treballades, Fig. 4.21, per tal d'observar el comportament d'aquest material.

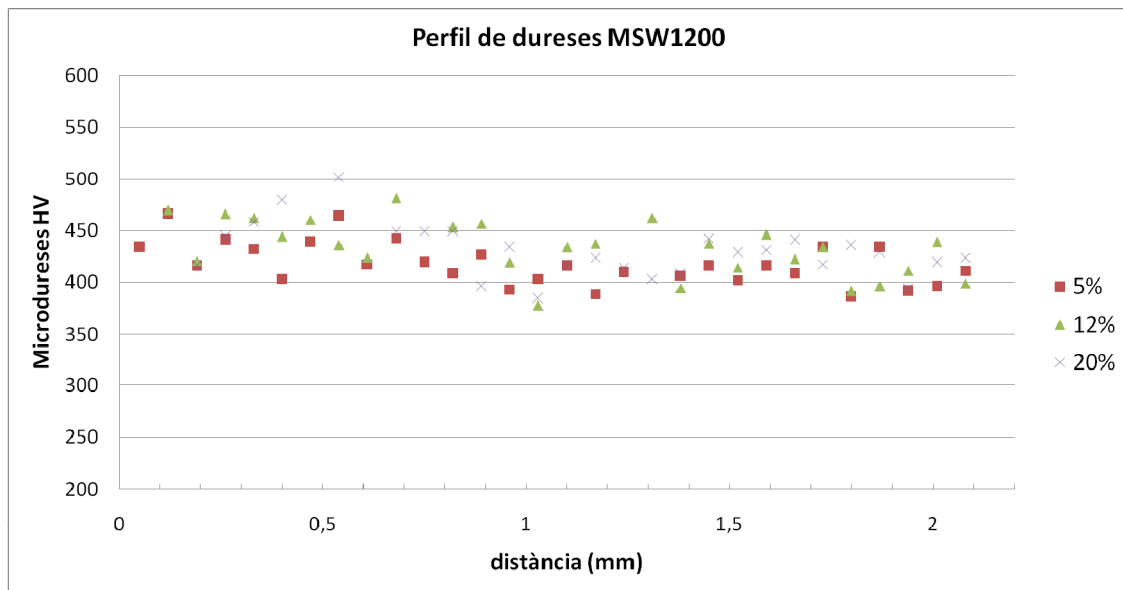


Fig.4.21- Perfil de dureses MSW1200 (toleràncies del 5%; 12% i 20%)

Es difícil distingir quin és el millor dels casos, per això es decideix realitzar les mesures mitjançant nanoindentació.

En la Fig. 4.22 es realitza un perfil de dureses a cadascun dels materials estudiats amb el procés alternatiu de tall (tall per aigua) per intentar veure si aquest procés no presenta enduriment per deformació a la zona de tall.

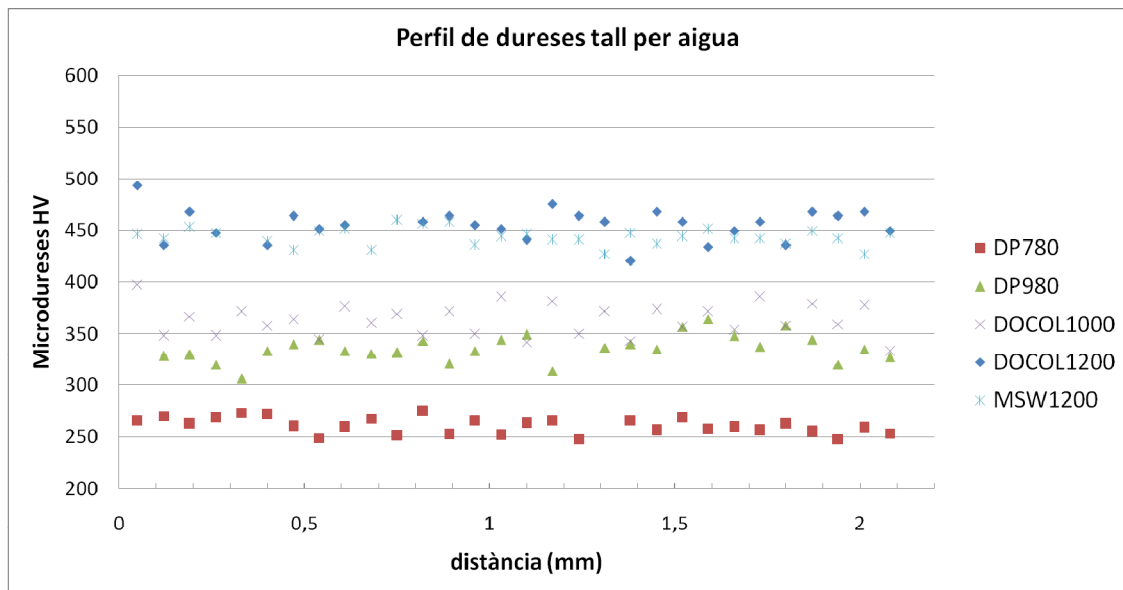


Fig.4.22 - Perfil de dureses amb tall per aigua (DP780; DP980; DOCOL1000; DOCOL1200; MSW1200)

S'observa que en el cas del DOCOL1000 i el DOCOL1200 la zona propera al límit mostra que possiblement en aquests casos sí que es produeix un enduriment. Es realitza en aquests casos les mesures mitjançant nanoindentacions.

A continuació es presenten les gràfiques comparatives de cadascun dels materials estudiats amb tolerància de tall del 12% i amb tall per aigua. Segons els resultats obtinguts anteriorment en l'apartat de ratios d'esbocat la tolerància del 12% (T12%) és la que millors resultats dona en el procés de punxonat; aquesta gràfica servirà per veure quina és la diferència entre el millor dels casos en el procés de punxonat amb premsa i els resultats obtinguts amb el tall per aigua (procés alternatiu de tall), Fig. 4.23.

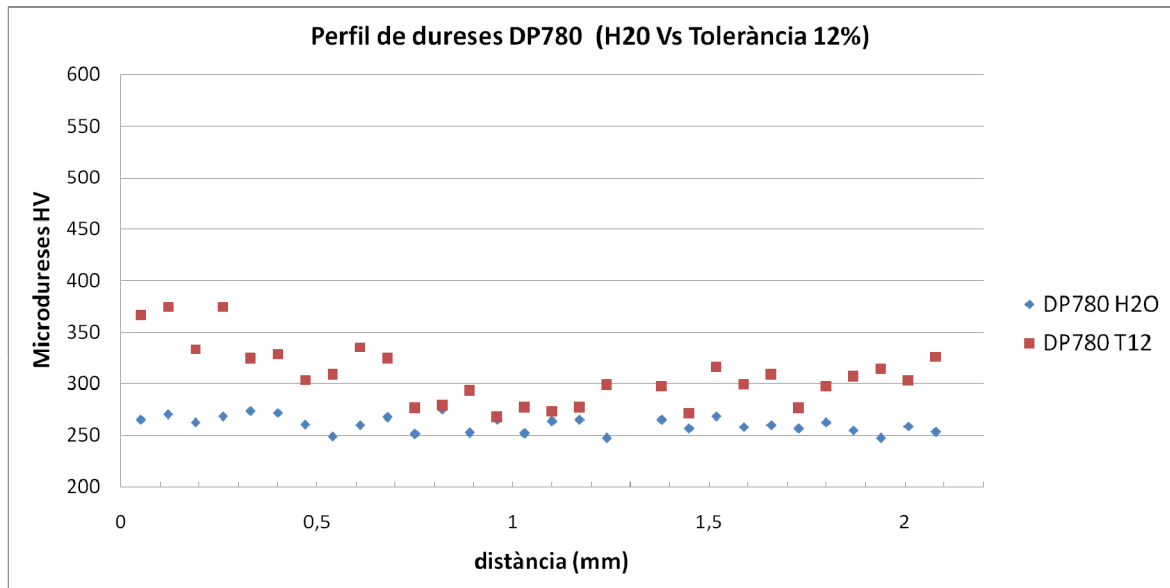


Fig.4.23 - Perfil de dureses DP780 (Tall per aigua Vs Tolerància del 12%)

S'observa una diferència important entre les microdureses del tall per aigua i el punxonat en la millor de les toleràncies del punxonat (12%). Observem un major enduriment en el cas de la proveta punxonada.

A Fig. 4.24 es mostra la comparativa de la tolerància de tall (T12%) mitjançant punxonat del material DP980 i els resultats obtinguts amb tall per aigua.

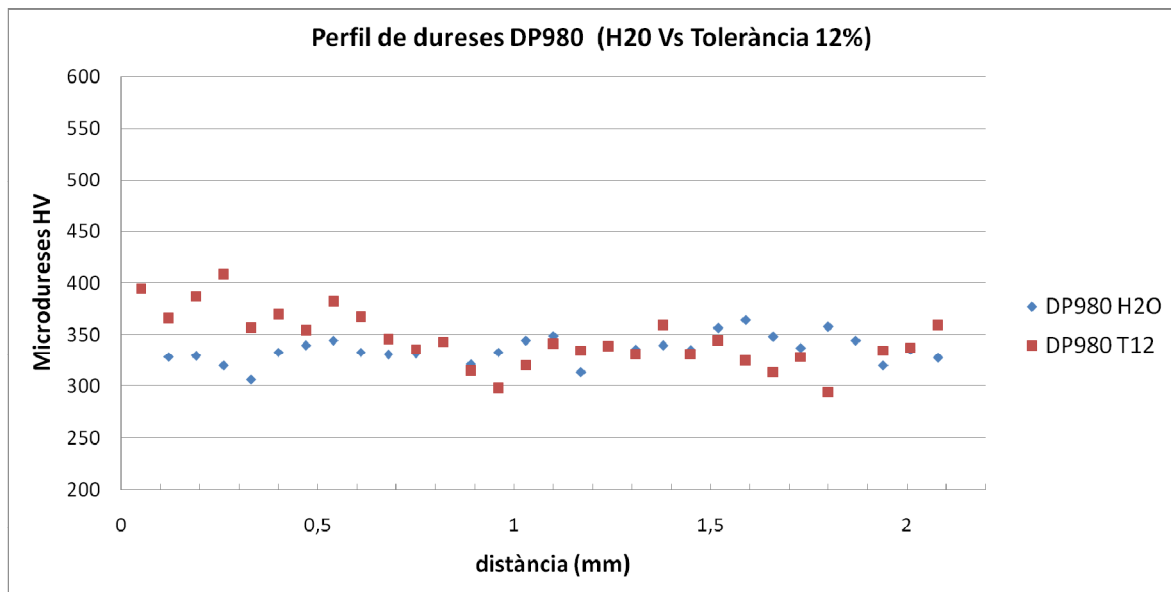


Fig.4.24 - Perfil de dureses DP980 (Tall per aigua Vs Tolerància del 12%)

Igual que en el cas del DP780, en el DP980 s'observa que el tall per aigua presenta menys enduriment que el punxonat (T12%).

A continuació es realitzen les mesures comparatives entre el punxonat (T12%) i el tall per aigua en el material DOCOL1000, Fig. 4.25.

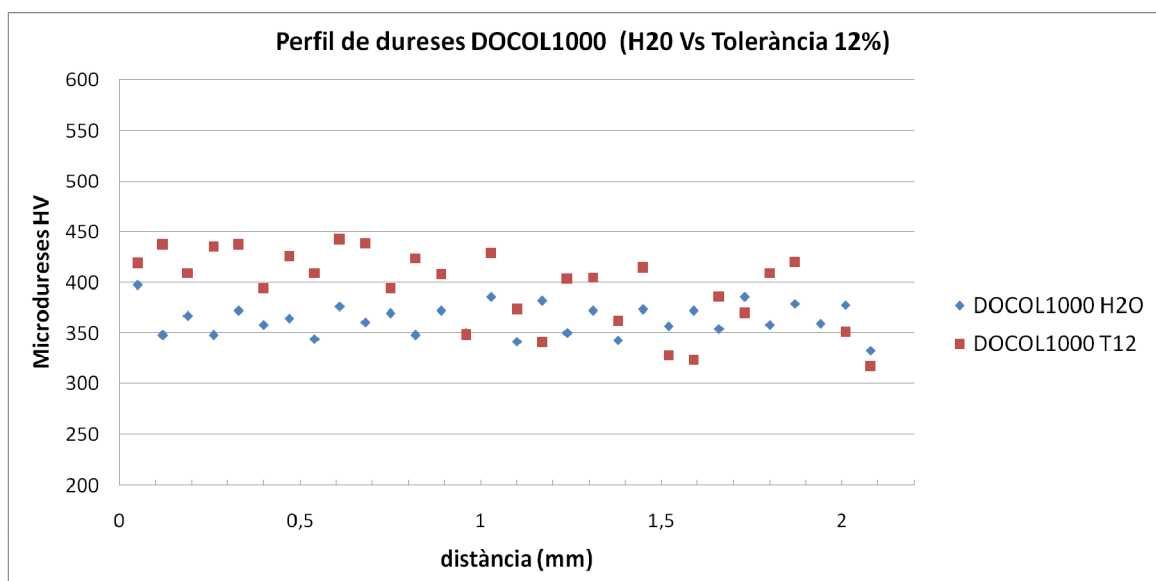


Fig.4.25- Perfil de dureses DOCOL1000 (Tall per aigua Vs Tolerància del 12%)

En aquest cas, també s'observa una clara diferència entre els resultats del procés de tall mitjançant punxonat (T12%) i el procés de tall alternatiu mitjançant tall per aigua.

Es realitza el mateix exercici de comparació de la Tolerància del 12% en punxonat i el tall per aigua en el DOCOL1200, Fig. 4.26.

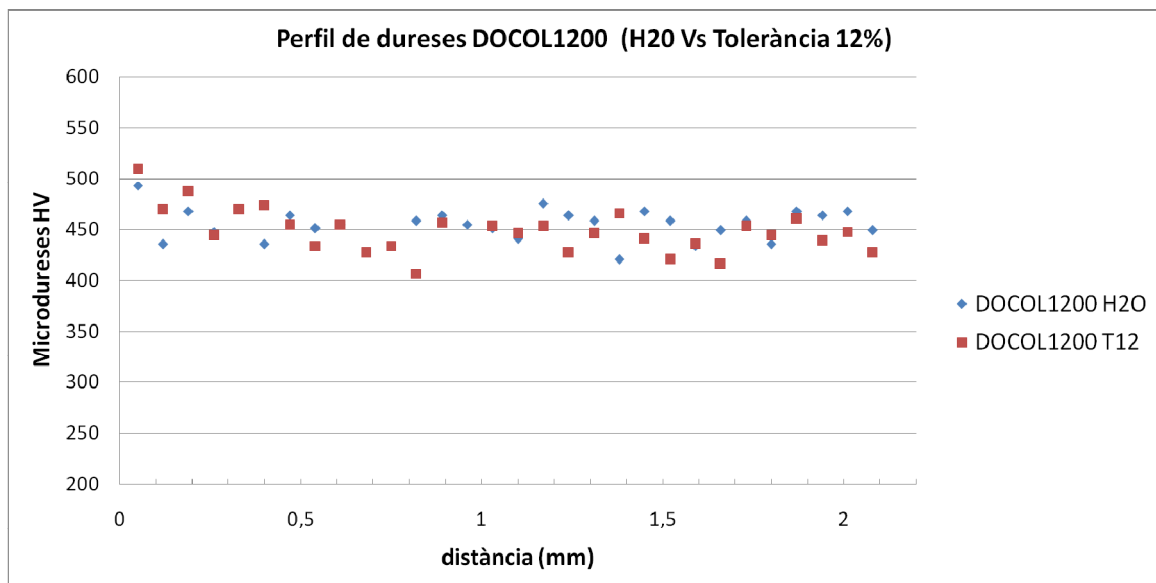


Fig.4.26- Perfil de dureses DOCOL1200 (Tall per aigua Vs Tolerància del 12%).

Els resultats obtinguts en el cas del DOCOL1200 no mostren diferències suficients com per determinar si hi ha o no diferències en l'enduriment del material. Es procedirà a realitzar les mesures mitjançant nanoindentacions amb una càrrega de 4 grms.

Per últim, es realitza la gràfica comparativa entre el procés de tall per punxonat (T12%) i el procés mitjançant tall per aigua del material MSW1200, Fig. 4.27.

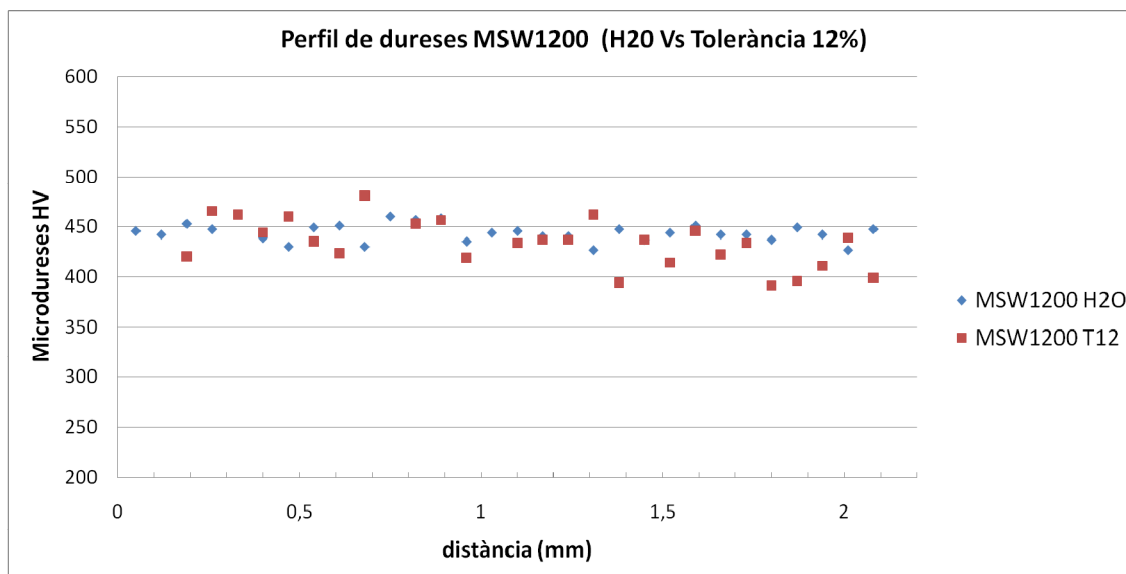


Fig.4.27- Perfil de dureses DOCOL1000 (Tall per aigua Vs Tolerància del 12%)

Com en el cas del DOCOL1200, en aquest gràfic no s'observa cap diferència entre els resultats obtinguts a partir del tall per aigua i els resultats del punxonat a tolerància del 12%.

Per tal de poder determinar amb més exactitud el comportament d'algun dels materials, es realitzaran en algunes provetes anteriorment esmentades les mesures mitjançant nanoindentacions, unes mesures molt més exactes.

En els casos en que s'ha considerat necessari, s'han realitzat les mesures mitjançant nanoindentació. A partir d'aquest punt, tots els resultats de les gràfiques ha estat obtingudes a partir d'aquest procés de mesura anteriorment explicat.

A continuació es mostra la gràfica del DOCOL1200, un estudi de les tres toleràncies de tall (5%; 12% i 20%) i els resultats de tall per aigua. S'observa que en el cas de les nanoindentacions es determina el rang d'error de mesura a diferència de les microdureses en que no

apareix perquè únicament realitzem una mesura. És així, perquè en aquestes mesures es realitzen automàticament 3 perfils paral·lels, per això tenim un error de mesura determinat, Fig. 4.28.

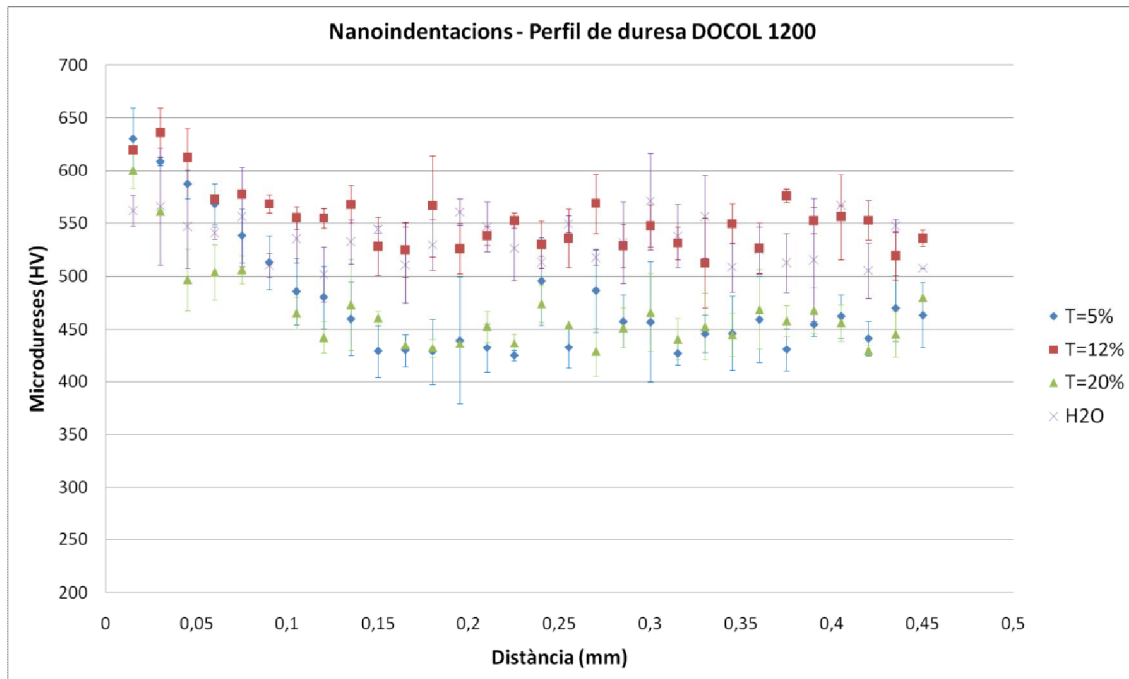


Fig.4.28- Perfil de dureses mitjançant Nanoindentacions DOCOL1200 (Toleràncies del 5%; 12%; 20% i tall per aigua).

En aquest primer gràfic es mostren els resultats dels perfils de dureses realitzats al DOCOL1200 en les tres toleràncies de punxonat i en el cas de tall per aigua.

Es troba que en el cas del tall per aigua, l'enduriment del material és menor que en els casos del punxonat.

A la Fig. 4.29. es mostren els resultats obtinguts de les tres toleràncies de tall mitjançant punxonat en el material MSW1200.

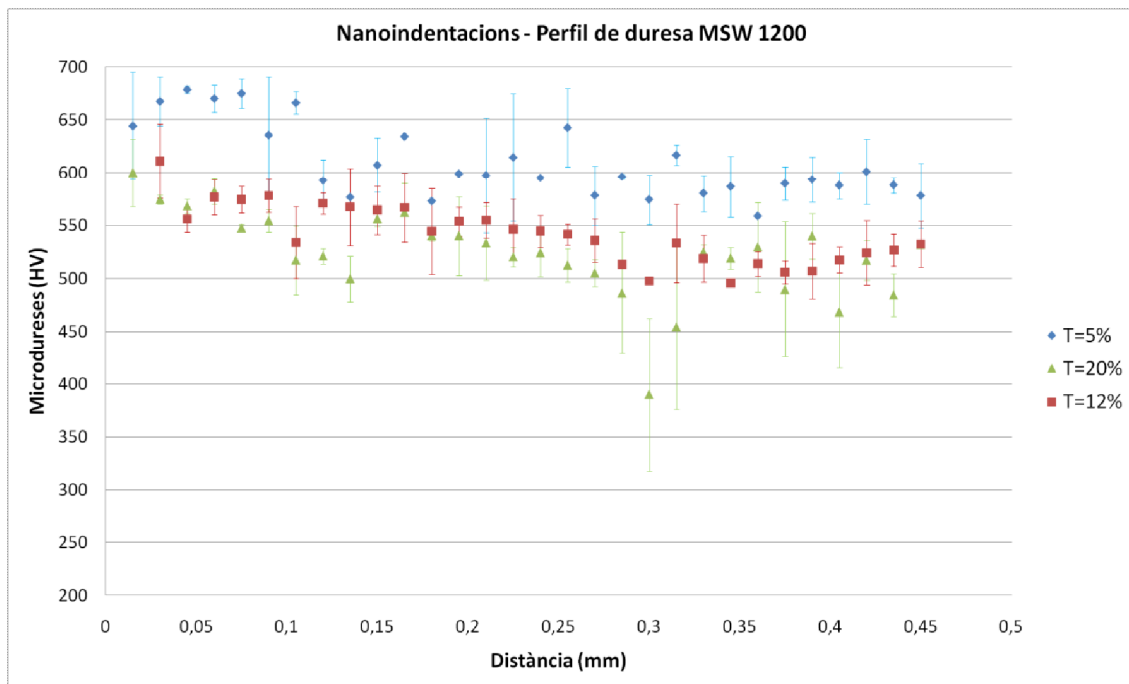


Fig.4.29- Perfil de dureses mitjançant Nanoindentacions MSW1200 (Toleràncies del 5%; 12%; 20%)

Es troba que els millors resultats s'obtenen amb les toleràncies del 12% i del 20%.

Per al DOCOL1200, atès que en l'estudi de microdureses mitjançant el penetrador Vickers no hem extret uns resultats fiables, es repeteix mitjançant nanoindentacions la comparativa entre les mostres tallades per aigua i la tolerància del 12% mitjançant punxonat (la que presenta millors resultats), Fig. 4.30.

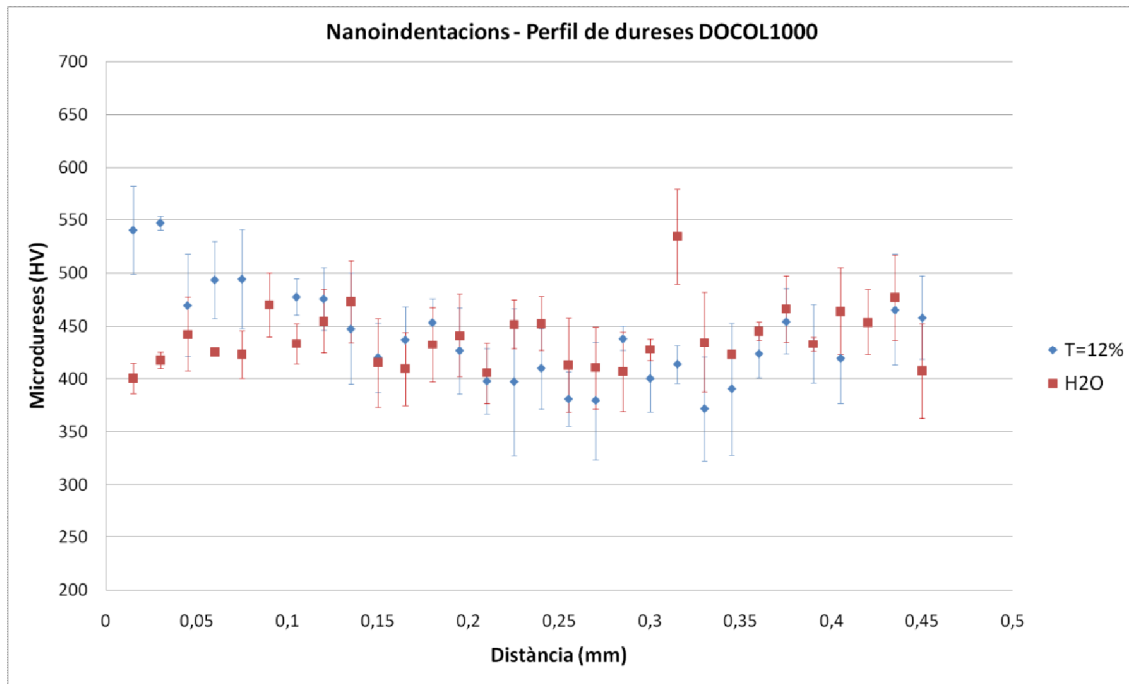


Fig.4.30- Perfil de dureses mitjançant Nanoindentacions DOCOL1000 (Tolerància del 12% i tall per aigua)

En aquest cas si que obtenim una clara diferència entre la proveta punxonada amb T12% i la tallada per aigua. Aquesta última mostra que no té enduriment durant el procés de tall.

Anàlisi de resultats

Amb la realització dels perfils de dureses i amb l'ajuda de les nanoindentacions, hem aconseguit veure que realment el procés de punxonat té una afectació sobre la zona de tall i s'ha observat que aquesta zona que s'endureix durant el procés de punxonat és d'unes 500 micres.

En la majoria dels casos de tall per aigua, s'observa que el material no s'ha endurit i per tant s'ha trobat uns valors de ràtio d'esbocat major.

Al cas del DOCOL1200, s'ha trobat que el tall per aigua no millora els esbocats realitzats amb el punxonat. D'acord amb la Fig. 4.28, el material esbocat amb tolerància del 12 % i tall per aigua s'endureixen menys en la zona propera a la fractura. Es tenen valors de 525 HV a 450 micres i augmenten fins a valors de 625 HV, mentre que les mostres realitzades amb toleràncies de 5 i 20 % posseeixen valors de 450 HV aprox. a 450 micres i augmenten fins a valors de 600 – 625 HV aprox., per tant hi ha major augment de duresa en aquestes mostres, això podria explicar aquest comportament anòmal als resultats del DOCOL1200.

Per tant, com a norma general, en els casos en que hi ha menys enduriment, el ràtio d'esbocat és millor.

5.- PRESSUPOST

A continuació, Fig.5.1, es presenta el pressupost de la realització del projecte. En aquest pressupost s'inclouen: costos del procés experimental; costos de desplaçaments i el cost del projectista. El cost del material no es contempla ja que ha estat subministrat sense càrrecs al CTM per aquest estudi. El material d'oficina tampoc ha estat contemplat.

En l'apartat de cost del procés experimental, s'inclouen els costos dels diversos assajos realitzats així com el càlcul de cadascun d'ells (tarifes CTM).

En l'apartat de desplaçaments es contemplen els kilòmetres realitzats per mi durant la realització del projecte des de mitjans de Febrer de 2010 fins a finals de Gener de 2011. (40 km al dia durant 150 dies laborables).

Concepte	unitats	Cost unitari aparell (€)	Cost (€)
Assajos de Tracció Uniaxial	30	30	900
Assajos Punxonat / esbocat	120	20	2400
Microestructura	25	20	500
Microdureses	20	30	600
Nanoindentacions	81	30	2430
Hores Projectista	700	8	5600
Desplaçaments (0,2€/Km)	6000	0,2	1200
			13630

Fig.5.1- Pressupost del projecte

El cost total aproximat del projecte és de **13630 €**

6. Impacte ambiental

6.1.- Indicadors de l'impacte ambiental.

Per tal d'avaluar l'impacte de forma comparativa, es necessita una unitat de mesura comú que permeti quantificar aquest impacte. La mesura escollida és el consum d'energia associada a les activitats estudiades.

Utilitzaré com a indicador els quilograms de diòxid de carboni equivalents emesos a la atmosfera com a conseqüència de les activitats estudiades. Aquest indicador està en la línia de la "petjada ecològica" [12]. És necessari recordar que la emissió de diòxid de Carboni és una de les principals causes de l'efecte hivernacle i del escalfament global del planeta.

El consum d'energia i el transport seran variables estudiades per determinar l'impacte ambiental.

Actualment, és difícil considerar que existeix un indicador ideal per mesurar els efectes ambientals, és per això que s'utilitza com a indicador els quilograms de diòxid de Carboni emesos a l'atmosfera, ja que permeten mostrar els resultats de forma clara i comparable.

L'any 1995 els urbanistes William Rees i Mathis Wackernagel, membres del Grup per Comunitats sanes i sostenibles de la Universitat de British Columbia, Vancouver (Canadà), introdueixen el concepte de petjada ecològica. Aquest concepte es defineix com: "la

superfície de territori ecològicament productiva necessària per generar els recursos utilitzats i assimilar els residus produïts per una població definida amb un nivell de vida determinat” .

Es tracta d'una eina de quantificació ecològica que utilitza àrees de terreny com a unitat de mesura. Per expressar els resultats en unitats de terreny, existeixen diferents mètodes per aproximar el càlcul de les hectàrees associades a la producció d'energia. En aquest projecte s'ha escollit la quantitat de terra que es necessita per absorbir el corresponent diòxid de Carboni emès per el consum de combustibles.

Per fer la conversió, es coneix que el bosc de la Catalunya Central fixa uns 125grms de Diòxid de Carboni per metre quadrat i any. Això suposa fixar 4.58Tn de diòxid de Carboni per hectàrea i any.

6.2 Impacte ambiental per consums

En aquest apartat s'estudien les necessitats energètiques d'electricitat i de transport durant el desenvolupament del projecte.

6.2.1 Consum elèctric.

En aquest apartat es considera el consum elèctric de les màquines i dels equipaments generals que representen un % considerable del consum de electricitat durant el projecte.

Per l'electricitat, el factor de conversió utilitzat per determinar les emissions de CO₂ en quilograms de diòxid de Carboni és:

$$0.264 \text{ kg CO}_2 / \text{kWh}$$

Aquest valor s'ha obtingut a partir de les dades de producció d'energia elèctrica de Catalunya (extret del estudi de "petjada ecològica" de la EUPM).

En la taula, Fig.6.1, es mostren els consums elèctrics de màquines en kWh i la seva conversió a Kg de CO₂. Sabent que la quantitat de diòxid de carboni absorbida per hectàrea i per any és de l'ordre de

$$1,25 \text{ Tn de CO}_2 / \text{hectàrea}$$

Es pot passar el Kg de CO₂ a hectàrees de bosc necessàries per contrarestar l'impacte ambiental generat, seguint el model de petjada ecològica.

Màquina/Aparell	Hores d'ús	Potència Kw	kWh	Kg CO ₂	Hectàreas
Màquina tracció	20	2,8	56	15	0,012
Prensa Hidràulica	80	3,5	280	74	0,059
Ordenador (CTM)	200	0,2	40	11	0,008
Ordenador (personal)	300	0,2	60	16	0,013
Il·luminació	450	0,5	225	59	0,048
Altres aparells	150	0,5	75	20	0,016
				194	0,155

Fig.6.1- Consums estimats respecte el consum elèctric

6.2.2. Mobilitat

Un dels impactes ambientals més importants en l'actualitat és el provocat per el transport de persones.

Per la realització d'aquest projecte tots els desplaçaments s'han fet amb cotxe.

Segons estudis realitzats per la Universitat Politècnica de Manresa (UEPM) es demostra que l'energia consumida per un cotxe de motor diesel és d'uns 2.98MJ/Km. També és precís saber que un motor diesel desprèn energia a 35.8MJ/l i produeix uns 0.88KgCO₂/litre.

$$6.000Km \cdot \frac{2,98MJ}{Km} \cdot \frac{11g \text{ asoil}}{35,8MJ} \cdot \frac{0,88KgCO_2}{11g \text{ asoil}} = 439,51KgCO_2$$

La distancia recorreguda durant el projecte és de 6000 Km, per tant es generen 439,51KgCO₂.

6.3-Resum final

Com a resum final s'adjunta una taula, Fig.6.2, amb la suma dels consums elèctric i de mobilitat.

	Kg CO2 / projecte	Hectàreas
Consum elèctric	194	0,155
Consum mobilitat	440	0,352
Totals	634	0,507

Fig.6.2- Taula resum del consum del projecte

Com a conclusió, al aplicar el model de càlcul de la petjada ambiental, sabem que es necessiten 0,507 hectàrees de bosc per fixar el diòxid de carboni generat durant el desenvolupament del projecte.

Destacar que els materials no s'inclouen en l'impacte ambiental ja que són totalment reciclables i per tant no generen residu.

7.- Conclusions

Arribat a aquest punt, només queda fer una valoració final de tot el conjunt del treball realitzat i extreure les conclusions pertinents a tota la part experimental realitzada i a tots els càlculs i mesures que s'han fet durant aquest període.

- Els millors resultats en els esbocats, s'obtenen amb la tolerància de tall es del 12% entre punxó i matriu.
- S'observa una diferència en funció de la direcció de punxonat. Obtenim millor resultats en els esbocats realitzats en la direcció contrària al punxonat.
- En la majoria dels casos, el tall per aigua millora el ràtio d'esbocat i pot ser una alternativa per esbocar materials AHSS.
- El procés de tall per aigua no té tanta afectació com el de punxonat en funció del sentit en que es realitzen els esbocats.
- Es produeix un menor enduriment a la zona de tall a la tolerància del 12 % i al tall per aigua.
- Un augment de la fase dúctil (ferrita) en els materials DP (*Dual Phase*) i Martensítics no augmenta el ràtio d'esbocats.

8.-Bibliografia

- [1] ULSAB-AVC Consortium: *Technical Transfer Dispatch*, (2001).
- [2] International Iron and Steel Institute, Ultra Light Steel Auto Body - Advanced Vehicle Concepts (ULSAB- AVC) Overview Report (2002), www.worldautosteel.org.
- [3] C. Davis, D. Naylor, M. van Schaik, S. Anderson, In: Formability, <http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=18&pageid=2081271356>.
- [4] H. Lundh, P-Å. Bustad, B. Carlsson, G. Engberg, L. Gustafsson, R. Lindaren, Sheet Steel Forming Handbook, SSAB Tunnpååt AB, (1998), Lygner Marknadskontakt AB, Göteborg, p.5:8.
- [5] B.Carlsson, J.Larsson, T.Nilsson. Dual phase steels for auto body: Design, forming and welding aspects. SSAB Tunnpåat AB. 2005.
- [6] W.C. Oliver, G. M. Pharr, "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments, J. Mater. Res. 7(6) (1992) 1564-1583.
- [7] W.C. Oliver, G. M. Pharr, "Measurement of Hardness and Elastic Modulus by Instrumented Indentation: Advances in Understanding and Refinements to Methodology", J. Mater. Res. 19(1) (2004) 3-20.

-
- [8] B. Carlsson, J. Larsson, T. Nilsson. Dual phase steels for auto body: Design, forming and welding aspects. SSAB Tunplatt AB. 2005.
- [9] ISO/TS 16630, *Metallic materials – Method of hole expanding test*, 2003.
- [10] I. Picas, R. Hernández, D. Casellas and Isaac Valls. *Strategies to increase the tool performance in punching*. Congress International Deep Drawing Research. Graz 2010. DDRG2010.
- [11] I. Puskhareva. *Evolution microstructurale d'un acier Dual Phase. Optimisation de la résistance à l'endommagement*. Tesis doctoral. 2009.
- [12] Apuntes de Impacto Ambiental – José Antonio Ayllón (ETSE 2006); <http://www.ecologistasenaccion.org/article=5580>.
- [13] www.kmt-waterjet.com

Agraïments

En primer lloc, a la meva família i amics per la paciència i el recolzament al llarg de tot aquest període.

En segon lloc, a la Fundació CTM Centre Tecnològic de Manresa (CTM) i a qui el representa, en especial:

A Carles Abat i Daniel Caselles per haver-me donat l'oportunitat de poder realitzar aquest projecte. A David Gutierrez, per tutoritzar-me al llarg de tot el projecte d'una forma amigable i per la seva preocupació i passió per la feina. A Marc, Ignasi, Salva, Edu i Manu per ajudar-me en els laboratoris i ser els meus companys de feina durant aquest període. A la Núria per haver realitzat els assajos de nanoindentacions i haver-me donat tota la informació necessària per obtenir els resultats.

En tercer lloc, a Pau Solsona (UAB), per haver-me donat tota la confiança i haver-me ajudat a corregir i perfeccionar el projecte.

I per últim, a tots vosaltres que heu llegit el projecte.

Gràcies

Atentament,

Jordi

9.- Resum del projecte

En aquest projecte es presenta un estudi sobre punxonats i esbocats per a materials d'Alt límit elàstic (Acers AHSS; *Advanced High Strength Steels*), amb l'objectiu d'aconseguir saber quin és el millor procés de tall per aconseguir esbocats correctes.

Utilitzant la premsa hidràulica de la Fundació Centre Tecnològic de Manresa (CTM) es realitza el punxonat i els esbocats a tots els materials per tal d'avaluar el seu comportament alhora de ser esbocats. A partir d'aquests resultats obtindrem les gràfiques de ràtio d'esbocat per a cadascun dels materials en els diferents sentits de esbocat. Com a mètode alternatiu del procés de tall, es realitzen unes mostres amb tall per aigua.

S'observarà si els esbocats trenquen o no trenquen i en quines condicions ho fan.

Una vegada realitzats aquests assajos, es procedirà a realitzar l'estudi de microdureses amb un indentador Vickers per tal de comprovar l'afectació de l'operació de tall en la microestructura del material. Es realitzarà també algun perfil de dureses utilitzant el Nanoindentador.

Per finalitzar el projecte, s'inclourà un apartat de conclusions i un estudi mediambiental produït com a conseqüència de l'elaboració del projecte, així com un pressupost total d'aquest.