Projecte de Fi de Carrera

Enginyer Tècnic Industrial

Especialitat Mecànica

Disseny i instal·lació d'un equip experimental d'estampació en calent d'acers d'alta resistència per a l'obtenció dels paràmetres necessaris per a modelitzar i simular aquest procés.

MEMÒRIA

Autor: Carles Parera López

Directora: Maria Dolors Riera Colom

Convocatòria: Juny 2010 (pla d'estudis 2002)

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa

Resum

La necessitat de reduir el pes dels vehicles i augmentar-ne la seguretat, ha portat un creixement de l'ús d'acers d'alta resistència mecànica per a la fabricació de nous components estructurals de l'automòbil. Això suposa una reducció molt important de CO_2 a l'atmosfera. Existeixen molts tipus de tecnologies per a la producció d'aquests components, però el procés d'estampació en calent és capaç d'obtenir en una sola acció propietats mecàniques molt elevades. Per això, aquest procés ha estat guanyant molt protagonisme en els últims anys, especialment en la industria de l'automòbil. En front del conformat en fred, el treball en calent permet obtenir geometries molt acurades reduint efectes com l'springback que es donen en el treball en fred.

No obstant, en comparació amb el mètode tradicional de treball en fred, el disseny i optimització del procés d'estampació en calent requereix coneixements profunds de transferència de calor, ciència de materials, metal·lúrgica, etc. És un procés en el qual es donen molts fenòmens termo – mecànics – metal·lúrgics a la vegada i això en dificulta l'estudi i ajusts. Per això, resulta imprescindible la intervenció d'eines de simulació numèrica que permetin modelitzar i simular el procés per ajudar a dissenyar-lo i optimitzar-lo. Tot i així, la determinació dels paràmetres necessaris per modelitzar el procés resulta complicada i necessita recórrer a la validació experimental.

L'objectiu principal d'aquest projecte ha estat el disseny i posta apunt d'un equip experimental per a l'obtenció dels paràmetres necessaris per modelitzar i simular el procés d'estampació en calent.

Per tal d'assolir els objectius, primerament, s'ha realitzat un estudi de la tecnologia del procés de conformat en calent, la transferència de calor d'aquest, la problemàtica existent en la qualitat del contacte i les tècniques d'obtenció dels paràmetres per enginyeria inversa. Una vegada s'ha assolit el domini dels camps adequats, s'ha procedit a realitzar el disseny i ajustatge de l'equip experimental. Aquest, s'ha sensoritzat per tal d'obtenir les corbes d'evolució de la temperatura i la càrrega en funció del temps. La instal·lació de l'equip s'ha dut a terme a les instal·lacions del CTM Centre tecnològic, en una premsa situada al laboratori.

Més enllà de l'abast i objectius principals del projecte, s'ha aconseguit realitzar diferents assaigs experimentals per a diferents pressions de contacte i s'ha estudiat la influència de que té la pressió i temperatura en la velocitat de refredament de la xapa i, per tant, en la

transferència de calor en el contacte. També s'ha realitzat proves per quantificar la influència dels mals ajusts pel que fa a l'offset entre matriu i punxó a la realitat que hauria de ser igual a l'espessor de la xapa a conformar.

Finalment, s'ha utilitzat l'eina de càlcul per elements finits per tal de trobar per enginyeria inversa alguns valors de conductància tèrmica de contacte en funció de la pressió i la temperatura.

Agraïments

Primerament, vull agrair a la directora del projecte Dra. Mª Dolors Riera Colom el seu suport i ajut incondicional i al CTM Centre Tecnològic per brindar-me la oportunitat de realitzar aquest meravellós projecte fi de carrera i cedir tots els recursos que han fet falta per dur-lo a terme.

Agraïments també a les persones que m'han ajudat, tant en l'aspecte tècnic com en el físic. Aquests són Marc Grané Vilaseca, Xavier Gómez Garcia i Jordi Ricart Coll.

A tot el grup de Simulació i disseny innovador, MOLTES GRÀCIES.

Índex

1 Introducció 9
1.1 Importància del conformat per estampació en calent a la industria 9
1.2 Problemàtica existent 10
1.3 Objectius i pla del projecte 11
1.4 Abast del projecte 12
2 Estampació en calent de xapa d'acer d'alta resistència mecànica 13
2.1 Descripció del procés i la tecnologia 13
2.2 Materials utilitzats en l'estampació en calent de xapa 15
2.2.1 Evolució de l'estructura metal·lúrgica de l'USIBOR 1500P 18
2.3 Transferència de calor en el procés d'estampació en calent 20
2.3.1 Mètode d'obtenció de la conductància tèrmica de contacte 25
3 Disseny de l'equip d'estampació plana en calent 27
3.1 Infraestructura i equips 27
3.2 Sensorització de càrrega i temperatura 32
3.3 Resultat del disseny 44
4 Assaigs experimentals 48
4.1 Objectius 48
4.2 Mètode d'assaig 49
4.3 Resultats dels assaigs experimentals 51
4.3.1 Corbes temperatura – temps per diferents pressions de contacte 51
4.3.2 Corbes de temperatura – temps per diferents offsets de contacte 62
4.3.3 Disseny d'experiment. Factorial complet 2^2 65
4.4 Conclusions dels assaigs experimentals 73
5 Simulació numèrica pel mètode dels elements finits 75
5.1 Introducció als elements finits 75
5.2 Geometries 3D i model geomètric 76
5.3 Propietats dels materials 78
5.4 Mallat i model d'elements finits 81

5.5 Condicions de contorn i de càrrega 84

5.5 Resultats i conclusions 91

6 Conclusions 96

7 Accions futures 98

8 Impacte ambiental 99

9 Bibliografia 101

Índex de figures

Figura 2. 1 Distribució dels materials usats en el xassís d'un Volvo s60. 13
Figura 2. 2 Evolució de l'estructura de l'acer durant el procés. 14
Figura 2. 3 Distribució energia xoc frontal 15
Figura 2. 4 Distribució energia xoc posterior 15
Figura 2. 5 Distribució energia xoc lateral 15
Figura 2. 6 Classificació dels acers segons deformació i tensió màxima. 16
Figura 2. 7 Estructura metal·lúrgica de l'USIBOR 1500 P abans de l'estamació. 18
Figura 2. 8 Estructura final de l'USIBOR 1500 P estampat en calent. 19
Figura 2. 9 Recobriment superficial al final del procés d'estampació en calent. 19
Figura 2. 10 Soldadura per punts USIBOR-USIBOR. 20
Figura 2. 11 Geometria real d'un contacte xapa-eina..... 20
Figura 2. 12 Càlculs inicials de tailored tool per simulació numèrica en Abaqus. 23
Figura 2. 13 Muntant B amb variació de propietats mecàniques al llarg de la peça. Extrems dúctils i zona central resistent. 24
Figura 2. 14 Disseny de matrius d'assaig per a l'obtenció de la conductància tèrmica de contacte. 26

Figura 4. 1 Procés d'estampació plana en calent de xapa dels assaigs experimentals. 49
Figura 4. 2 Configuració de la premsa per als assaigs experimentals. 50
Figura 4. 3 Diagrama CCT de l'acer USIBOR 1500 P sota una deformació aproximada de 0,3. Obtingut d'Arcelor, fabricants de l'acer en qüestió. 53
Figura 4. 4 Mètode de col·locació dels espessors per als assaigs d'offsets. 62

Figura 5. 1 Geometria 3D del format de xapa de 90x150x1.9. 76
Figura 5. 2 Vista en perspectiva 3D i amb transparència en les cares frontals. 77
Figura 5. 3 Partició central de la matriu superior. 77
Figura 5. 4 Vista en perspectiva 3D i amb transparència en les cares frontals. 78
Figura 5. 5 Partició central de la matriu inferior 78
Figura 5. 6 Conjunt 3D de les peces que composen el model. 81
Figura 5. 7 Mallat 3D de la matriu superior. 82
Figura 5. 8 Detall interior de la malla de la matriu superior. 82
Figura 5. 9 Mallat 3D de la matriu inferior. 83
Figura 5. 10 Mallat 3D del format de xapa. 83

Figura 5. 11 Model d'elements finits 3D del conjunt experimental. 84
Figura 5. 12 Propietats de convecció a les cares laterals de les matrius. 85
Figura 5. 13 Propietats de convecció a les cares externes de les matrius. 86
Figura 5. 14 Propietats de convecció i radiació en la xapa. 86
Figura 5. 15 Propietats de convecció i radiació en la xapa per a la primera etapa de càlcul. 87

Figura 8. 1 Evolució del percentatge d'acer reciclat. 100

Índex de gràfics

Gràfic 3. 1 Evolució de les temperatures en funció del temps per a les diferents geometries de soldadura. 42

Gràfic 4. 1 Un dels tres assaigs realitzats amb una pressió de contacte de 2MPa. 51
Gràfic 4. 2 Etapes dels assaigs d'estampació plana en calent de xapa. Resposta dels termoparells en les diferents etapes. 52
Gràfic 4. 3 Corbes de velocitat de refredament en funció del temps a partir del pic de pressió de la cèl·lula de càrrega per als tres assaigs realitzats a 2MPa. 54
Gràfic 4. 4 Evolució de la velocitat de refredament amb la temperatura. Pressió de 2MPa. 55
Gràfic 4. 5 Gràfic d'evolució de les temperatures i càrrega en funció del temps. 56
Gràfic 4. 6 Corbes d'evolució de la velocitat de refredament en funció del temps, a partir del pic de pressió, per als tres assaigs a una pressió de 5MPa. 57
Gràfic 4. 7 Evolució de la velocitat de refredament amb la temperatura dels tres assaigs amb una pressió de contacte de 5MPa. 57
Gràfic 4. 8 Evolució de les temperatures en funció del temps per a un dels assaigs realitzats a una pressió de contacte de 8MPa. 58
Gràfic 4. 9 Evolució de la velocitat de refredament amb el temps per a 8MPa. 59
Gràfic 4. 10 Evolució de la velocitat de refredament amb la temperatura per a 8MPa 59
Gràfic 4. 11 Evolució de la temperatura i la càrrega en funció del temps per a un dels assaigs amb pressió de contacte de 15MPa. 60
Gràfic 4. 12 Evolució de la velocitat de refredament en funció del temps per als tres assaigs realitzats a 15 MPa de pressió. 61
Gràfic 4. 13 Evolució de la velocitat de refredament en funció de la temperatura per als tres assaigs realitzats a 15MPa de pressió. 61
Gràfic 4. 14 Evolució de la velocitat de refredament en funció del temps, a partir del pic de pressió, per als deferents assaigs d'offset de contacte. 63
Gràfic 4. 15 Evolució de la velocitat de refredament en funció de la temperatura 64
Gràfic 4. 16 Evolució de la velocitat de refredament en funció del temps per als tres assaigs realitzats a una pressió de contacte de 2MPa i una temperatura d'entrada de 200ºC. 68
Gràfic 4. 17 Evolució de la velocitat de refredament en funció de la temperatura per als assaigs a 2MPa de pressió i 200ºC de temperatura d'entrada. 68

Gràfic 4. 18 Evolució de la velocitat de refredament en funció del temps per als assaigs a 15MPa de pressió i 200ºC de temperatura d'entrada. 69
Gràfic 4. 19 Evolució de la velocitat de refredament en funció de la temperatura per als assaigs a 15MPa de pressió i 200ºC de temperatura d'entrada. 69
Gràfic 4. 20 Mitjana de les velocitats de refredament per cada combinació del disseny d'experiment. 70
Gràfic 4. 21 Gràfic de resultats de la matriu d'experiments. 71
Gràfic 4. 22 Influència de les variables d'estudi sobre la resposta. En aquest cas, la velocitat de refredament. 71
Gràfic 4. 23 Gràfic d'interacció entre les dues variables; pressió i temperatura d'entrada. 72

Gràfic 5. 1 Evolució de temperatura i càrrega en funció del temps. 88
Gràfic 5. 2 Evolució de la temperatura superficial de la xapa amb un refredament a l'aire per radiació. 89
Gràfic 5. 3 Assaig experimental per a 2MPa de pressió. 90
Gràfic 5. 4 Assaig experimental per a 15MPa de pressió. 90
Gràfic 5. 5 Valors de conductància tèrmica de contacte en funció de la temperatura per a una pressió de 2MPa. 91
Gràfic 5. 6 Increment de temperatura entre la xapa i la matriu per a 2MPa. 92
Gràfic 5. 7 Ajust de la simulació amb les corbes experimentals per a una pressió de contacte de 2MPa. 92
Gràfic 5. 8 Valors de conductància tèrmica de contacte en funció de la temperatura per a una pressió de 15MPa. 93
Gràfic 5. 9 Increment de temperatura entre la xapa i la matriu per a 15MPa. 94
Gràfic 5. 10 Ajust de la simulació amb les corbes experimentals per a una pressió de contacte de 15MPa. 94

Índex de taules

Taula 2. 1 Composició química de l'acer USIBOR 1500P desenvolupat per Arcelor... 18

Taula 3. 1 Taula dels diferents tipus de termoparell, materials de fabricació i rang de temperatures amb què treballen. 40
Taula 3. 2 Requeriments geomètrics i de material principals. 46

Taula 4. 1 Factors i dominis escollits. 66
Taula 4. 2 Matriu d'experiments del disseny factorial complet 2^2. 67
Taula 4. 3 Velocitats de refredament màximes obtingudes en les tres repeticions dels 4 assaigs del disseny d'experiment. 70

Taula 5. 1 Descripció de les propietats tèrmiques de l'USIBOR 1500P. 79
Taula 5. 2 Descripció d'algunes de les propietats mecàniques més importants de l'USIBOR 1500P. 80
Taula 5. 3 Propietats tèrmiques de l'acer d'eina d'alta conductivitat. 80
Taula 5. 4 Principals propietats mecàniques de l'acer d'eina d'alta conductivitat. 81

Taula 8. 1 Consum d'energia elèctrica i emissions de CO_2 a l'atmosfera. 99
Taula 8. 2 Consum de combustible fòssil i emissions de CO_2 a l'atmosfera. 100

Índex de fórmules

Equació 2. 1 Transferència de calor per conducció 21
Equació 2. 2 Transferència de calor per convecció 21
Equació 2. 3 Transferència de calor per radiació 21
Equació 2. 4 Definició de la transferència de calor en un contacte. 22

1 Introducció

1.1 Importància del conformat per estampació en calent a la industria

El conformat de xapa metàl·lica a altes temperatures ha estat guanyant molta importància en els últims anys, especialment, en la industria de l'automòbil. Els principals objectius d'aquesta han estat l'alleugeriment de pes, la reducció del consum de combustible, la reducció de l'emissió de gasos CO_2 a l'atmosfera i l'increment de la seguretat en els xocs. Tot això, acompanyat d'una producció de components estructurals amb una qualitat final més acurada tan pel que fa a geometria com a les propietats mecàniques. Tots aquests requeriments han portat a una recerca forçada de nous processos industrials per a obtenir nous productes amb unes prestacions mecàniques molt més elevades i, a la vegada, obtenir un alleugeriment de pes considerable [1], [2], [3].

Els principals materials metàl·lics utilitzats per a la producció de components estructurals en la industria de l'automòbil han estat els diferents aliatges existents d'alumini i d'acer, però la introducció dels acers d'ultra alta resistència mecànica va suposar una gran solució innovadora que va poder fer front als requeriments de pes i resistència. No obstant, el conformat d'aquests acers a temperatura ambient comporta grans limitacions en la geometria i, a més a més, fenòmens com l'springback el fan gairebé inviable. Per això, el conformat en calent de xapa va anar guanyant tant de protagonisme.

En el procés de conformat de xapa per estampació en calent l'acer s'escalfa fins a la temperatura d'austenització, posteriorment es transporta fins a la premsa on, en una sola acció, les matrius s'encarreguen de deformar la xapa donant-li la forma esperada a la vegada que es produeix una velocitat de refredament prou alta com per trempar la peça i obtenir així, una estructura completament martensítica. Aquest procés aporta a l'acer unes propietats mecàniques molt elevades, amb resistències de fins a 1600 MPa, per això, l'espessor de la xapa es pot reduir i obtenir així, ràtios de propietats mecàniques – pes molt elevades.

En comparació amb les tradicionals operacions de conformat, el disseny del procés d'estampació en calent requereix un coneixement profund dels fenòmens tèrmics, mecànics i metal·lúrgics que s'hi produeixen. Per tal de realitzar l'estudi i disseny de l'equip de conformat és imprescindible l'eina de simulació per elements finits. Aquesta eina permet estudiar l'eficiència de tots els components de l'equip pel que fa als fenòmens tèrmics, mecànics, metal·lúrgics, etc. Entre d'altres coses, permet estudiar

l'eficiència dels circuits de refrigeració, dels materials de les matrius, la qualitat final del producte, les seves propietats mecàniques finals, etc. No obstant això, la representació d'un model termo – mecànic - metal·lúrgic en el mètode dels elements finits no resulta trivial. S'han de conèixer tots els paràmetres del procés, tan els tèrmics com els mecànics, a més a més de l'evolució de les diferents fases del material en el refredament. Aquesta eina resulta molt útil a fi d'obtenir un resultat molt acurat en el disseny del procés sempre i quan hi hagi hagut una bona modelització i simulació del procés. És clar però, que no resulta senzill obtenir tots els paràmetres necessaris per a modelitzar correctament el procés, per això, moltes vegades s'ha de recórrer a les proves i validacions experimentals i a l'obtenció dels paràmetres per enginyeria inversa.

1.2 Problemàtica existent

L'estampació en calent de xapa d'acer avançat d'alta resistència mecànica s'utilitza en la industria de l'automòbil per a la producció de components del xassís com els para-xocs, els muntants laterals i frontals (anomenats "pilars B i A" respectivament) i els reforços laterals de les portes entre d'altres. Aquest procés els aporta principalment molt bones propietats i característiques pel que fa al pes, la resistència a impacte i també una geometria final molt acurada degut a la reducció de l'springback i l'augment de conformabilitat [4].

L'afany d'obtenir una reducció del pes en els vehicles, una major seguretat a l'impacte i una reducció de les emissions de CO_2 a l'atmosfera ha obligat als científics a innovar i desenvolupar noves tecnologies i processos com és el cas de l'estampació en calent. El consum dels nous acers utilitzats en aquest procés s'ha quadruplicat en els últims 5-6 anys.

Un dels grans avantatges que ofereix el treball en calent de xapa és la conformabilitat, amb la qual s'obté una reducció de les càrregues necessàries per conformar la peça i una reducció de fenòmens com l'springback.

El procés de conformat per estampació en calent ha patit un gran desenvolupament i en els últims anys ja es parla de noves tecnologies que permetran obtenir peces amb diferents propietats mecàniques en el pla horitzontal de la peça. Per a que això sigui factible es necessita un gran domini del procés i dels fenòmens que s'hi produeixen. Per a realitzar l'estudi i disseny d'aquests nous equips resulta imprescindible

modelitzar-los i simular-los pel mètode dels elements amb l'objectiu que siguin eficients i conèixer les propietats del producte final.

No obstant, la simulació per elements finits del procés d'estampació en calent es troba en una etapa de desenvolupament mitja i, en la majoria dels casos, la modelització del procés depèn dels coneixements experimentals d'alguns experts. El principal problema alhora de modelitzar aquest procés és la determinació dels paràmetres tèrmics, mecànics i metal·lúrgics del mateix. Aquest projecte es centrarà bàsicament en l'estudi de la transferència de calor existent en el contacte entre la xapa i les matrius.

El domini i coneixement dels fenòmens tèrmics que es produeixen en el procés és imprescindible ja que fan variar la velocitat de refredament del material i, per tant, fan variar les propietats finals del producte. No són menys importants altres paràmetres com poden ser les propietats elastoplàstiques de l'acer a conformar en funció de la temperatura i la deformació, els fenòmens de transformació de fase de material, entre d'altres, però existeix molta literatura cientifico-tècnica que defineix aquestes propietats.

Així doncs, l'estudi experimental d'alguns paràmetres del procés passa a ser totalment necessari per a poder verificar i validar les simulacions fetes pel mètode dels elements finits.

El desenvolupament de l'eina dels elements finits i la seva utilització és indispensable per continuar oferint a la industria la potència en l'estudi, càlcul i disseny dels equips necessaris per obtenir un producte final amb les propietats i funcionalitat desitjades, a més de l'estalvi de temps i costos que suposa la utilització de la simulació.

1.3 Objectius i pla del projecte

El principal objectiu del projecte és el disseny i posta apunt d'un equip experimental d'estampació plana en calent que permeti obtenir els paràmetres termomecànics necessaris per a la modelització i simulació del procés.

El treball està dividit en set apartats. En el primer hi ha una breu definició del procés de conformat per estampació en calent de xapa i la seva importància en la industria. És en aquest punt on s'exposen la motivació, els objectius i l'abast d'aquest projecte. El segon apartat descriu tota la teoria del procés d'estampació en calent, els fenòmens termomecànics i metal·lúrgics que s'hi produeixen i els materials utilitzats en les eines i en la xapa. En aquest punt es defineixen els paràmetres que es poden obtenir a partir de les proves experimentals que es realitzaran i els mètodes per fer-ho. El tercer

apartat correspon al disseny, sensorització i ajust de l'equip experimental. Els assaigs experimentals realitzats i els resultats obtinguts es troben en el quart apartat. En el cinquè hi ha la modelització i simulació del procés experimental i la comparativa en forma de validació o verificació entre els resultats experimentals i els de la simulació per elements finits. Les conclusions finals es troben en el sisè apartat i en el setè hi ha una descripció d'accions futures.

1.4 Abast del projecte

En aquest projecte es pretén assolir un coneixement dels processos de conformat per estampació en calent de xapa d'acer d'alta resistència mecànica que permetin dominar els fenòmens que s'hi produeixen, tant els tèrmics com els mecànics. Caldrà conèixer també els requeriments principals de les peces que s'obtenen mitjançant aquest procés i quines són les tendències de la industria, què és el que es vol obtenir i quines són les limitacions per fer-ho.

Per això serà necessari assolir coneixements de ciència de materials, de transferència de calor i altres. Això permetrà estudiar i entendre la problemàtica existent en el procés i la problemàtica per obtenir peces amb noves propietats.

Finalment, una vegada assolits tots aquests objectius, s'haurà de dissenyar i ajustar un equip d'estampació plana en calent de xapa per a la obtenció dels paràmetres necessaris per modelitzar i simular aquest tipus de procés.

Així doncs, l'abast arriba fins a la instal·lació i ajust de l'equip experimental. Cal tenir controlada la presa de dades i la manera de tractar els errors que es donen en les mesures.

Tot el que es presenti més enllà d'aquests objectius quedarà fora de l'abast del projecte.

2 Estampació en calent de xapa d'acer d'alta resistència mecànica

2.1 Descripció del procés i la tecnologia

La introducció dels acers avançats d'alta resistència mecànica, anomenats també acers AHSS (*Advanced High Strenght Steels*), són acers al bor amb altes propietats de trempabilitat. El conformat per estampació en calent d'aquests acers ha permès a la industria de l'automòbil obtenir peces de gran resistència mecànica. Així, s'ha aconseguit una reducció de l'espessor de la xapa i, per tant, reduir el pes del vehicle i les emissions de CO_2 a l'atmosfera. Gràcies a l'augment de la resistència mecànica hi ha hagut un increment notable de la seguretat dels ocupants del vehicle. En la Figura 2. 1 s'observen els elements estructurals del xassís d'un cotxe i els materials utilitzats per a la seva fabricació. En funció dels requeriments de cada part estructural del xassís s'escull un material que aporti més o menys resistència mecànica a l'element.

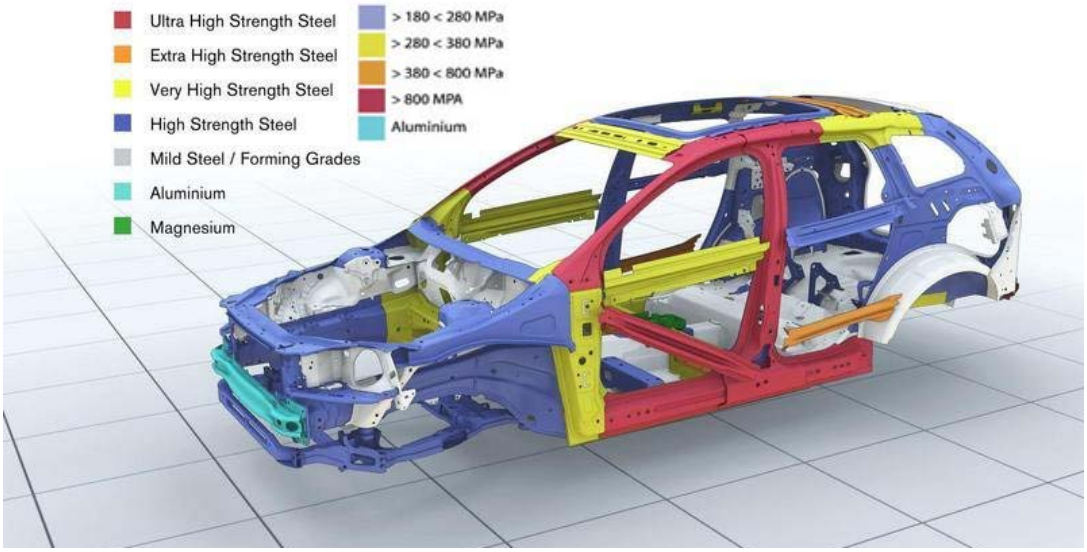


Figura 2. 1 Distribució dels materials usats en el xassís d'un Volvo s60.

En els últims anys hi ha hagut un augment molt significatiu de l'ús dels acers AHSS en front dels acers HSS en els elements estructurals dels vehicles. Actualment, entre el 10 i el 20 per cent dels elements del xassís són fabricats amb acers avançats d'alta resistència mecànica i es preveu que aquestes xifres augmentin fins a duplicar-se en els propers anys.

El procés de conformat per estampació en calent de xapa d'acer es duu a terme en tres etapes. En la primera, la xapa parteix d'una estructura ferrítica-perlítica i s'escalfa fins arribar a la temperatura d'austenització del material (entre 900 i 950ºC) durant el temps òptim per a obtenir un estructura totalment austenítica. La segona etapa és la de transport de la xapa des del forn fins la premsa. S'ha de fer el més ràpid possible per evitar que el descens de temperatura no sigui massa elevat. En la tercera etapa, un cop situada la xapa, s'estampa la peça entre les matrius on s'hi produeixen els fenòmens de deformació i refredament simultàniament. L'objectiu d'aquesta etapa és obtenir velocitats de refredament superiors a la crítica de tremp per poder obtenir una estructura totalment martensítica. Aquest procés aporta als acers al bor resistències a fractura de fins a 1600 MPa. En la figura Figura 2. 2 s'observa un esquema simplificat del procés amb l'evolució de l'estructura que té l'acer en cada etapa.

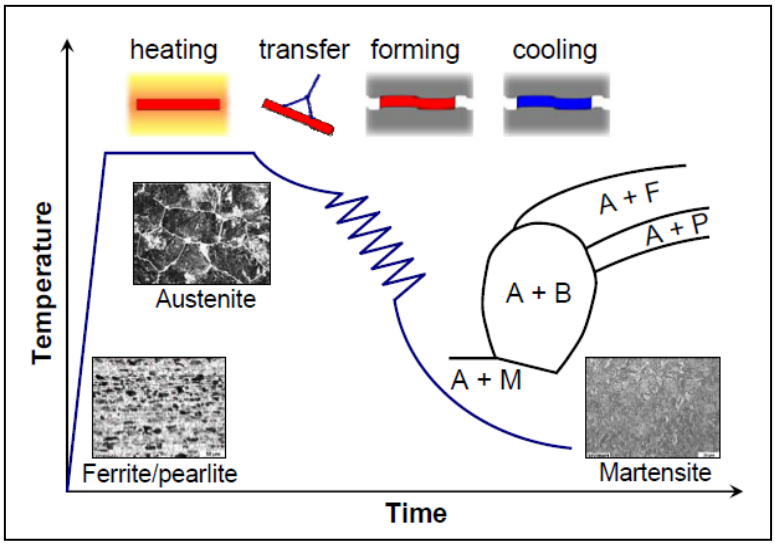


Figura 2. 2 Evolució de l'estructura de l'acer durant el procés.

En els darrers anys, degut a la importància i creixement de l'ús d'aquest procés per a l'obtenció de peces de altes prestacions mecàniques, hi ha hagut una constant investigació en el camp del conformat en calent i un gran desenvolupament de nous materials i nous processos. L'objectiu de l'estampació en calent de xapa ja no és tan sols l'obtenció de grans propietats mecàniques en la peça. S'ha anat més enllà. Es vol obtenir peces amb varies propietats mecàniques en el sentit horitzontal de la peça. Això permetrà augmentar la seguretat en el xoc dels vehicles. L'objectiu és obtenir peces que una part d'elles impedeixi la penetració i transporti l'energia cap a la part que absorbirà l'energia deformant-se plàsticament. Això es pot aconseguir soldant diferents materials, variant l'espessor de la xapa, etc. Però l'objectiu és obtenir per un

mateix material i mateix espessor varies propietats mecàniques. Això només es possible aconseguint una estructura diferent en la xapa durant el procés de conformat, per tant, han d'haver-hi diferents velocitats de refredament en una part i una altra de la xapa. En les següents figures observem la distribució de l'energia dels xocs gràcies a les diferents propietats mecàniques dels diferents elements del xassís del cotxe.

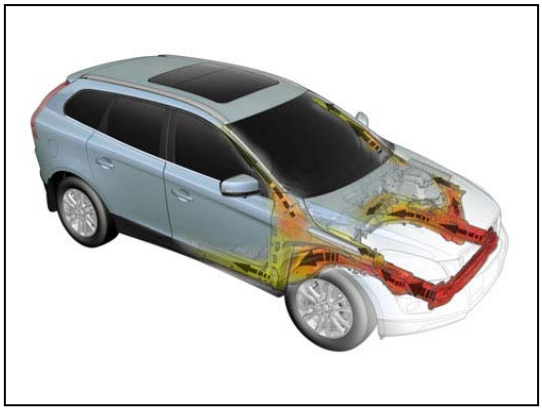


Figura 2. 3 Distribució energia xoc frontal

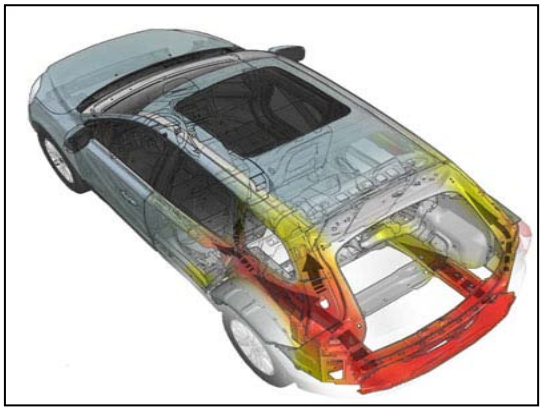


Figura 2. 4 Distribució energia xoc posterior

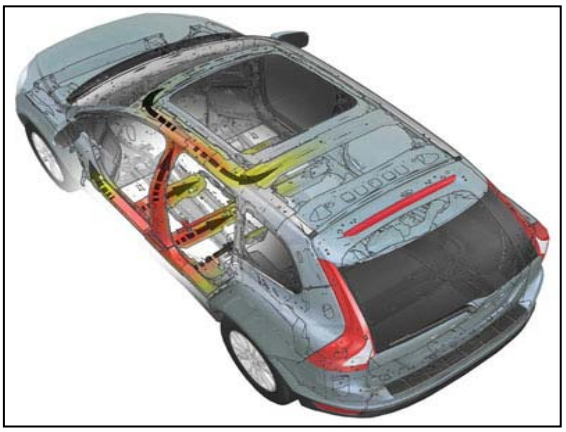


Figura 2. 5 Distribució energia xoc lateral

2.2 Materials utilitzats en l'estampació en calent de xapa

Per a l'obtenció d'un producte amb les propietats mecàniques desitjades resulta imprescindible tenir controlades les propietats dels materials usats tan en les eines com en les peces a deformar, així com els fenòmens que es produeixen durant el procés .

S'han desenvolupat diferents tipus d'acers segons les necessitats que han anat sorgint en la industria. En el cas de la industria de l'automoció, hi ha una gran varietat d'acers.

La Figura 2. 6 il·lustra la varietat d'acers usats en automoció segons les seves propietats de deformació total i de resistència màxima [5].

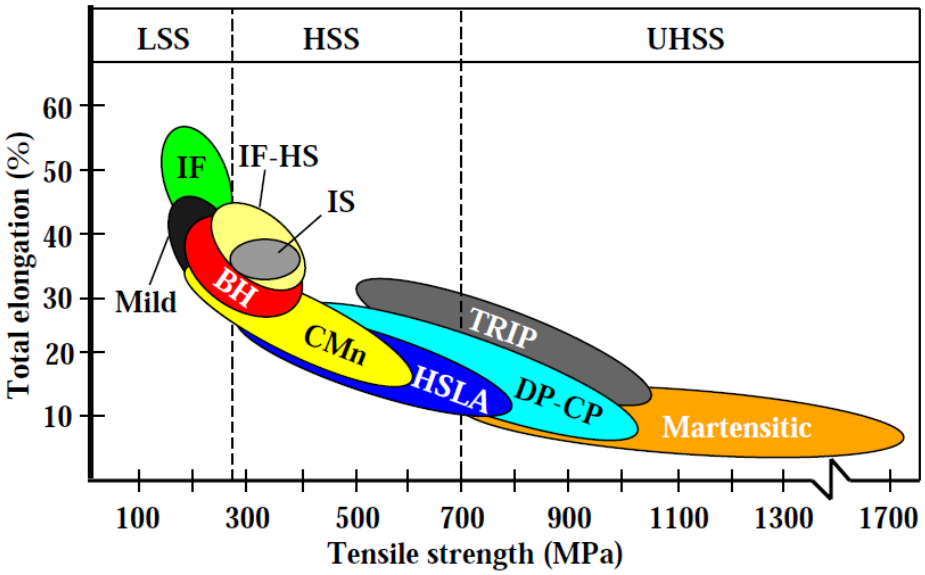


Figura 2. 6 Classificació dels acers segons deformació i tensió màxima.

Els acers utilitzats en la industria de l'automoció es poden classificar segons els diferents criteris descrits a continuació [6].

- Segons característiques metal·lúrgiques:
    - Acers de baixa resistència mecànica (LSS): Acers per estampació i IF (interstitial-free).
    - Acers de alta resistència mecànica (HSS): Carboni-Manganès (CMn), bake hardenable (BH), IF d'alta resistència (IF-HS), microaleats (HSLA).
    - Acers avançats d'alta resistència mecànica (AHSS): dual-phase (DP), acers TRIP, de fase complexa (CP) i acers martensítics.
- Segons les propietats mecàniques (resistència màxima):
    - Baixa resistència mecànica (LSS): tensió màxima < 270 MPa.
    - Alta resistència mecànica (HSS): tensió màxima de 270-700 MPa.
    - Ultra alta resistència mecànica (UHSS): tensió màxima >700 MPa.

Pel que fa als acers d'eines per treball en calent, han de complir una sèrie de requisits molt importants per a assegurar una llarga vida útil. Han de ser resistents a temperatures altes i tenir per tant, una resistència a fatiga pel xoc tèrmic que pateixen contínuament. Han de tenir dureses molt altes per a poder conservar la seva geometria i evitar el desgast i alhora han de ser tenaços per suportar i absorbir l'energia dels cops que pateixen les eines en funcionament sense trencar-se ni propagar esquerdes. Són acers de fàcil mecanitzat degut a les geometries tan complicades que han d'assolir. Han de tenir molt bona trempabilitat ja que, una vegada mecanitzats, se'ls aplica un tractament tèrmic per assolir gran resistència mecànica, especialment a la superfície, i assolir dureses de fins a 50-60 HRc [7].

Tan o més importants que les propietats mecàniques són les propietats tèrmiques. L'objectiu d'aquests acers d'eines és ja en l'actualitat, oferir velocitats de refredament molt altes per minimitzar el temps de refredament, augmentant així el numero de peces per unitat de temps i, per tant, la producció. Això s'aconsegueix controlant molt bé les propietats tèrmiques de conductivitat i calor específic. En els últims anys s'han desenvolupat acers amb una alta conductivitat tèrmica (fins gairebé el doble), la qual cosa permet a les eines reduir el nombre de cicles necessaris per estabilitzar el procés. A més a més, es redueix la temperatura màxima d'estabilització de les eines.

Per tant, la combinació que aconsegueix assolir peces de altes resistències mecàniques és utilitzar acers d'eines de treball en calent d'alta resistència mecànica que estampin acers el bor d'alta trempabilitat que permetin obtenir una estructura totalment martensítica al finalitzar el procés d'estampació en calent.

En aquest treball s'utilitzaran els següents materials:

- **Per a les eines:** acer d'alta conductivitat tèrmica fabricat per Rovalma, S.A (HTCS-*High Thermal Conductivity Steel*). Compleix tots als requisits descrits anteriorment i té una alta conductivitat tèrmica. La seva taula de composició química és confidencial, per això no s'inclou en aquest treball. Existeixen varis tipus o models d'HTCS amb diferents propietats tèrmiques i mecàniques. Més endavant, es descriuran amb exactitud les propietats de l'acer utilitzat en aquest treball.

- **Per a la xapa:** acer al bor anomenat USIBOR 1500P amb un recobriment d'alumini i silici per a protegir-lo de la oxidació i la descarburació durant el conformat en calent desenvolupat per Arcelor^{TM}. Té altes propietats de trempabilitat i conformabilitat. Evita la recuperació elàstica treballant en calent i

es capaç d'obtenir una estructura gairebé 100% martensítica i molt homogènia gràcies a la seva composició química. En la Taula 2. 1 s'observa la seva composició química.

Acer	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P	Al	V	Ti	B
USIBOR 1500	0,221	0,28	1,29	0,193	0,013	0,01	0,001	0,018	0,032	0,005	0,039	0,0038

Taula 2. 1 Composició química de l'acer USIBOR 1500P desenvolupat per Arcelor.

2.2.1 Evolució de l'estructura metal·lúrgica de l'USIBOR 1500P

Durant el procés d'estampació en calent és important controlar de principi a fi els canvis en l'estructura de l'acer deguts a les variacions de temperatura que són els que determinaran les propietats termomecàniques finals de la peça [6].

En la Figura 2. 7 s'observa l'estructura metal·lúrgica inicial de l'USIBOR 1500 P amb el respectiu recobriment d'alumini i silici.

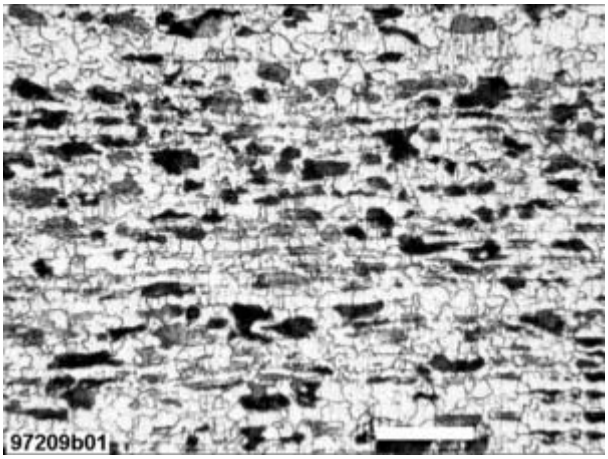


Figura 2. 7 Estructura metal·lúrgica de l'USIBOR 1500 P abans de l'estamació.

Inicialment, l'USIBOR 1500 P presenta un estructura ferrítica-perlítica amb un recubriment d'uns 25 µm amb una capa de Al-Fe-Si i una capa d'Al-Si final. Aquest recubriment, una vegada s'ha escalfat la xapa fins a la temperatura d'austenització es transforma per difusió, en una única capa aliada d'Al-Fe-Si adherent al substrat que proporciona una protecció anticorrosiva, a més d'evitar la creació de cascarilla que podria embrutar i danyar les eines i la descarburació de l'acer durant el procés. A més

a més, permet que la peça pugui ser pintada sense fer cap més tractament superficial. La Figura 2. 8 il·lustra l'estructura que presenta la xapa un cop estampada, una estructura 100% martensítica i molt homogènia. En la Figura 2. 9 s'observa l'estructura final del recobriment Al - Fe - Si totalment adherit al substrat.

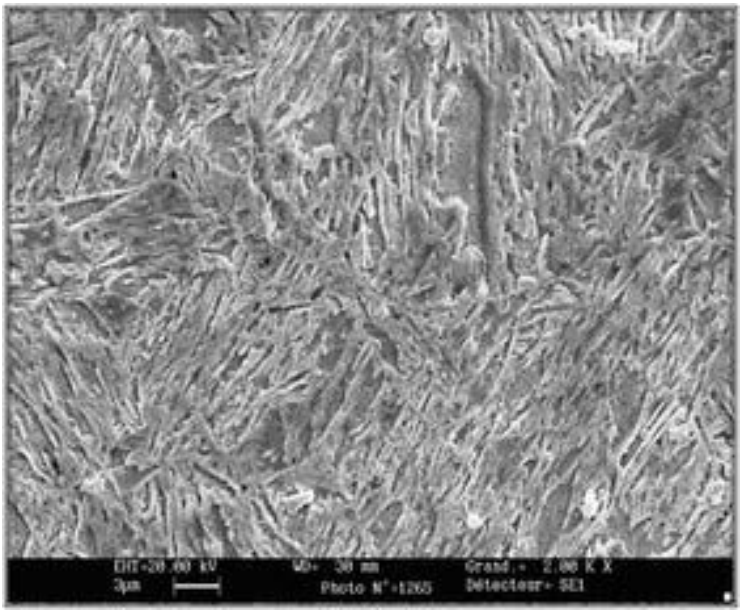


Figura 2. 8 Estructura final de l'USIBOR 1500 P estampat en calent.

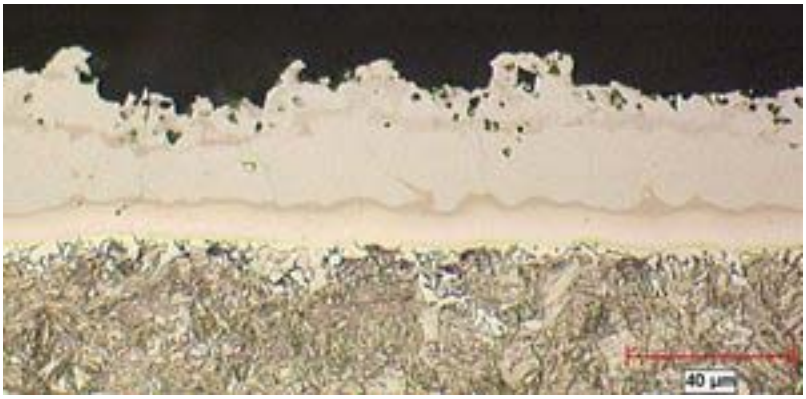


Figura 2. 9 Recobriment superficial al final del procés d'estampació en calent.

S'observa en la Figura 2. 9 que el recobriment al final del procés presenta un molt bon estat, és per això que la peça queda protegida de l'oxidació. Un altre avantatge que presenta aquest material és la soldabilitat un cop realitzat el tractament tèrmic en el procés. En la Figura 2. 10 s'observa l'estructura que presenta la unió soldada entre USIBOR-USIBOR amb soldadura per punts.

Figura 2. 10 Soldadura per punts USIBOR-USIBOR.

2.3 Transferència de calor en el procés d'estampació en calent

De principi a fi del procés de conformat per estampació en calent de xapa, el control dels fenòmens de transferència de calor és indispensable per a controlar les propietats finals del producte. Especialment, una vegada la xapa surt del forn. En la fase de transport s'ha d'anar el màxim ràpid possible per evitar pèrdues de calor que facin disminuir la temperatura en excés. És la tercera fase, la més completa i complexa d'estudiar, per això serà l'objecte d'estudi del treball.

En la tercera etapa, la d'estampació de la xapa a alta temperatura, es produeixen varis fenòmens tèrmics en el moment en que la xapa i les eines entren en contacte i fins al final. En aquesta fase es dóna un refredament molt ràpid de la xapa degut a la alta conductivitat tèrmica de les eines i a altres paràmetres que són objecte d'estudi forçat per controlar la transferència de calor del procés. A la vegada es produeix la deformació i estampació de la peça.

És clar que tenint les propietats tèrmiques de les eines i del material a deformar es pot controlar la transferència de calor existent al llarg del material, però, què passa en el contacte? Com influeixen les diferents variables del procés en la qualitat del contacte i, per tant, la transferència de calor existent? En la Figura 2. 11 s'observa en detall les característiques geomètriques d'un contacte real.

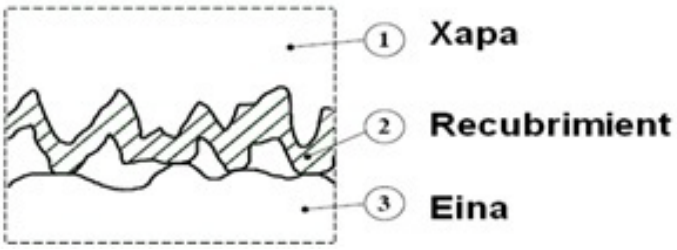


Figura 2. 11 Geometria real d'un contacte xapa-eina

S'observa que en un contacte sòlid – sòlid no només es dóna el fenomen de conducció tèrmica sinó que es donen els tres fenòmens de transferència de calor: la conducció, la convecció i la radiació. D'aquesta manera tenim tres equacions que defineixen el contacte tèrmic entre la xapa i les eines [8], [9] .

$$q = -k\frac{dT}{dx} \ \left[W/m^2\right]$$

Equació 2. 1 Transferència de calor per conducció

$$q_c = h_c(T_1 - T_2)\left[W/m^2\right]$$

Equació 2. 2 Transferència de calor per convecció

$$q_r = \varepsilon\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)\left[W/m^2\right]$$

Equació 2. 3 Transferència de calor per radiació

Sent,

K: *coeficient de transferència de calor per conducció (W/mK).*

h_c: *coeficient de transferència de calor per convecció (W/m^2K).*

H_r: *coeficient de transferència de calor per radiació (W/m^2K^4).*

Com ja s'ha vist en la introducció, l'eina de simulació numèrica per elements finits és indispensable per a l'estudi, disseny i desenvolupament dels processos de conformat en calent. El handicap és que resulta molt complicat obtenir tots els paràmetres (tèrmics, mecànics i metal·lúrgics) que permeten modelitzar i simular el procés amb exactitud. Veient les equacions anteriors i la heterogeneïtat del contacte ja sembla complicat trobar un flux de calor equivalent que serveixi per obtenir els paràmetres tèrmics de les equacions però, a més a més, se sap que aquests paràmetres varien en funció de la temperatura, pressió, rugositat, etc. Per això, sembla gairebé impossible trobar els paràmetres termomecànics que defineixen el contacte de l'estampació en

calent. És necessari simplificar el model d'equacions i trobar-ne una d'equivalent en el contacte. *L'Equació 2. 4* representa el flux de calor equivalent en un contacte tèrmic.

$$q_{eq} = h(T_1 - T_2)\ [W/m^2]$$

Equació 2. 4 Definició de la transferència de calor en un contacte.

Sent,

h : *coeficient de conductància tèrmica de contacte (W/m^{2}K).*

[10]Per a l'obtenció del paràmetre de conductància tèrmica de contacte s'ha de recórrer als assaigs experimentals. En un cas real de procés de conformat en calent tenim una temperatura T_1 en la xapa i una temperatura T_2 en la superfície de la matriu o eina. La qualitat del contacte la determina el coeficient de conductància tèrmica. Les dues temperatures varien de forma no lineal degut als fenòmens tèrmics i geomètrics que es donen a les diferents temperatures. El coeficient de conductància tèrmica de contacte varia en funció de la pressió aplicada, la temperatura i la rugositat. Per això, no és constant en el temps .

Coneixent tots aquests factors que influeixen tant en el procés de conformat en calent, i sabent que, per la naturalitat de l'estampació en calent, la distribució de pressions i temperatures en la xapa durant el procés no és homogènia, resulta indispensable l'estudi i determinació d'aquest paràmetre per a realitzar la modelització numèrica i simulació del procés.

És justament aquesta la motivació d'aquest projecte. L'objectiu és el disseny i posta apunt d'un equip experimental que permeti l'obtenció dels paràmetres necessaris per a modelitzar i simular el procés. Són varies les maneres d'obtenir la conductància tèrmica de contacte, sempre amb mètodes numèrics inversos o enginyeria inversa. En aquest treball el mètode serà l'enginyeria inversa utilitzant la simulació numèrica com a eina de càlcul i els assaigs experimentals com a eina de validació.

En un futur molt proper, el control total de tots aquests paràmetres serà indispensable per poder aprofitar l'efecte dels fenòmens de transferència de calor per a obtenir varies propietats mecàniques al llarg de les peces finals. Ja s'ha començat a investigar en

això per la gran potència que presenta el fet de poder controlar les propietats termomecàniques en diferents zones de la peça. Això permetrà que una part de l'element actuï absorbint l'energia dels xocs doblegant-se i a la vegada una altra part serveixi per a que no hi hagi penetració dins l'habitacle [11]. Però, com es poden obtenir aquesta varietat de propietats al llarg del sentit horitzontal de la peça? Veure Figura 2. 12.

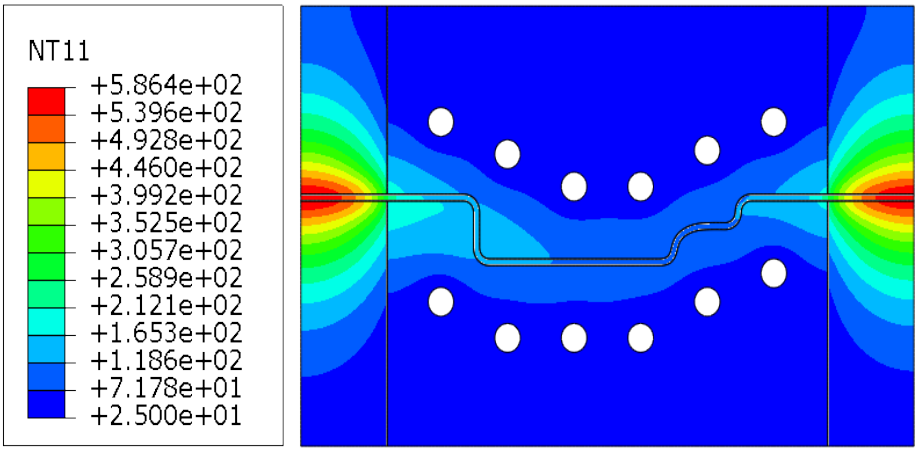


Figura 2. 12 Càlculs inicials de tailored tool per simulació numèrica en Abaqus.

Veiem en la Figura 2. 12 la distribució de temperatures en una peça simulada numèricament pel mètode dels elements finits.

Existeixen varies maneres per obtenir peces amb varietat de propietats mecàniques al llarg de la horitzontal. La més tradicional és agafar varies peces de diferents espessors o propietats mecàniques i soldar-les entre si. D'aquesta manera s'obté la gradació de propietats desitjades. No obstant, aquest és un mètode molt costos, tant pel que fa al temps com al diner. Per això s'han hagut de buscar noves tècniques que permetin obtenir variació de propietats mecàniques en un sol format i amb la gradació de propietats desitjada.

Una de les opcions és aplicar un tractament tèrmic posterior al procés d'estampació en calent sobre les zones que es desitja aconseguir més ductilitat. També es podria evitar l'austenització de les zones de la peça en que es volgués obtenir una estructura ferrítico – perlítica i aconseguir així, la ductilitat d'aquestes zones. No obstant, el fet d'incidir i modificar el procés d'escalfament porta desavantatges sobre el recobriment de la xapa, ja que aquest ha estat dissenyat per a arribar a temperatura d'austenització

durant el mateix temps que la xapa (entra 5 i 10 min.) i, per difusió adherir-se al substrat i formar la capa que protegirà el format d'acer durant l'estampació de l'oxidació, descarburació i despreniment de cascarilla.

L'alternativa que sembla que agafarà més força és aconseguir la varietat de propietats mecàniques variant la velocitat de refredament al llarg del format de xapa d'acer. Això es pot aconseguir variant la qualitat del contacte en les diferents zones, bé sigui evitant-lo o bé sigui aconseguint unes propietats tèrmiques en les eines que permetin que l'extracció de calor de la xapa sigui mínim. Sabem que, per definició, la difusivitat tèrmica és la facilitat que té un cos per variar la temperatura i ajustar-la al seu entorn. Aquesta és directament proporcional a la conductivitat tèrmica i inversament proporcional a la capacitat tèrmica volumètrica. Per això, si es redueix la conductivitat tèrmica i/o s'augmenta la capacitat tèrmica volumètrica aquesta propietat dels materials per conduir el calor va minvant. Així doncs, una manera per obtenir diverses velocitats de refredament al llarg del format seria dissenyant eines amb parts de diferents propietats tèrmiques que, de manera controlada, aconseguissin variacions de propietats mecàniques al llarg de la peça. En la següent figura s'observa un exemple de peça amb zones dúctils i zones resistent, en aquest cas un muntant B (Figura 2. 13).

Figura 2. 13 Muntant B amb variació de propietats mecàniques al llarg de la peça. Extrems dúctils i zona central resistent.

Podria ser una alternativa aconseguir offsets entre les eines superiors a l'espessor de la xapa de manera que la qualitat del contacte fos dolenta i que en aquestes zones s'hi produïssin velocitats de refredament més baixes a la crítica de tremp.

Es necessari en tots els casos dominar els fenòmens de transferència de calor que es produeixen en el procés per poder determinar i predir l'estructura metal·lúrgica que s'aconseguirà i, per tant, les propietats mecàniques finals de les diferents zones de la peça.

2.3.1 Mètode d'obtenció de la conductància tèrmica de contacte

En un cas de contacte tèrmic són varis els factors a tenir en compte. Factors com la rugositat de la superfície, la pressió de contacte i la temperatura de les dues superfícies poden afectar molt en la qualitat del contacte i, per tant, incidir en el valor de conductància tèrmica de contacte [12], [13], [14], [15].

S'ha vist ja l'equació que regeix la transferència de calor en un contacte (Equació 2. 4). En aquesta, és necessari conèixer la variació de la temperatura de les dues superfícies en cada instant i el flux de calor existent per poder determinar el coeficient de conductància tèrmica de contacte. És obvi però,que no podem esbrinar l'evolució de les temperatures ni del flux de calor de manera trivial. És pera això que s'ha de recórrer als assaigs experimentals.

Tot i així, es complicat determinar els valors esmentats anteriorment. S'ha de pensar en un disseny de les matrius experimentals tal com el de la Figura 2. 14 que permeti conèixer l'evolució de la temperatura de la superfície de la xapa. Tot i així, no es possible conèixer la temperatura de la superfície de les eines. La solució doncs, recau en utilitzar mètodes numèrics inversos o l'enginyeria inversa.

Conèixer la temperatura de diferents alçades dins les eines permet, numèricament, realitzar iteracions en un mètode que vagi donant valors al paràmetre de conductància tèrmica i vegi per cada instant si les temperatures a les diferents alçades convergeixen amb les extretes experimentalment o no. D'aquesta manera, es pot trobar el valor de conductància tèrmica de contacte.

Per a poder realitzar aquests mètodes cal conèixer doncs, la temperatura de la superfície de la xapa, la temperatura a diferents alçades de les eines i les condicions de contorn inicials.

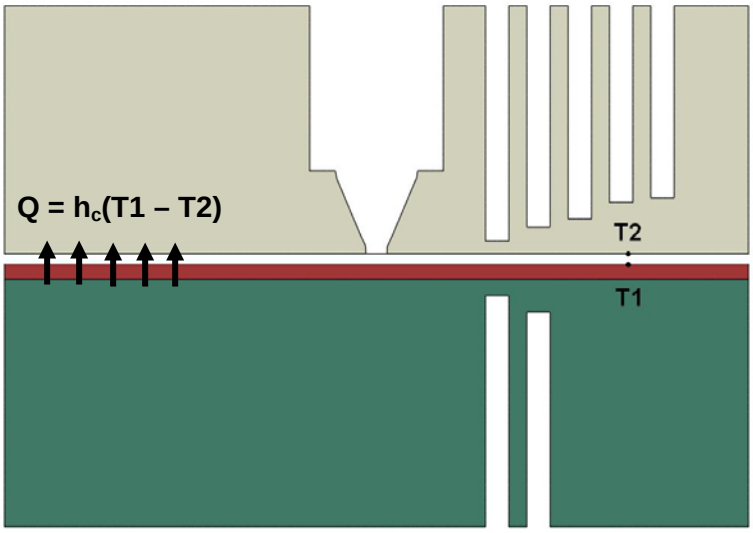


Figura 2. 14 Disseny de matrius d'assaig per a l'obtenció de la conductància tèrmica de contacte.

Per a l'obtenció del paràmetre de conductància tèrmica de contacte en aquest treball, s'utilitzarà l'eina de simulació numèrica per elements finits. Es realitzarà la modelització del procés experimental variant el paràmetre de conductància tèrmica de contacte i en el moment en que les variacions de temperatura per cada punt s'assemblin molt a les extretes experimentalment, s'haurà obtingut el valor de conductància tèrmica.

3 Disseny de l’equip d’estampació plana en calent

L’objectiu d’aquest punt és el disseny, sensorització i posta apunt d’un equip experimental d’estampació plana en calent per a l’obtenció dels diferents paràmetres termomecànics necessaris per a poder modelitzar i simular aquest procés.

Havent vist ja un dels possibles mètodes d’obtenció dels principals paràmetres en el contacte tèrmic, es dissenyarà un equip que sigui capaç de resoldre totes les necessitats i requeriments de disseny descrites a continuació.

Requeriments de disseny

- Equip capaç de realitzar estampacions planes en calent sobre un format de xapa d’acer a alta temperatura.
- L’equip ha d’incorporar dues matrius d’acer d’alta conductivitat tèrmica respectant el paral·lelisme entre les cares.
- L’equip ha d’anar muntat en una premsa capaç de realitzar forces elevades per assolir diferents pressions en la xapa.
- El material de les matrius ha de ser el mateix que s’utilitza en la industria de l’estampació en calent així com el de la xapa a estampar.
- El disseny ha de permetre el control de la temperatura a la superfície de la xapa i a diferents alçades de les matrius durant tot el procés.
- S’ha de sensoritzar l’equip per a controlar al mateix temps la temperatura i la càrrega existent de manera sincronitzada.
- Tots els elements de l’equip han de ser suficientment resistents per suportar els esforços existents de treball a plena càrrega.

3.1 Infraestructura i equips

Els assaigs experimentals es realitzaran a les instal·lacions de la Fundació Pública CTM Centre Tecnològic. El centre facilitarà i subvencionarà tot el material, programari i recursos necessaris per tal de realitzar el disseny de l’equip de forma òptima. Cuidarà també del tema de la seguretat proporcionant la indumentària necessària per realitzar assaigs d’estampació en calent.

En un dels laboratoris hi ha una premsa hidràulica de fins a 150 Tn que és la que s'utilitzarà per a muntar-hi l'equip experimental. La premsa és de la marca TFJ GARNET i el model és CM150E. En l'Annex 2.1 s'hi troben les principals característiques de la premsa i els plànols dels seus elements principals per a poder conèixer les mesures que permetran adaptar els utillatges dissenyats. En la Figura 3. 1 s'observa una fotografia de la premsa i la seva situació.

Figura 3. 1 Premsa hidràulica de les instal·lacions del CTM Centre Tecnològic.

El centre disposa de diferents útils per a realitzar tot tipus d'assaigs amb aquesta premsa. Per això, s'ha realitzat un estudi per si se'n pot aprofitar algun d'antic o en desús per tal de minimitzar els costos en el projecte. Finalment, l'útil escollit ha estat el d'assaigs de FLD. En la Figura 3. 2; a l'esquerra una imatge de l'útil d'assaigs per a la

determinació de corbes FLD amb tots els seus elements; a la dreta, una imatge dels elements que s'han aprofitat per a completar l'útil d'assaig d'estampació plana en calent.

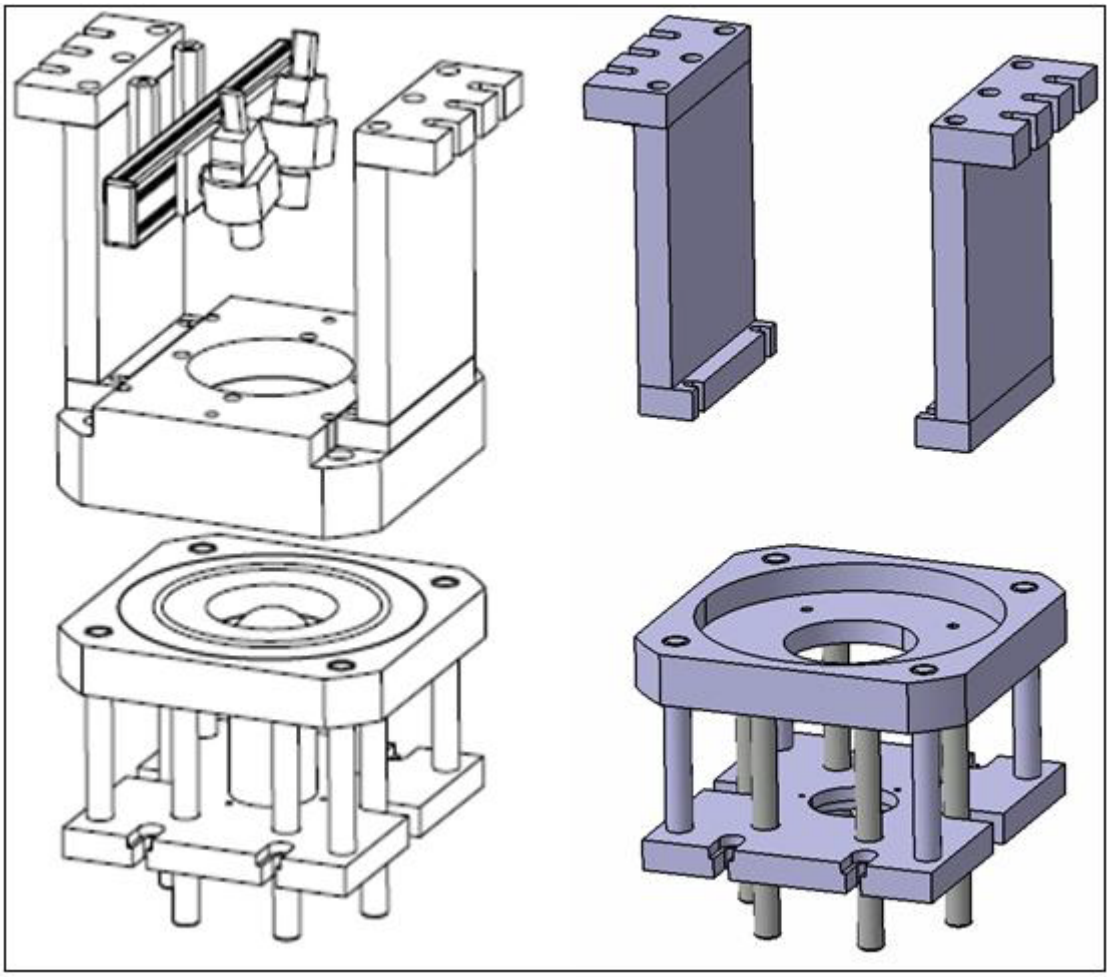


Figura 3. 2 A l'esquerra, útil d'assaig per a la determinació de corbes FLD. A la dreta, elements de l'útil aprofitats per a l'equip experimental d'estampació plana en calent.

Més endavant, en el punt de solucions, ja es veurà com s'utilitzen aquests útils per al disseny de l'equip experimental.

Un altre recurs indispensable és el que permetrà portar els formats de xapa d'acer al bor a temperatures de fins a 950ºC i que permetrà, per tant, efectuar la primera etapa del procés d'estampació en calent. El centre disposa d'un forn elèctric que assoleix temperatures màximes de fins a 1100ºC i que es farà servir per a l'escalfament dels formats de xapa d'acer. En la Figura 3. 3 s'il·lustra una imatge del forn.

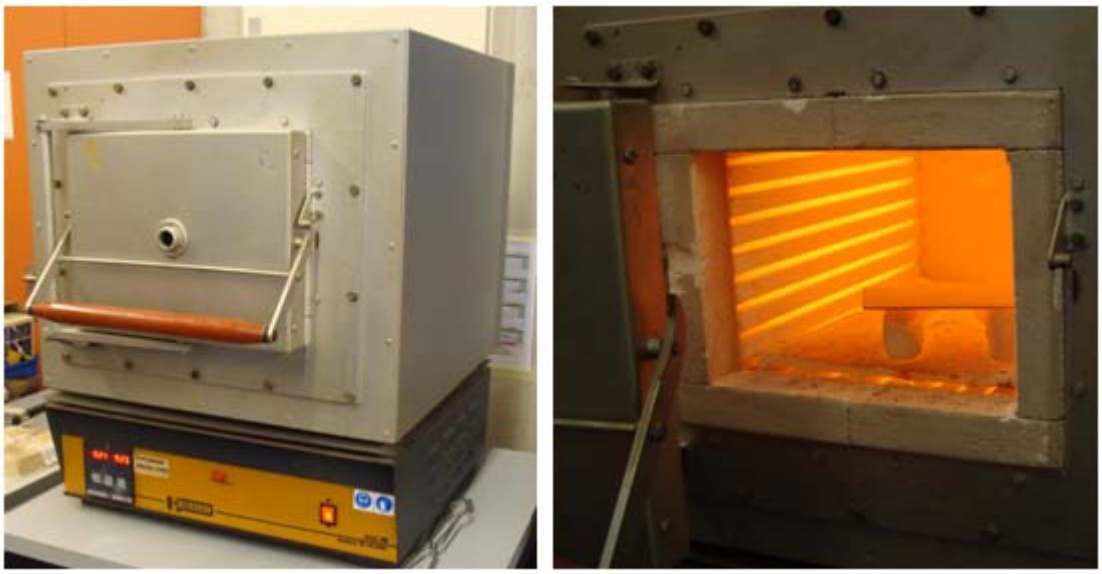


Figura 3. 3 Imatges del forn utilitzat per als assaigs experimentals d'estampació en calent.

D'altra banda, es disposa de material suficient per mecanitzar formats de xapa d'acer al bor -en aquest cas USIBOR 1500P utilitzat en la industria d'estampació en calent- per fer-los servir com a proveta d'assaig. Una vegada realitzat el disseny dels útils que manquen es detallaran les característiques d'aquests formats.

Pel que fa les matrius, han de complir els requisits de disseny ja esmentats, per això s'ha d'aconseguir material de alta conductivitat tèrmica com el que es fa servir en la industria per tal d'aconseguir tot un seguit d'avantatges descrites a continuació.

- Disminuir la temperatura d'estabilització de les eines.
- Reduir el nombre de cicles necessaris per estabilitzar el procés-
- Augmentar la difusivitat tèrmica del material i, per tant, la velocitat amb que es propaga el calor a través seu.

Rovalma, S.A., una empresa dedicada a la fabricació d'acers d'eines i altres aliatges d'acer per diferents necessitats industrials, cedirà al CTM Centre Tecnològics dues matrius d'acer d'alta conductivitat tèrmica desenvolupat per ells mateixos per a la realització dels assaigs experimentals d'aquest projecte. Les matrius ja estan preparades per a la sensorització de temperatures (tan en les eines com en la xapa) i disposen d'un acabat superficial de gran qualitat per evitar un grau elevat de rugositat en el contacte xapa – eina.

Aquestes matrius, encara que és objecte d'estudi en aquest treball, disposen de circuits de refrigeració per a poder realitzar estudis d'eficiència tèrmica dels circuits de refrigeració en l'estampació en calent.

S'observen a continuació algunes vistes de la matriu superior i la matriu inferior en la Figura 3. 4 i la Figura 3. 5 respectivament.

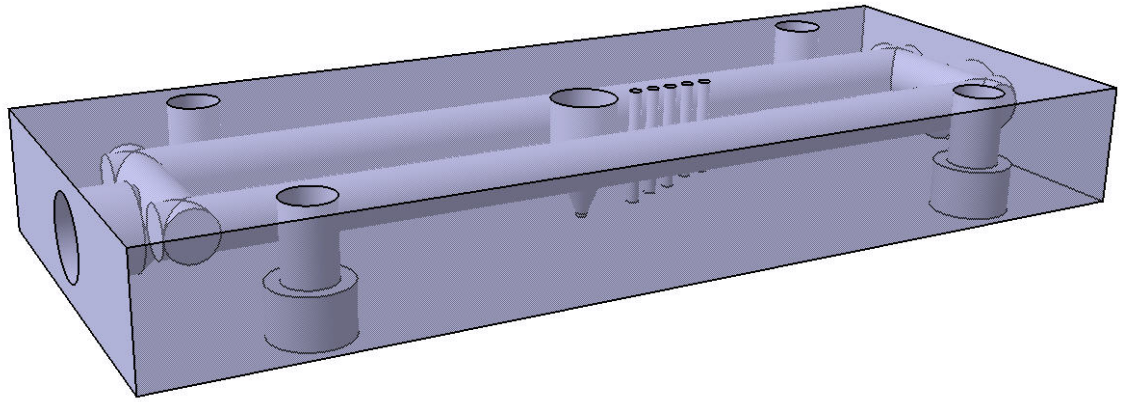


Figura 3. 4 Matriu superior per als assaigs d'estampació en calent de xapa.

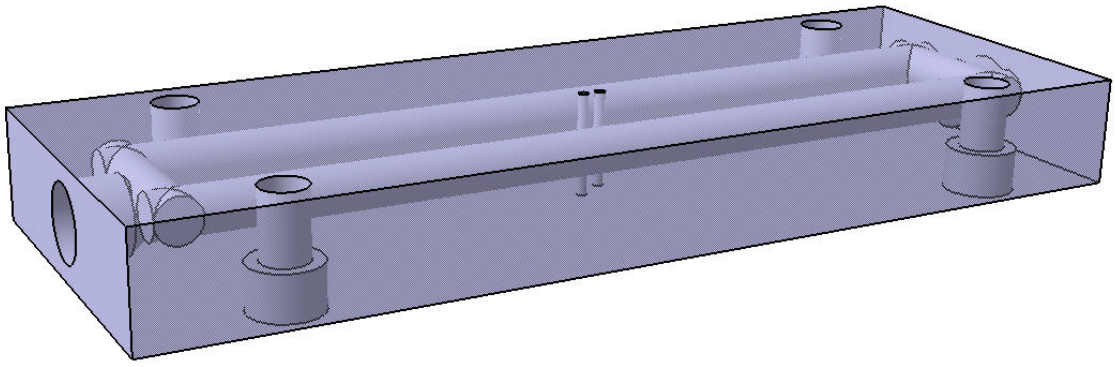


Figura 3. 5 Matriu inferior per als assaigs d'estampació en calent de xapa.

En la matriu superior els forats cecs per a la col·locació de termoparells tenen diferents profunditats, de la mateixa manera que la tenen els forats de la matriu inferior. A més a més, la matriu superior ve preparada per a la lectura de la xapa amb un forat passant de 3mm de diàmetre. Les alçades dels diferents punts de lectura en la part inferior dels forats per al cas de la matriu superior, són respectivament: 1.5, 3.2, 4.2, 6.2 i 6.8mm. És molt important conèixer aquesta alçada alhora de modelitzar i simular el procés.

3.2 Sensorització de càrrega i temperatura

Amb tot aquest material ja només queda pensar en la sensorització de l'equip pel que fa a temperatures i càrregues. Saber quins instruments de mesura s'utilitzaran i auines dimensions tindran permetà ajustar el disseny dels utilllatges que manquen pre tal de que aquests aparells de mesura hi encaixin bé.

Sensorització de càrrega

La premsa disposa d'una cèl·lula de càrrega però no serà d'utilitat per dos motius: el seu ampli rang de mesura (de una a 150 Tn) fa que les lectures no siguin prou precises i, a més a més, no és possible sincronitzar la lectura de la cèl·lula de càrrega i la lectura de temperatura. Per això, és necessària la instal·lació d'un transductor de càrrega en l'equip experimental que doni resultats al mateix temps que la temperatura [16].

Els transductors de càrrega estan dissenyats per a mesurar forces de pressió estàtiques i dinàmiques. Poden mesurar forces de compressió i de tracció segons el muntatge de l'element. En aquest cas, la mesura serà de forces a compressió. En la Figura 3. 6 s'observa una imatge del transductor que s'instal·larà en l'equip. S'ha escollit un transductor de càrregues màximes de fins a 2 MN corresponent al model 1-C6A/20T/ZL.

Figura 3. 6 Transductor de càrrega utilitzat en el muntatge experimental.

Aquest aparell té un funcionament relativament senzill, veure Figura 3. 7. Aquest disposa de diferents parts clau per al seu correcte funcionament. En l'Annex 2.2 s'hi troba la informació detallada del transductor, totes les seves característiques, manuals, plànols, possibles muntatges i connexions, etc. A continuació es fa una breu descripció del funcionament de l'element.

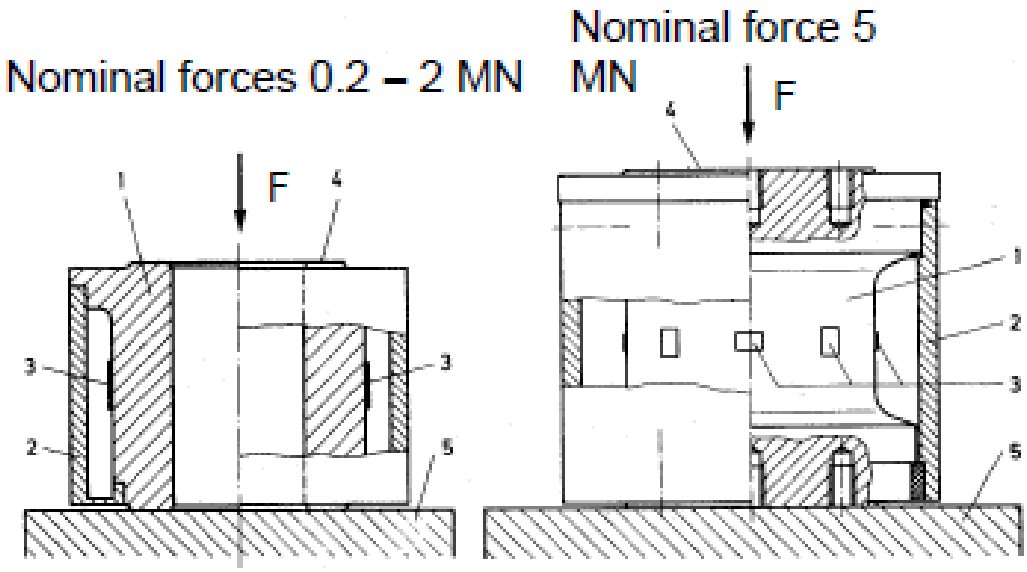


Figura 3. 7 Detall dels principals elements que composen el transductor. 1-Element resistent de mesura. 2-Carcassa. 3-Galga extensiomètrica. 4-Superfície d'actuació de la força. 5-Direcció de força.

L'aparell disposa d'una part resistent sobre la qual s'aplica la força de compressió. Observem en la Figura 3. 7 que aquesta part numero 1, té forma cilíndrica a l'interior i per la part exterior està mecanitzada tubularment amb un diàmetre més petit a la part central. És en aquesta part central, on s'hi situa un dels elements més importants del transductor: una galga que rep una deformació i emet una senyal en forma de voltatge (en mV) que permet la lectura analògica de la variació de tensió que hi ha segons la força aplicada. En la part superior i inferior del transductor hi trobem dues superfícies sobre les quals han d'actuar les forces. L'actuació d'aquestes forces ha de ser el màxim de plana possible ja que, la diferència de deformació en dos cares oposades del tub resistent suposaria una lectura errònia de la càrrega aplicada. L'aplicació de la força ha de ser en la direcció axial del aparell. Una altra part important és la carcassa de l'aparell que ve mecanitzada amb alguns forats roscats per si es vol fer treballar a tracció o simplement fixar-ho als útils.

El funcionament de la galga consisteix en una resistència òhmica que varia segons la deformació aplicada. Si a aquest element se li aplica un voltatge d'excitació a través

d'un circuit elèctric, respon amb una variació del voltatge proporcional a la força que s'aplica sobre el element resistent.

La lectura d'aquest voltatge en forma de càrrega no resulta tan trivial. Els recursos necessaris per a tenir una lectura de força a través d'una variació de voltatge, han de ser capaços de convertir una senyal analògica a una senyal digital que permeti ser interpretada per ordinador. Per a realitzar aquests tipus d'operació, s'utilitza un hardware d'adquisició de dades i un software d'adquisició de dades.

El hardware d'adquisició de dades té la funció de llegir la senyal analògica (el voltatge) que prové del transductor de força en mV, amplificar aquesta senyal per interpretar-la i transformar-la en senyal digital per a enviar-la a l'ordinador. Aquesta funció la realitza l'anomenat mòdul d'adquisició de dades (DAQ) del qual se n'observa una fotografia en la Figura 3. 8. Aquest mòdul aconsegueix enviar la senyal digital a l'ordinador a través de cable USV [17], [18]. Veure també Annex 2.3.

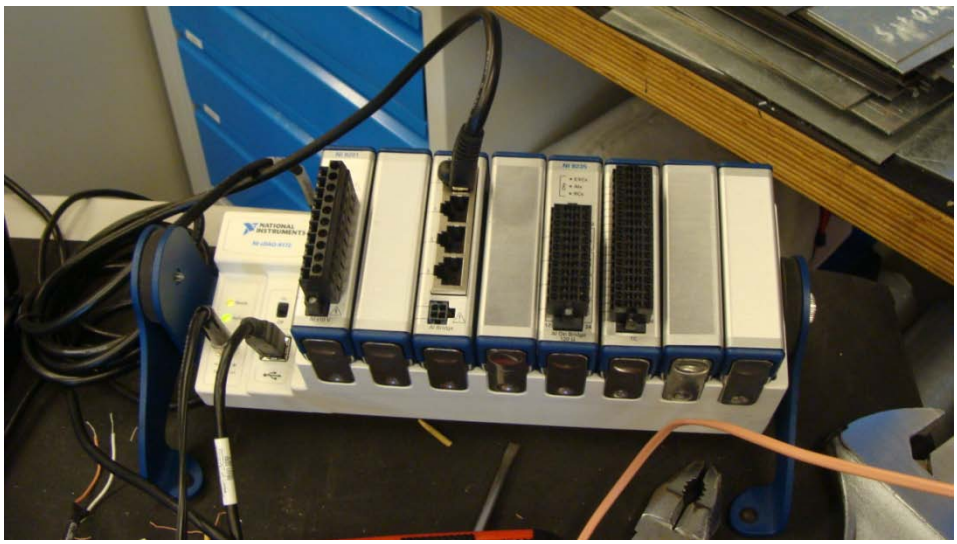


Figura 3. 8 Mòdul DAQ d'adquisició de dades.

Per obtenir la relació proporcional de voltatge de sortida – càrrega s'ha col·locat el transductor en una màquina del laboratori capaç de realitzar la lectura de la força aplicada en cada instant, a la vegada que es llegia la variació del voltatge. La gràfica que se n'ha extret correspon a la de la Figura 3. 9. Aquest gràfic permetrà trobar una relació entre l'esforç aplicat a l'aparell i el voltatge de sortida d'aquest. La relació donarà al software el factor de conversió a aplicar per transformar la variació de voltatge en variació de càrrega aplicada.

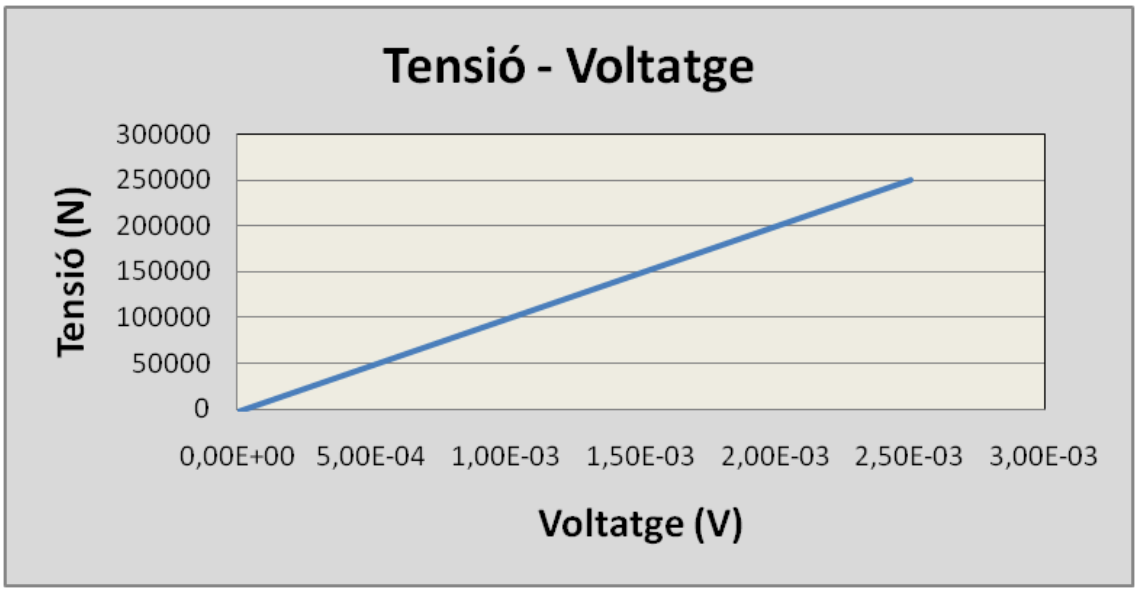


Figura 3. 9 Relació entre tensió de compressió – voltatge de sortida.

El gràfic experimental extret permet trobar la relació ja esmentada amb anterioritat i que es presenta en l'Expressió 3. 1. La variable Y correspon a l'esforç o tensió aplicada i la variable independent X correspon al voltatge de sortida.

$$y = 101379310,3x + 2475\ [\mathrm{N}]$$

Expressió 3. 1 Relació tensió – voltatge.

Sensorització de la temperatura

Per a la selecció de la instrumentació de lectura de temperatures, s'ha realitzat primerament un estudi de mercat dels recursos que permeten la lectura de temperatura sobre peces de diferents materials. S'ha vist que són varis els instruments utilitzats per aquest fi però no tots són igual d'eficaços, sensibles o econòmics. Entre les diferents opcions, a continuació s'exposen els principals instruments utilitzats per a realitzar lectures a altes temperatures i amb precisió [19], [20], [21].

- Basats en els principis de termometria resistiva
    - Detectors de temperatura per resistència (RTD).
    - Termistors.
- Basats en els principis de termometria termoelèctrica
    - Termoparells.
- Basats en els principis de termometria radiativa
    - Piròmetres òptics.
    - Piròmetres de radiació total.

Els **detectors de temperatura per resistència** incorporen sensors RTDs (Resistance Temperature Detector). Aquest és un element resistiu construït amb materials tals com el Platí, Níquel o Coure. Aquests metalls exhibeixen un canvi previsible de la seva resistència amb la variació de la temperatura. En el cas dels RTDs, la resistència augmenta amb la temperatura. Aquesta relació és controlada per mitjà d'una expressió matemàtica i permet la lectura de la temperatura. El rang de temperatures de treball, en el cas dels RTDs de Platí, es troba entre els -250ºC i 900ºC. No obstant, també presenten inconvenients com el requeriment d'un corrent d'excitació, una electrònica complicada alhora de condicionar el senyal i la fragilitat. A continuació s'observa una imatge d'aquest tipus de termòmetre (Figura 3. 10).

Figura 3. 10 RTD de Platí.

Els **termistors** són fabricats bàsicament amb òxids de metalls com els de Manganès, Níquel, Cobalt, Ferro, Coure o Alumini. El seu funcionament es basa en la variació de la resistivitat que presenta un semiconductor amb la temperatura. Existeixen dos tipus de termistors, el NTC (Negative Temperature Coefficient) i el PTC (Positive Temperature Coefficient). En el cas dels termistors NTC, per petites variacions de temperatura experimenten grans variacions de resistència. En realitat, són una classe de RTD però amb unes característiques pròpies, com són una gran sensibilitat, un coeficient de temperatura negatiu i una manca de linealitat en la relació temperatura – resistència. Aquests, tenen un rang de lectura de temperatures menor al dels RTDs que se situa entre els -100 i 450 ºC. Una altra desavantatge és que requereix corrent d'excitació. A més a més, el fet de no existir linealitat en la relació temperatura – resistència suposa aplicar un algoritme de linealització per obtenir uns resultats fiables.

Els **termoparells** estan formats per dos cables de metalls diferents units pels seus extrems formant dues unions. Diferències de temperatura entre les dues unions creen un potencial termoelèctric i, per tant, un voltatge entre els dos cables. Si es manté una de les unions, anomenada unió de referència, a una temperatura coneguda i es mesura el seu voltatge es pot conèixer la temperatura de l'altra unió, la unió de mesura. Els termoparells tenen un rang de mesura de temperatures molt elevat que oscil·la entre els -270 i els 2800ºC. Un dels avantatges és també la reduïda dimensió que presenta. Aquest tipus d'instrument presenta també alguns desavantatges com ara una important susceptibilitat al soroll induït pel cablejat i un voltatge de sortida molt petit (de mV).

Els **piròmetres de radiació** es basen en la llei d'Stefan Boltzmann, que diu que la intensitat d'energia radiant emesa per una superfície d'un cos augmenta proporcionalment a la quarta potència de la temperatura absoluta del cos, és a dir, $W = K \cdot T^4$. Els piròmetres de radiació mesuren doncs, la temperatura d'un cos a distància en funció de la radiació que emet. L'energia de radiació que emet un cos va associada amb la longitud d'ona. Depenent de la temperatura del cos l'energia radiant emesa es troba en un banda espectral o una altra, com es pot observar en la Figura 3. 11. Per això, depenent de l'espectre amb que es treballi es detecten unes temperatures o unes altres i amb més o menys precisió ja que, existeixen longituds d'ona que no es veuen tan afectades per l'atmosfera com d'altres. Els instruments que mesuren la temperatura d'un cos en funció de la radiació lluminosa que aquest emet, s'anomenen *piròmetres òptics de radiació parcial* o *piròmetres òptics* i els que mesuren la temperatura captant tota o gran part de la radiació emesa pel cos s'anomenen *piròmetres de radiació total*. L'inconvenient principal d'aquests aparells és que el factor

d'emissió d'energia radiant depèn molt de l'estat de la superfície del cos emissor, per exemple, per un metall com el coure passa de 0.1 a 0.85 depenent de la qualitat de la superfície i la capacitat d'absorció d'aquesta. No obstant, també presenten grans avantatges com la capacitat de mesurar a distància i el ampli rang de mesura que permet abastar temperatures de fins a 4000ºC.

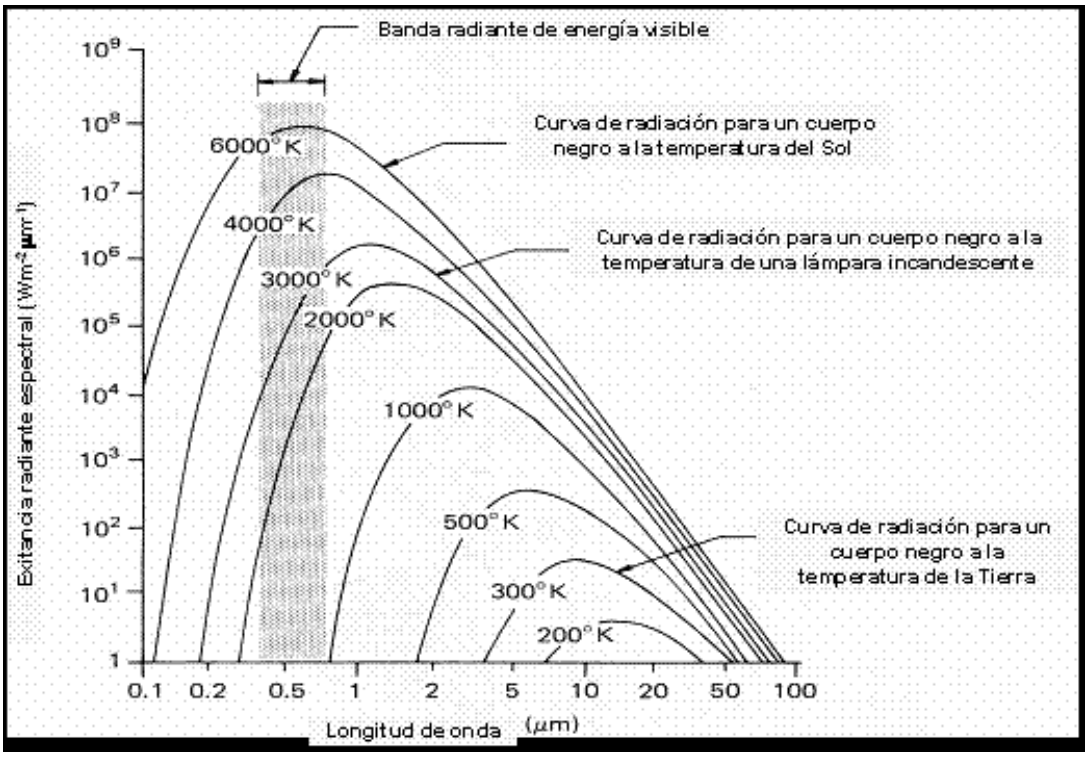


Figura 3. 11 Energia radiant emesa per un cos negre a diferents temperatures en funció de la longitud d'ona.

Havent vist els avantatges i inconvenients del principals instruments de mesura de temperatures existents en el mercat, cal estudiar la solució més adequada. Aquesta és escollir el tipus d'element de mesura que treballi en el rang de temperatures que interessen per als assaig experimentals d'aquest projecte. En aquest cas, ha de ser capaç de llegir temperatures de entre 0 i 1000ºC. Ha de tenir una resposta rapidíssima als canvis de temperatura i una bona relació entre qualitat, precisió i preu.

Després d'avaluar cadascun dels instruments, s'ha descartat l'ús dels RTD i termistors pel seu rang de lectura de temperatures, la necessitat d'un corrent d'excitació, la no linealitat i, per tant, la necessitat de compensació de les corbes resistència – temperatura, entre d'altres. S'han descartat també els piròmetres de radiació, primerament, per la inversió econòmica que suposa, i també per la necessitat i complexitat de l'ajust d'aquests aparells per evitar errors de lectura importants. A més

a més, aquest aparell seria vàlid per a la lectura de temperatura en la xapa ja que hi ha espai per accedir-hi, però aquest no és el cas per a la lectura de temperatura de les diferents alçades en de les matrius, les quals tenen forats cecs de 3 mm de diàmetre.

Finalment, s'ha escollit els termoparells com a instrument de mesura de temperatures. No només per eliminació, com pot semblar en la redacció d'aquest punt, sinó per què realment tenen unes característiques que compleixen al 100% els requeriments que ha de tenir un aparell de mesura per a aquest muntatge i assaig. Són petits, estrets, s'adapten a la forma necessària, tenen una resposta als canvis de temperatura rapidíssima, amb un rang de temperatures que va dels -270 als 2800ºC i, a més a més, són molt econòmics depenent dels materials necessaris per al rang de temperatures necessari en cada cas, és clar.

Característiques i funcionament dels termoparells

Un termoparell és un dispositiu per a la mesura de temperatures basat en els efectes termoelèctrics. És un circuit format per dos conductors de metalls diferents o aliatges de metalls diferents, units pels seus extrems. Si entre aquestes unions existeix una diferència de temperatura s'origina una força electromotriu per l'efecte Seedbeck.

La força electromotriu generada pel termoparell va en funció de la diferència de temperatura entre la unció freda i la calenta i, més en concret, aquesta es generada com a resultat del gradient ed temperatures existent al llarg de la longitud dels conductors.

La magnitud de la força electromotriu depèn dels materials utilitzats pel termoparell i les seves condicions metal·lúrgiques. Canvis en la composició dels materials causats per contaminació, mecanismes estranys, xocs tèrmics i d'altres influeixen i modifiquen la fem generada. Amb el temps, la degradació dels termoparells és inevitable.

Si per raons pràctiques la longitud dels termoparells s'ha d'incrementar, s'ha de realitzar de la forma correcta que és utilitzant extensió de cable nominal del mateix material que els conductors dels termoparells.

Existeixen diferents tipus de termoparells, fabricats amb diferents materials metàl·lics conductors i diferents aliatges metàl·lics. La taula adjunta a continuació, mostra els diferents tipus de termoparells existents, el rang de temperatures en que poden treballar i els materials de què estan fets. Veure Taula 3. 1.

LIGAS	Combinação metálica + FIO	Combinação metálica - FIO	Código de Cores ANSI MC-96.1	Internacional IEC 584-3	BS 1843	DIN 43710	JIS C1610-1981	Limite de erro Padrão	Limite de erro Especial
J	Fe (magnético)	Constantan Cu-Ni						2.2°C ou 0.75%	1.1°C ou 0.4%
K	Níquel-Cromo Ni-Cr	Níquel-Alum Ni-Al (magnético)						2.2°C ou 0.75%	1.1°C ou 0.4%
W*X	Cobre Cu	Cu-Ni							
T	Cobre Cu	constantan Cobre-Níquel Cu-Ni						1.0°C ou 0.75%	0.5°C ou 0.4%
E	Níquel-Cromo Ni-Cr	constantan Cobre-Níquel Cu-Ni						1.7°C ou 0.5%	1.0°C ou 0.4%
N	Nicrosil Ni-Cri-Si	Nisil Ni-Si-Mg					não é padrão utilize cores norma ANSI	2.2°C ou 0.75%	1.1°C ou 0.4%
R	Platina 13% rorhodio Pt-10% Rh	Platina Pt						1.5°C ou 0.25%	0.6°C ou 0.1%
S	Platina 10% rhodio Pt-10% Rh	Platina Pt						1.5°C ou 0.25%	0.6°C ou 0.1%
B	Platina 30% rhodio Pt-30% Rh	Platina 6% rhodio Pt-6% Rh			use fio de cobre			0.5% 800°C	não estabilizado

Taula 3. 1 Taula dels diferents tipus de termoparell, materials de fabricació i rang de temperatures amb què treballen.

Per a aquest equip experimental s'utilitzaran els termoparells de tips N. Aquests termoparells són fabricats amb un conductor de Ni – Cr – Si i un altre de Ni – Si – Mg.

Existeixen termoparells de materials molt més cars que no presenten gairebé efectes d'inestabilitat i gradients de temperatura deguts a canvis no uniformes en la composició de l'aliatge, però aquest tipus N serà suficient per obtenir uns resultats fiables i apreciar les tendències més importants en les variacions de temperatura de l'equip.

Pel que fa a la utilització d'aquests instruments de mesura, cal tenir en compte que la transferència de calor entre la peça i el termoparell es realitza mitjançant el contacte, per això existeix també una conductància tèrmica de contacte entre la unió soldada del termoparell i la peça. Per tant, la temperatura de la unió soldada no és la del material a mesurar sinó que existeix un increment de temperatura entre els dos materials degut a la naturalesa del contacte tèrmic. Això fa que la temperatura del termoparell sempre estigui per sota de la temperatura de real de la superfície que es vol mesurar. Aquesta diferència de temperatura dependrà de la qualitat del contacte i, per tant, de la pressió exercida. La resposta del termoparell es veurà influïda per la capacitat dels materials a variar la seva temperatura.

Per tant, és important la manera com es preparen les unions entre els dos materials conductors. S'ha utilitzat una màquina de soldadura per punts per realitzar les unions de mesura dels termoparells. En la Figura 3. 12 s'observa una fotografia de la màquina de soldadura.

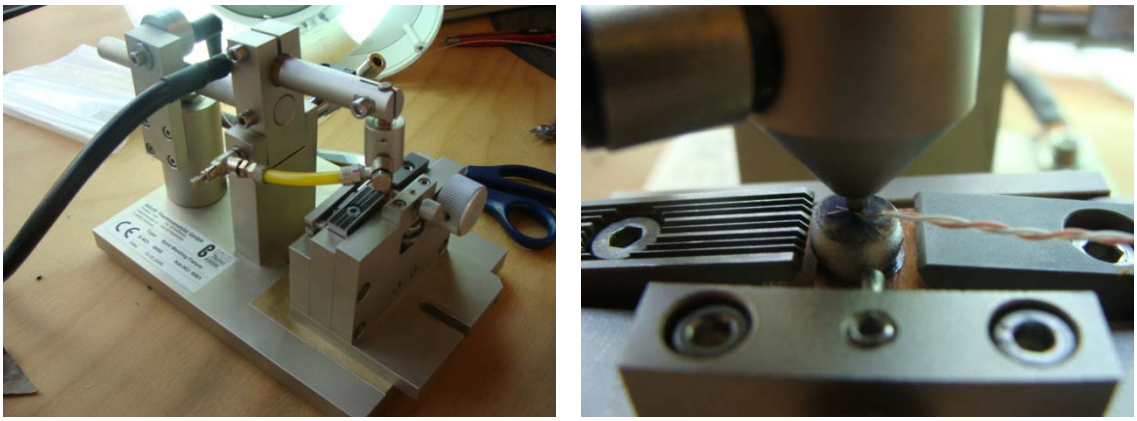


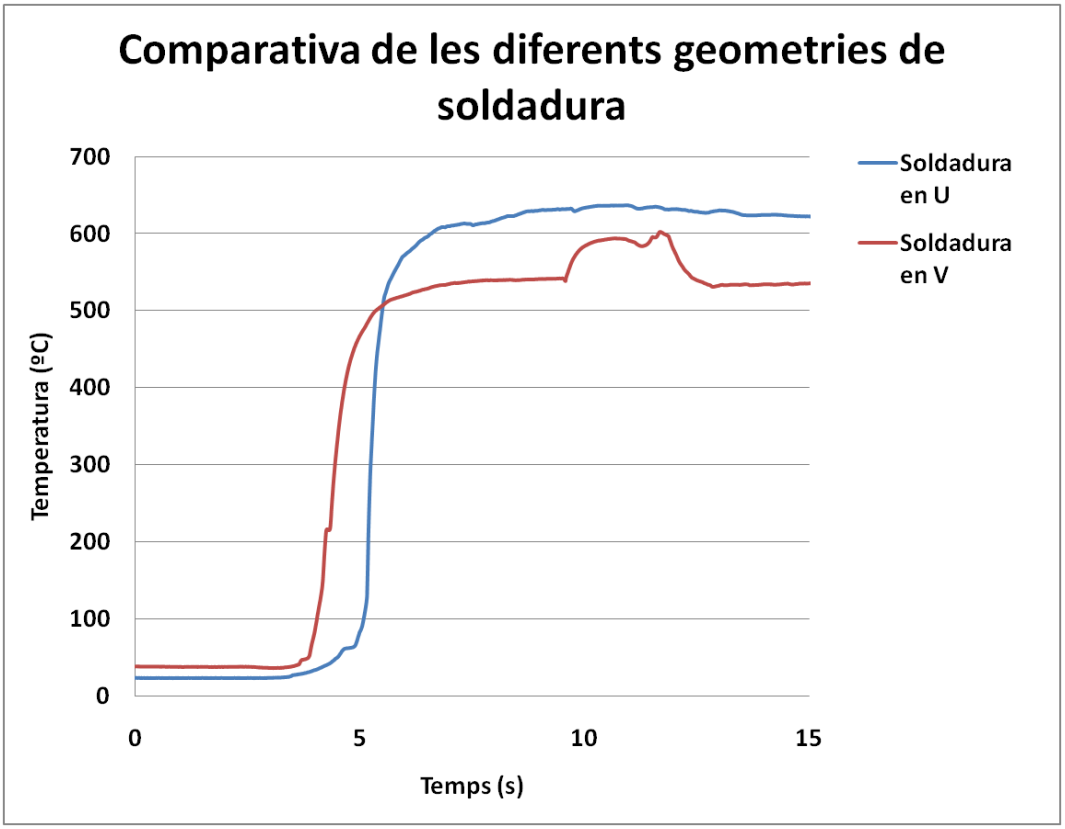
Figura 3. 12 Aparell utilitzat per a la realització de soldadures dels termoparells.

Hi ha diferents maneres de col·locar els cables conductors alhora de soldar-los i segons com es col·loquin i com quedi la geometria final hi haurà un contacte o un altre. És molt important en els termoparells que els dos conductors estiguin en bon contacte amb el material i, a més a més, hi ha d'haver la mateixa temperatura en la zona de contacte. Per això, segons com es prepari la soldadura, perilla que només un dels metalls de termoparell estigui en contacte amb la xona de mesura. Aleshores es donaria una lectura errònia de la temperatura.

S'ha realitzat un estudi de les diferents geometries de soldadura i s'han apreciat diferències molt rellevants. En la Figura 3. 13 s'aprecien les dues geometries de soldadura possibles.

Figura 3. 13 Diferències en la geometria de les soldadures de la unió dels termoparells

S'observa que en la unió dels dos conductors de diferent material de forma tangent (esquerra de la figura), hi haurà més superfície de contacte que en el cas de la soldadura acabada en forma de "v". S'han realitzat proves experimentals per al dos casos i s'ha obtingut els següents resultats (Gràfic 3. 1).



Gràfic 3. 1 Evolució de les temperatures en funció del temps per a les diferents geometries de soldadura.

S'observa que la unió soldada en forma de "U" marca 100ºC per sobre que la unió soldada en forma de "v". S'observa un tram en el que la soldadura acabada en "v" s'acosta a la corba superior. El motiu es que es va doblar i ja no era un punt el que estava en contacte sinó un bon tros de superfície de cada conductor.

Hi ha dos factors importants a tenir en compte. El primer és que s'ha d'assegurar que els dos conductors de diferent material estiguin en contacte amb la temperatura a mesurar, per això s'han d'evitar les soldadures tipus "V", ja que perilla que sigui una de les bandes i, per tant, un dels conductors, el que estigui en contacte amb la peça. Aleshores es produeix un lectura errònia de la temperatura. Això es soluciona assegurant que els dos cables conductors estiguin en contacte amb la peça, preparant les soldadures de forma tangent o fins i tot de forma quadrada. D'aquesta manera hi ha més superfície de contacte tant de un dels conductors com de l'altre.

Per altra banda, pel que fa a la rapidesa de resposta del termoparell i tenint en compte que la inèrcia tèrmica del instrument de mesura és una, com més superfície de contacte hi hagi per cadascun dels material, més ràpidament es propagarà el calor ja que hi haurà més quantitat de flux de calor per unitat de temps.

Tot i així, és inevitable que existeixi una diferència de temperatura entre el material a mesurar i la unió soldada del termoparell deguda a què el contacte tèrmic mai serà perfecte.

Finalment doncs, es treballarà amb una geometria tangencial amb un radi de curvatura molt gran ja que per motius d'espai i precisió és probablement la millor opció. Això no obstant, s'hauran de contemplar els errors de mesura encara que siguin inevitables.

Per tal de poder col·locar el termoparell de manera guiada i amb una mica de pes a sobre s'ha modelat un ceràmic amb el termoparell passant per entremig. El motiu pel qual s'ha escollit un ceràmic és que aquest termoparell està en contacte amb la xapa i per tant ha d'anar fixat amb un material que aguanti temperatures de fins a 900ºC. A continuació se n'observa una imatge (veure Figura 3. 14).

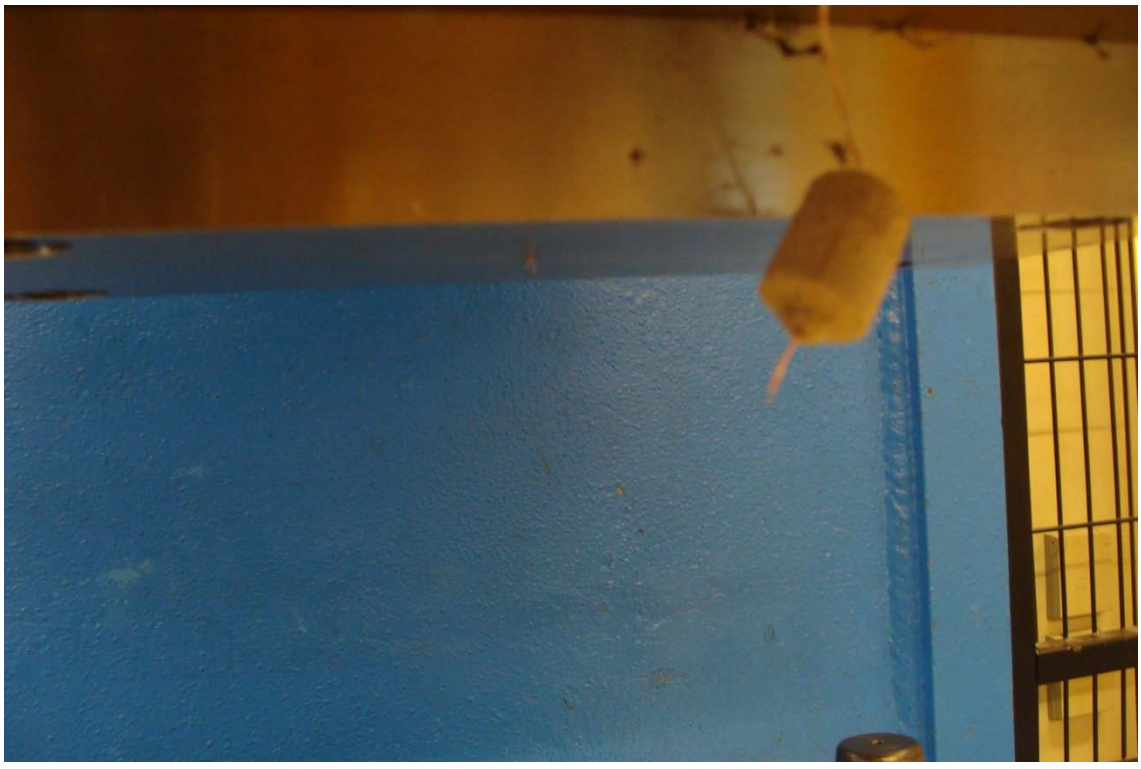


Figura 3. 14 Material ceràmic utilitzat per al recobriment del termoparell en contacte amb la xapa.

3.3 Resultat del disseny

Finalment, una vegada coneguts els recursos disponibles pel què fa a material, utillatges, instruments de mesura, softwares i hardwares de captura de dades, etc., s’han dissenyat els útils i peces que faltaven per completar el conjunt experimental per realitzar els assaigs d’estampació en calent de xapa.

Per al disseny 3D de les peces s’ha utilitzat el software de disseny CATIAv5R19. En l’Annex 1 es poden trobar els plànols de les peces dissenyades.

A continuació, s’adjunten algunes vistes 3D de les peces en qüestió.

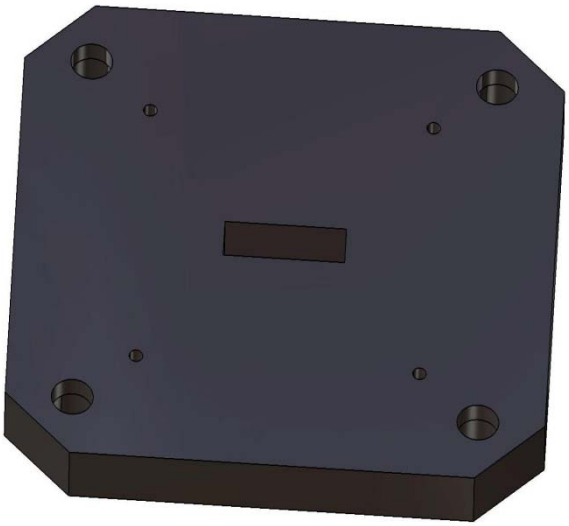


Figura 3. 15 Porta – matriu superior.

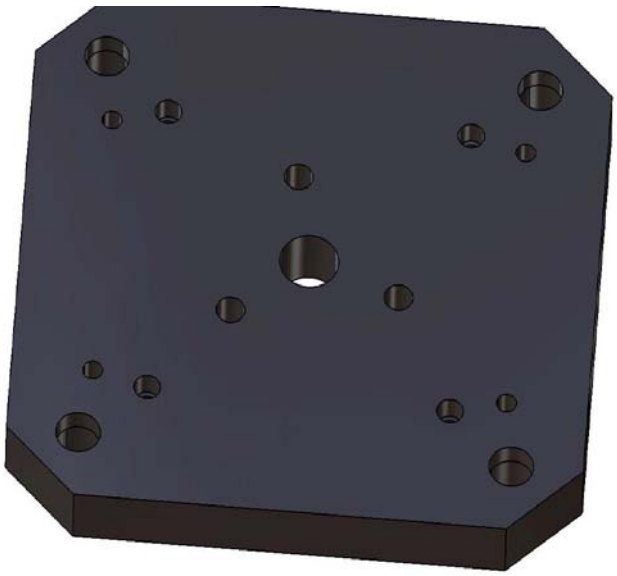


Figura 3. 16 Sufridera superior.

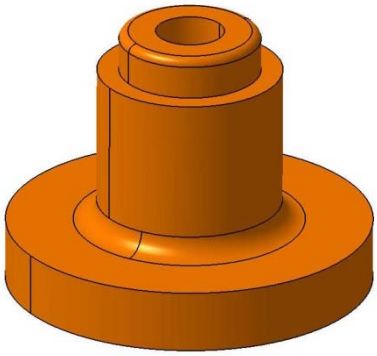


Figura 3. 17 Cilindre accionador per la cèl·lula de càrrega.

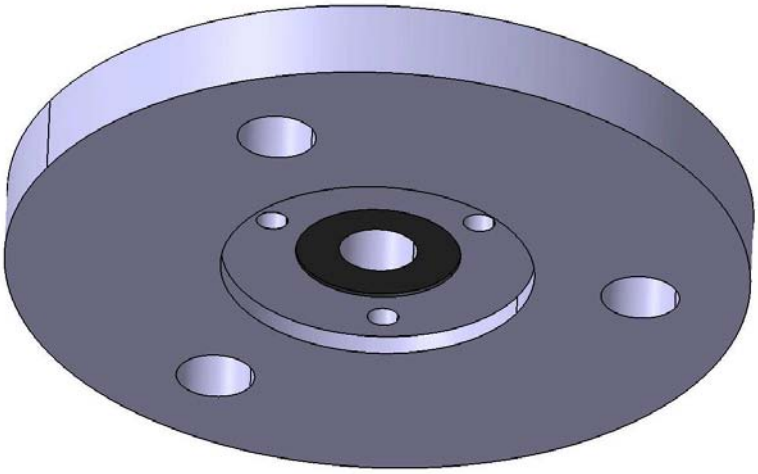


Figura 3. 18 Platina del transductor de càrrega.

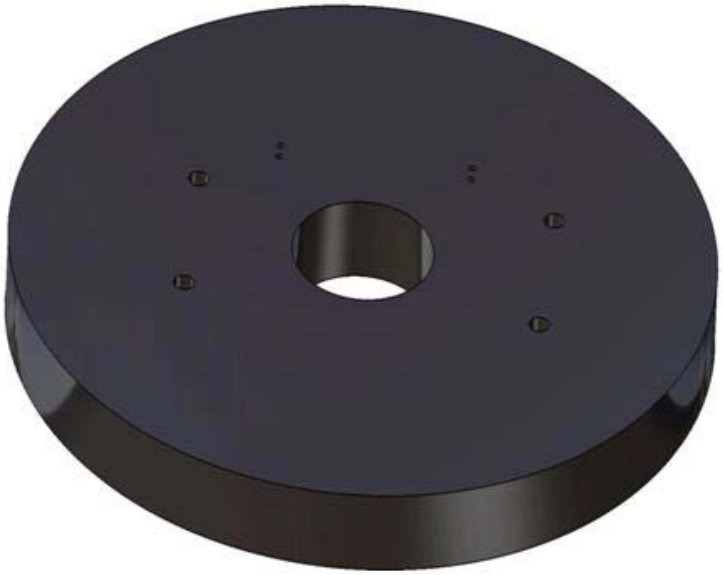


Figura 3. 19 Porta – matriu inferior.

Aquest conjunt de peces s'han fer mecanitzar per una empresa especialitzada en la fabricació de components de matriceria i altres. Alguns dels requeriments bàsicament geomètrics que se'ls va passar estan adjunts en la Taula 3. 2.

PEÇA (CATPart)	ESTAT	Rellevant:
Sufridera Inferior	Fer	Posició dels forats. Cares paral·leles i planes. Perpendicularitat dels forats respecte cares SUP i INF.
Porta_Matriu_Superior	Fer	Posició dels forats. Cares paral·leles i planes. Perpendicularitat dels forats respecte cares SUP i INF.
Cilindre_Accionador	Fer	**Alt límit elàstic**. (Acer resistent). Tensions de fins a 500-550 Mpa en funcionament a plena càrrega.
Sufridera_Superior_CelulaCarga	Fer	Posició dels forats. Cares paral·leles i planes. Perpendicularitat dels forats respecte cares SUP i INF.
Platina_Transductor	Fer	**Resistent**. Ajustar toleràncies. Planitud, paral·lelisme i perpendicularitat.

Taula 3. 2 Requeriments geomètrics i de material principals.

Una vegada dissenyats els components que faltaven, el conjunt s'ha pogut completar i muntar amb èxit com s'aprecia en la figura següent (Figura 3. 19). Aquests és una comparativa entre el muntatge real del laboratori del CTM Centre Tecnològic i el muntatge virtual dissenyat en CATIA.

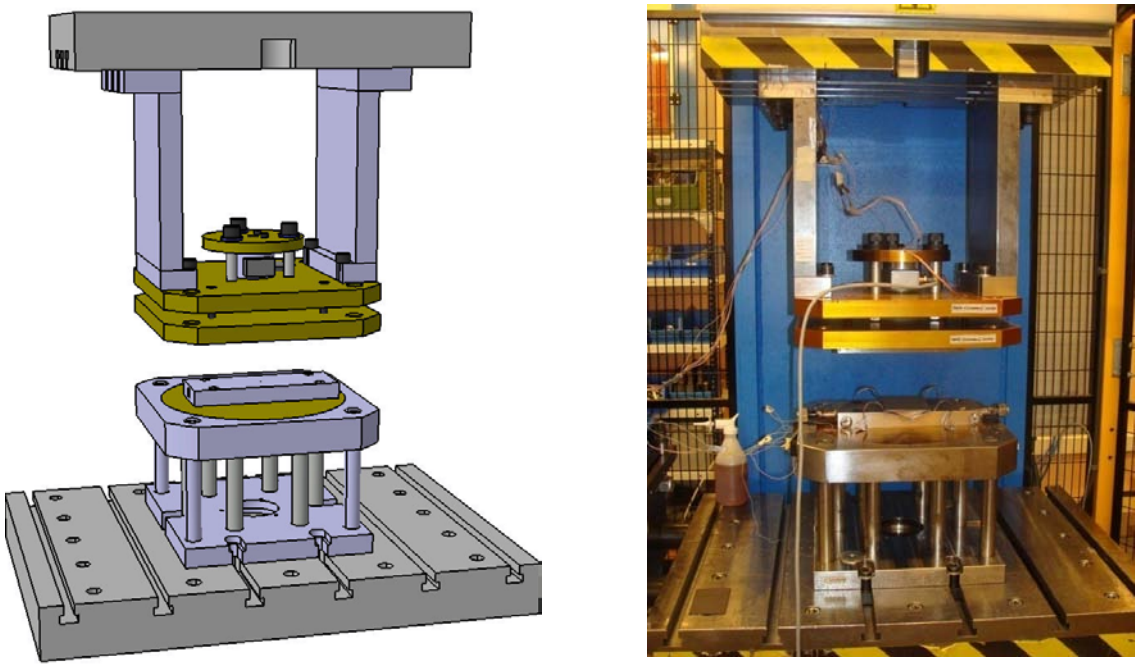


Figura 3. 20 Comparativa de conjunt experimental i virtual.

Alhora d’ajustar l’equip experimental, s’han realitzat canvis manuals en el sistema de centradors. S’ha vist que el fet de posicionar el format de xapa d’acer d’alta resistència mecànica sobre la matriu inferior suposava una velocitat de refredament massa elevada durant l’etapa de tancament de les matrius. Per això, finalment s’ha optat per dissenyar uns centradors amortits que permetin el posicionament de la xapa a l’aire i entremig de les dues matrius, d’aquesta manera es manté molt més la temperatura durant l’etapa de tancament i resulta més senzill controlar les condicions de contorn. A continuació s’observa una imatge dels centradors utilitzats (Figura 3. 21).

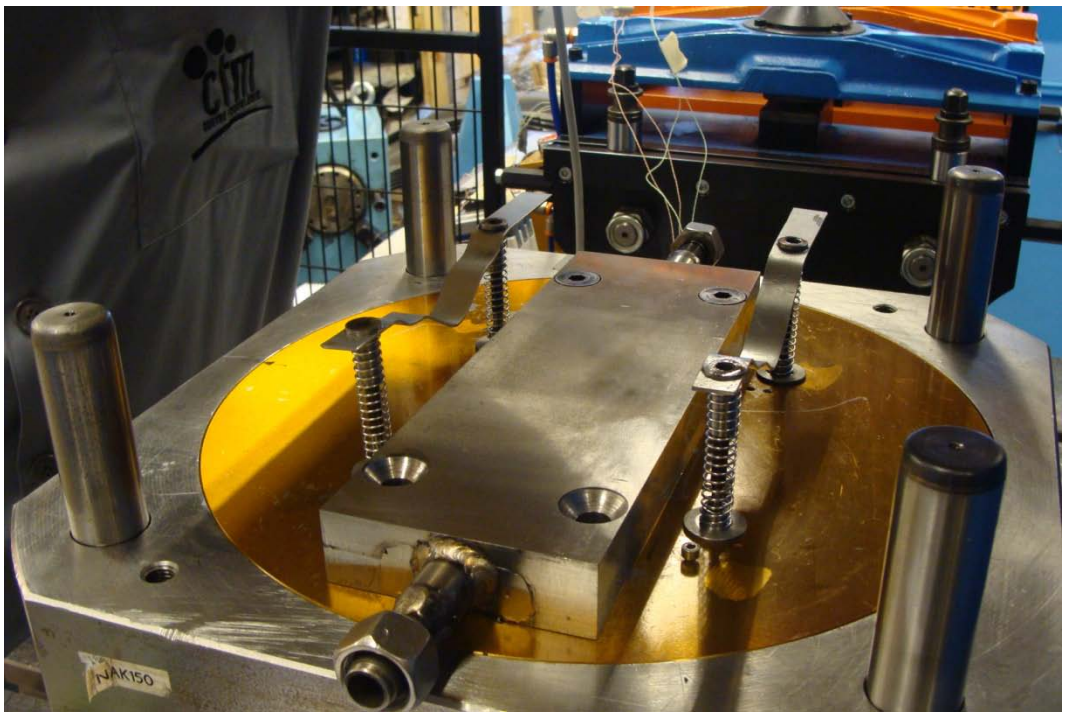


Figura 3. 21 Centradors amortits per a la col·locació del format de xapa.

4 Assaigs experimentals

4.1 Objectius

L'objectiu principal dels assaigs experimentals és obtenir les corbes de l'evolució de la temperatura i la càrrega aplicada durant el procés d'estampació plana en calent. D'aquesta manera, tal com s'ha vist en el punt de transferència de calor del procés, aquestes corbes serviran com a validació experimental de les posteriors simulacions numèriques pel mètode dels elements finits. No obstant aquest sigui el principal objectiu, són 3 els objectius paral·lels dels assaigs experimentals. A continuació se'n fa una breu descripció.

Primer: per tal d'obtenir un valor de conductància tèrmica de contacte segons els valors de pressió i temperatura és necessari realitzar assaigs experimentals a les diferents pressions d'interès i obtenir, gràcies a la sensorització de càrrega i temperatura, l'evolució de les temperatures i la càrrega d'accionament en forma de gràfic. Aquestes corbes es faran servir com a eina per validar els resultats de simulacions numèriques que, a partir d'aplicar l'enginyeria inversa permetran trobar els valors aproximats de la conductància tèrmica de contacte per aquelles condicions.

Segon: per tal de quantificar l'efecte que té la problemàtica dels mals ajusts en els offsets de les matrius dels processos industrials d'estampació en calent, es realitzaran assaigs experimentals amb diferents distàncies entre la xapa i la matriu durant el conformat. Aquests offsets seran molt petits, però suficients per a que la qualitat del contacte variï. Altra vegada, la sensorització de l'equip permetrà extreure l'evolució de la temperatura en funció del temps de conformat i, amb això, la velocitat de refredament per cada cas.

Tercer: per tal de quantificar la influència que tenen les variables de pressió i temperatura sobre la qualitat del contacte és necessari realitzar un disseny d'experiments de 2 variables a dos nivells. Per això s'utilitzaran les corbes d'evolució de la temperatura en funció del temps per a diferents pressions obtingudes amb els assaigs esmentats en el primer objectiu [22].

És important també, conèixer les limitacions de l'equip i la instrumentació així com contemplar l'existència d'errors experimentals. No obstant, l'objectiu principal en aquest projecte és obtenir valors aproximats dels diferents paràmetres i tendències clares dels diferents efectes produïts per la variació de les variables de procés.

4.2 Mètode d'assaig

Per tal de no afegir errors experimentals fruit de la variació de paràmetres o condicions del procés d'estampació experimental, a continuació s'estableix un mètode o unes condicions inicials i de procés que es faran servir per tots els assaigs. A més a més, els experiments amb les corresponents variacions de condicions es realitzaran de forma aleatòria per evitar efectes no desitjats deguts a la intervenció de l'experimentalista. Aquest, podria cometre un error i repetir-lo per als assaigs de les mateixes condicions i això no interessa. A continuació s'observa, de manera esquemàtica i en imatges, el procés d'estampació plana en calent que es realitzarà (Figura 4. 1).

Figura 4. 1 Procés d'estampació plana en calent de xapa dels assaigs experimentals.

Format de xapa

El format de xapa d'acer al bor, en aquest cas d'USIBOR 1500P, té unes dimensions de 90x150 (mm^2). Inicialment és escalfada fins a la temperatura d'austenització de l'USIBOR 1500 P, en aquest cas 950ºC durant 10 min. Posteriorment es transportada del forn fins a les matrius amb un temps aproximat de 3 o 4 segons. Finalment, és estampada entre les matrius on es produeix el tremp de l'acer al bor.

Configuració de la premsa

La premsa disposa de dues bancades amb dos pistons independents. La part superior actua com a executor de la força i la part inferior actua com a coixí. S'ha configurat de

manera semiautomàtica per a que inicialment les matrius estiguin sempre a la mateixa alçada, tan la inferior com la superior. Tan sols caldrà accionar un pitjador per a que la part superior baixi i es produeixi el conformat. Aquesta part superior té també un límit inferior que es dóna just després de produir-se el conformat per evitar que continuï baixant o que l'operari ho pari abans d'hora. En la següent figura s'observa la configuració detallada de l'equip (Figura 4. 2).

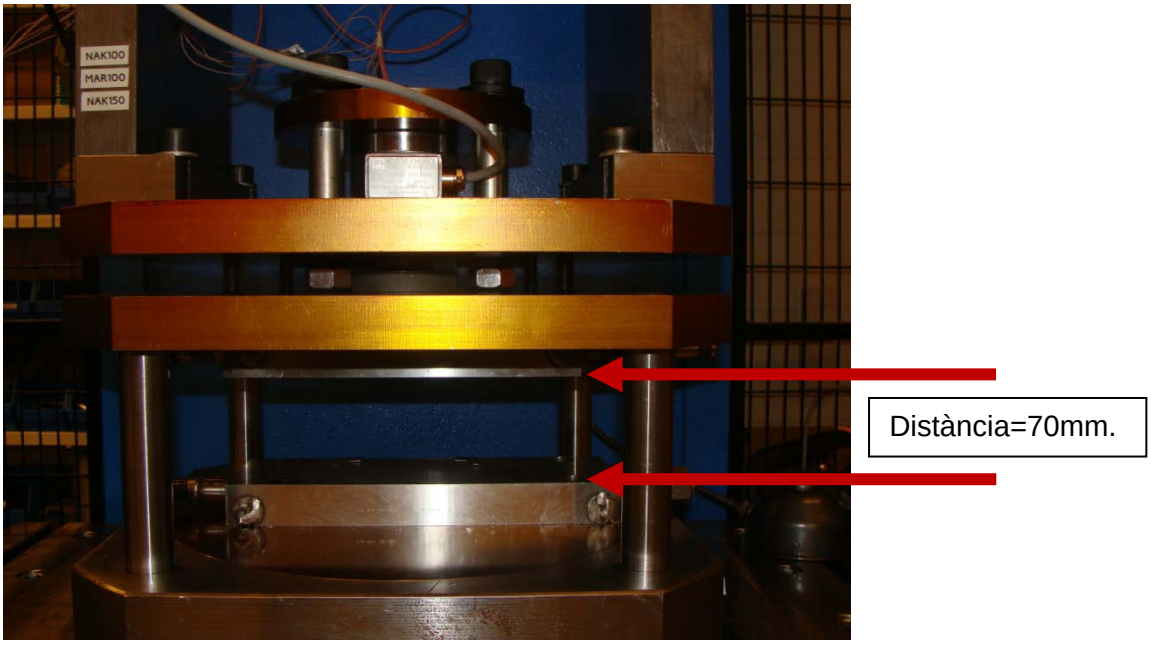


Figura 4. 2 Configuració de la premsa per als assaigs experimentals.

Inicialment hi ha una distància entre les superfícies de 70 mm. per a la col·locació de la xapa provinent del forn. Això correspon a una configuració interna de la màquina que està descrita a continuació però que no té massa rellevància.

- *Posició del cilindre principal*
    - Màx.: 754mm.
    - Mín.: 685 mm.
- *Posició del cilindre coixí (inferior)*
    - Màx.: 99 mm.
    - Mín.: 80 mm.

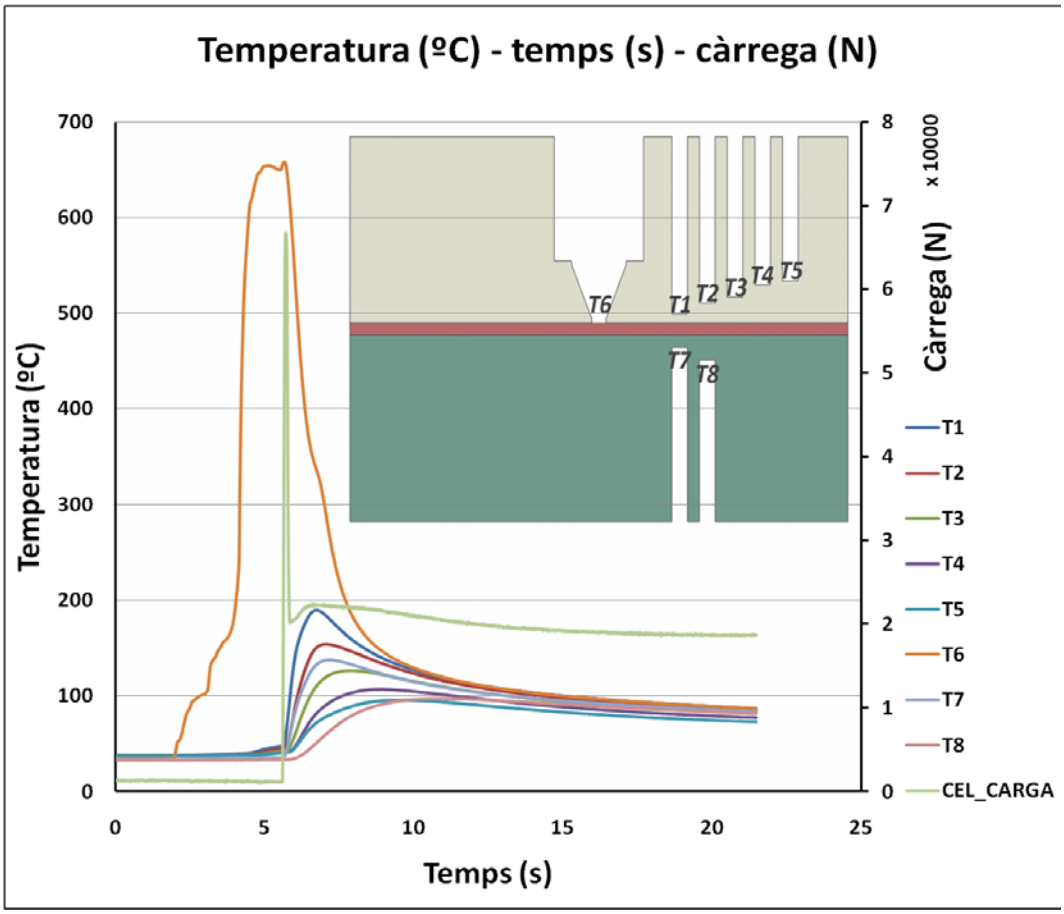
En tots els assaigs es respectaran les normes de seguretat del laboratori del CTM Centre Tecnològic on hi ha situada la premsa. La utilització de careta de protecció per evitar la radiació als ulls provinent de la xapa a 950ºC, de les botes de protecció per a la premsa, d'uns guants de protecció, a més de la indumentària de soldador per evitar cremades en cas d'accident serà obligatòria.

4.3 Resultats dels assaigs experimentals

4.3.1 Corbes temperatura – temps per diferents pressions de contacte

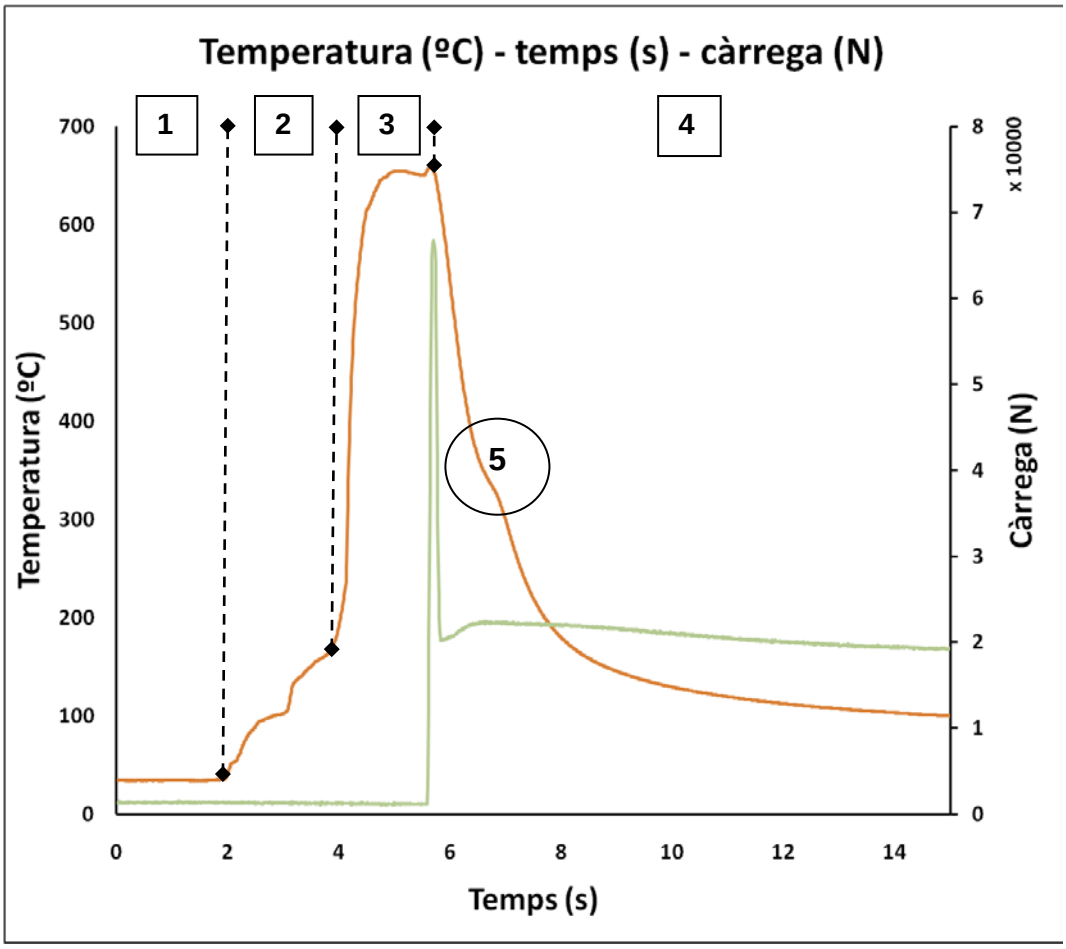
Per tal d'obtenir les corbes que permetran, a posteriori, validar les simulacions numèriques i obtenir un valor de conductància tèrmica de contacte per les diferents pressions de contacte i temperatures, s'han realitzat assaigs per quatre pressions de contacte diferents. Les pressions de contacte són de 2, 5, 8 i 15MPa. S'han realitzat tres repeticions per cada cas. Els formats han estat inicialment al forn durant 10 minuts a 950ºC. A continuació s'exposen i es descriuen els resultats obtinguts.

Assaigs a 2MPa



Gràfic 4. 1 Un dels tres assaigs realitzats amb una pressió de contacte de 2MPa.

Aquest *Gràfic 4. **1*** és un dels tres assaigs realitzats amb una pressió de contacte de 2MPa. S'observa l'evolució de la temperatura de la xapa corresponent a la mesura del termoparell 6 (T6), així com l'evolució de les temperatures dels punts interiors a diferents alçades de la matriu superior corresponents als termoparells T1, T2, T3, T4 i T5 i l'evolució de les temperatures dels dos punts interiors de la matriu inferior corresponents als termoparells T7 i T8. Aquesta és doncs la distribució transitòria de les temperatures per al procés experimental fruit de la transferència de calor existent i la naturalesa dels materials que hi intervenen. Però, a què són deguts els diferents pendents de la corba de temperatura de la xapa? En el Gràfic 4. 2 es representen les etapes que corresponen a cadascuna de les variacions de la corba per poder entendre el perquè dels canvis en la corba de temperatura.



Gràfic 4. 2 Etapes dels assaigs d'estampació plana en calent de xapa. Resposta dels termoparells en les diferents etapes.

Cal explicar en detall per aquest primer cas com interpretar els gràfics que es presentaran per poder comprendre i identificar ràpidament les etapes dels assaigs experimentals d'estampació en calent de xapa. La primera etapa correspon al transport del format d'USIBOR del forn fins a les matrius d'estampació. En aquesta

etapa s'observa que la temperatura dels termoparells no varia i la lectura de la cèl·lula de càrrega tampoc. En la segona etapa, el format es col·loca sobre els centradors i s'hi observa una variació de la temperatura irregular del termoparell T6. Aquest termoparell és l'encarregat de la lectura de temperatura de la xapa i, al trobar-se a l'aire dins les matrius, detecta la temperatura de la xapa per radiació. L'inici de la tercera etapa correspon al contacte de la matriu superior amb el termoparell T6, encarregat de donar la lectura de la temperatura de la xapa. Durant aquesta etapa la xapa ja es troba sobre els centradors amortits i la matriu empeny la xapa fins arribar al contacte amb la matriu inferior. És en aquest moment quan comença a haver-hi pressió de contacte com es pot observar en els instants finals de l'etapa 3. La cèl·lula de càrrega comença a donar valors de pressió al inici de l'etapa 4, es produeix un pic degut a la inèrcia del conjunt al baixar. Durant aquesta etapa es dona l'estampació del format de xapa d'acer i el tremp del material gràcies a les altes velocitats de refredament a que és sotmès.

Es pot observar també que durant l'etapa de conformat i tremp la corba de temperatura corresponent a la lectura de la xapa, experimenta una irregularitat. Aquesta sempre es produeix i es deguda a la transformació de fase martensítica. S'aprecia en la Figura 4. 3 que l'inici de transformació martensítica es produeix també a aproximadament uns 380ºC. El canvi de fase martensític allibera una energia en forma de calor latent que repercuteix en el descens de la temperatura de la xapa reduint la velocitat de refredament d'aquesta. Per això, s'observa aquest canvi en el pendent de la corba de temperatura.

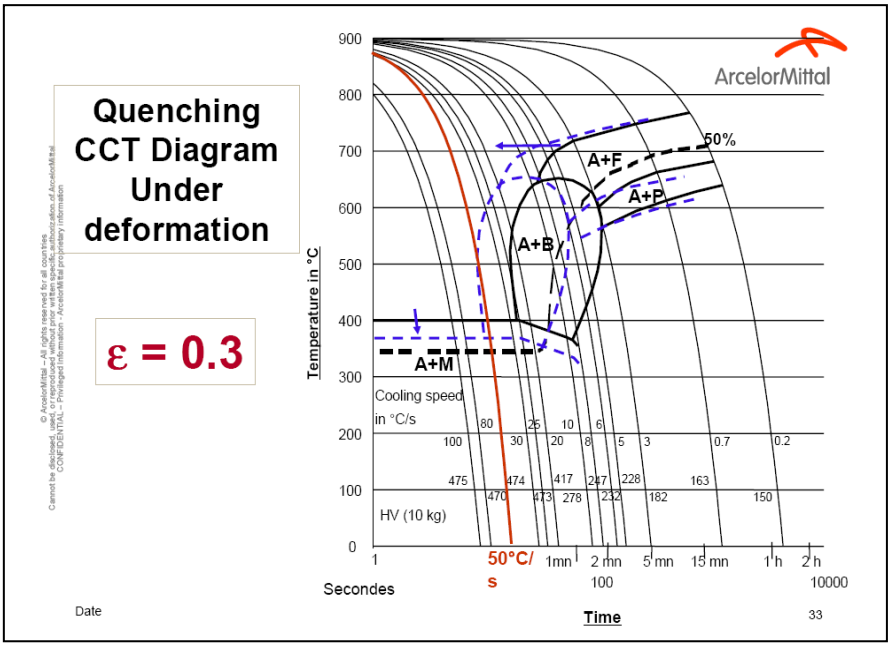
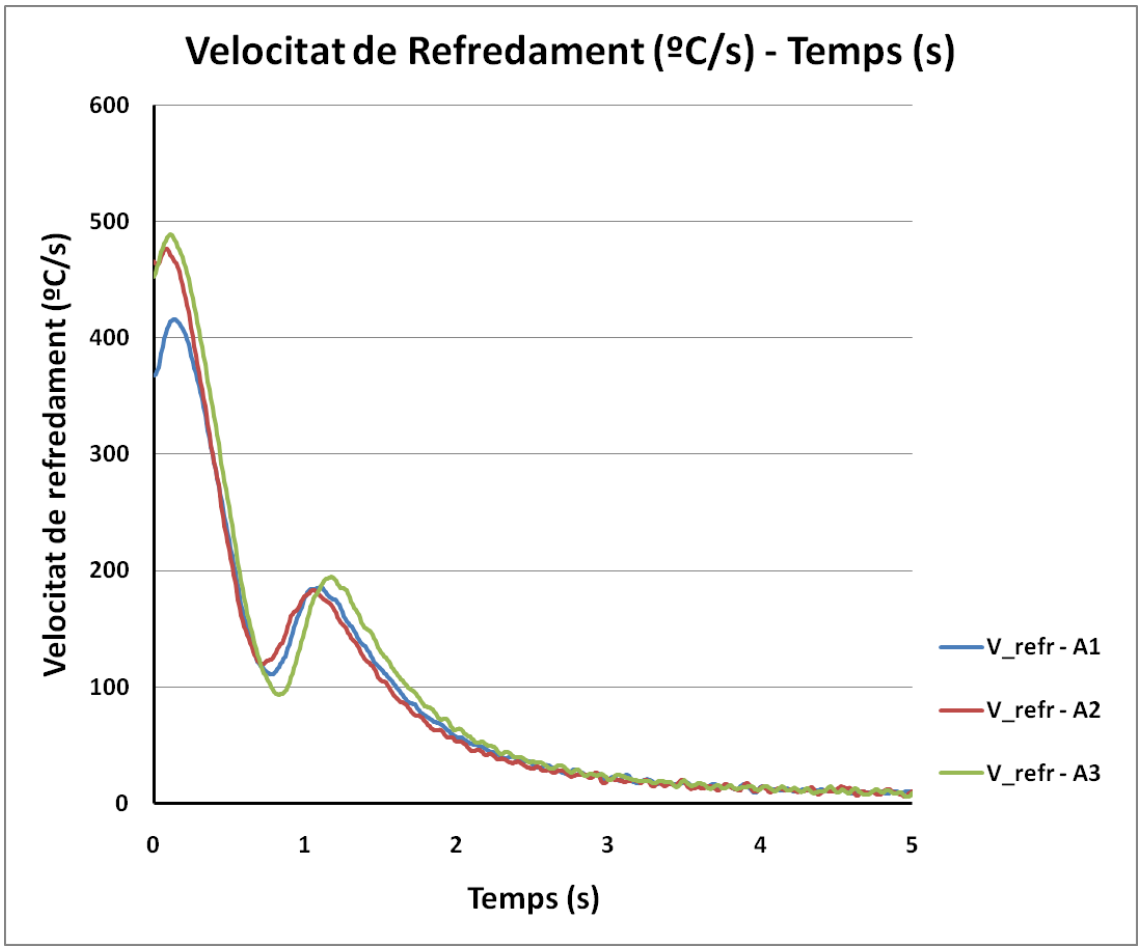


Figura 4. 3 Diagrama CCT de l'acer USIBOR 1500 P sota una deformació aproximada de 0,3. Obtingut d'Arcelor, fabricants de l'acer en qüestió.

És important controlar totes les etapes del procés, els fenòmens que es produeixen i el per què, així com contemplar l'existència d'errors en la mesura de temperatures però especialment important és l'etapa de conformat i tremp. Per això aquest punt es centrarà en exposar també en detall l'etapa de conformat del format d'acer a alta temperatura. S'adjuntaran per als tres assaigs realitzats a una pressió de 2MPa, les corbes de velocitat de refredament en funció del temps i en funció també de la temperatura en dos gràfics diferents. Observar Gràfic 4. 3 i Gràfic 4. 4 respectivament. S'ha establert el zero en l'inici de l'etapa de conformat i tremp, és a dir, a partir del pic de pressió vist amb anterioritat i s'han ajustat els valors dels eixos per a fer més visibles els diferents assaigs.

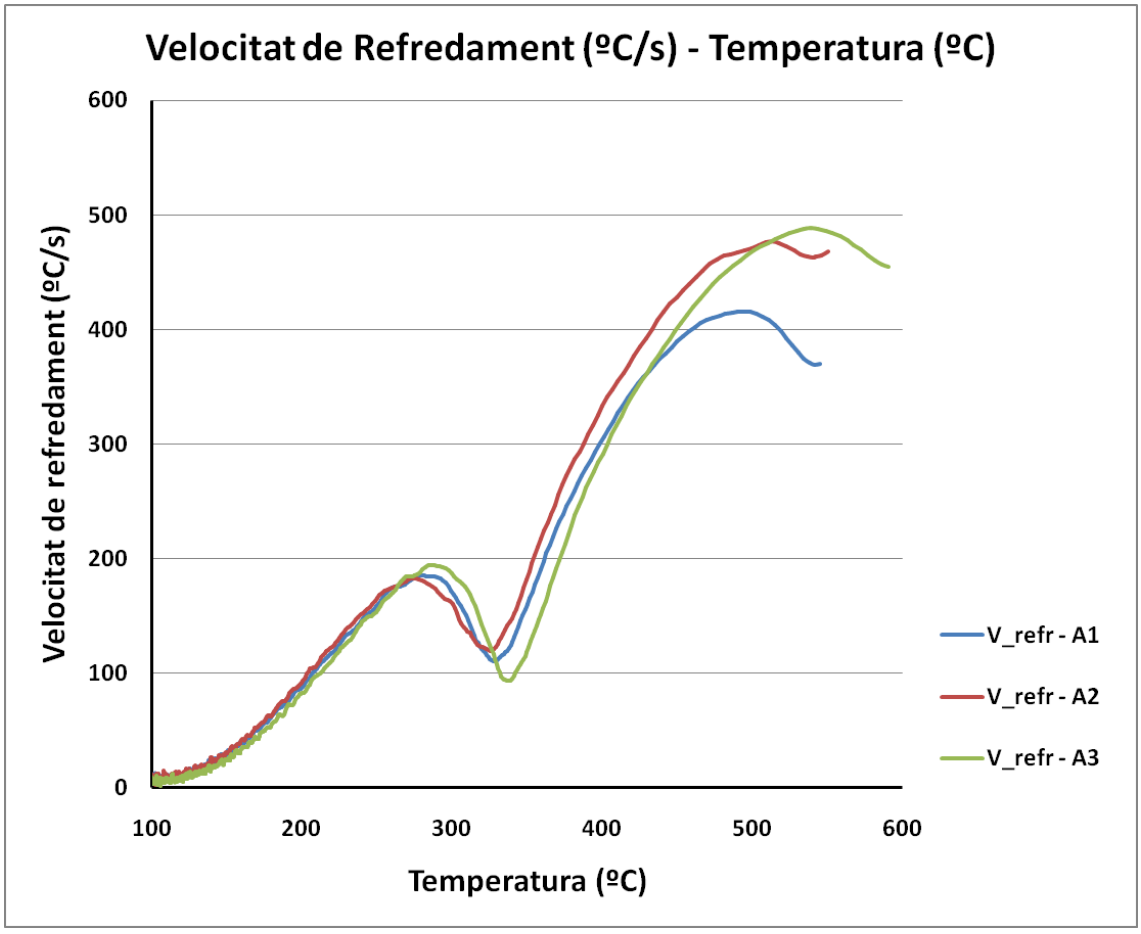


Gràfic 4. 3 Corbes de velocitat de refredament en funció del temps a partir del pic de pressió de la cèl·lula de càrrega per als tres assaigs realitzats a 2MPa.

En aquest gràfic es pot observar, per als tres casos, velocitats de refredament molt altesa l'inici que van disminuint fins al final. La part inicial en que el pendent augmenta és físicament impossible, però hi és degut a que en el moment del pic de pressió la temperatura del termoparell T6, passa d'estar estabilitzat a començar a detectar el descens brusc de les temperatures, aquest canvi es produeix degut al temps de

reacció del termoparell. Es continua apreciant també una irregularitat enmig, on la velocitat disminueix i torna a augmentar per seguir disminuint amb normalitat. Aquesta és deguda a l'aportació de l'energia en forma de calor latent que produeix el canvi en l'estructura, que passa a ser d'austenita a martensita. Aquest gràfic permet estudiar conjuntament amb les corbes CCT del material amb quant temps la peça assoleix una estructura gairebé 100% martensítica. El final de canvi de fase martensític no es dona fins a temperatures negatives però prop dels 100 graus Celsius el percentatge de martensita ja és molt elevat, gairebé del 100%. Per això, s'observa que amb tan sols dos segons ja s'ha produït el tremp de la peça. Aquest temps òptim de conformat i tremp és doncs, proporcional a la velocitat de refredament que es produeix en l'estampació i, per tant, proporcional a la qualitat del contacte tèrmic i capacitat de les matrius per extreure calor. L'estudi de tots aquests fenòmens pot comportar a la industria, reduir moltíssim el temps de conformat i, per tant, augmentar la producció.

Per poder observar l'evolució de la velocitat de refredament amb la temperatura s'adjunta a continuació el Gràfic 4. 4, aquest permetrà conèixer si durant tota l'etapa de conformat la velocitat de refredament es manté per sobre de la crítica de tremp.

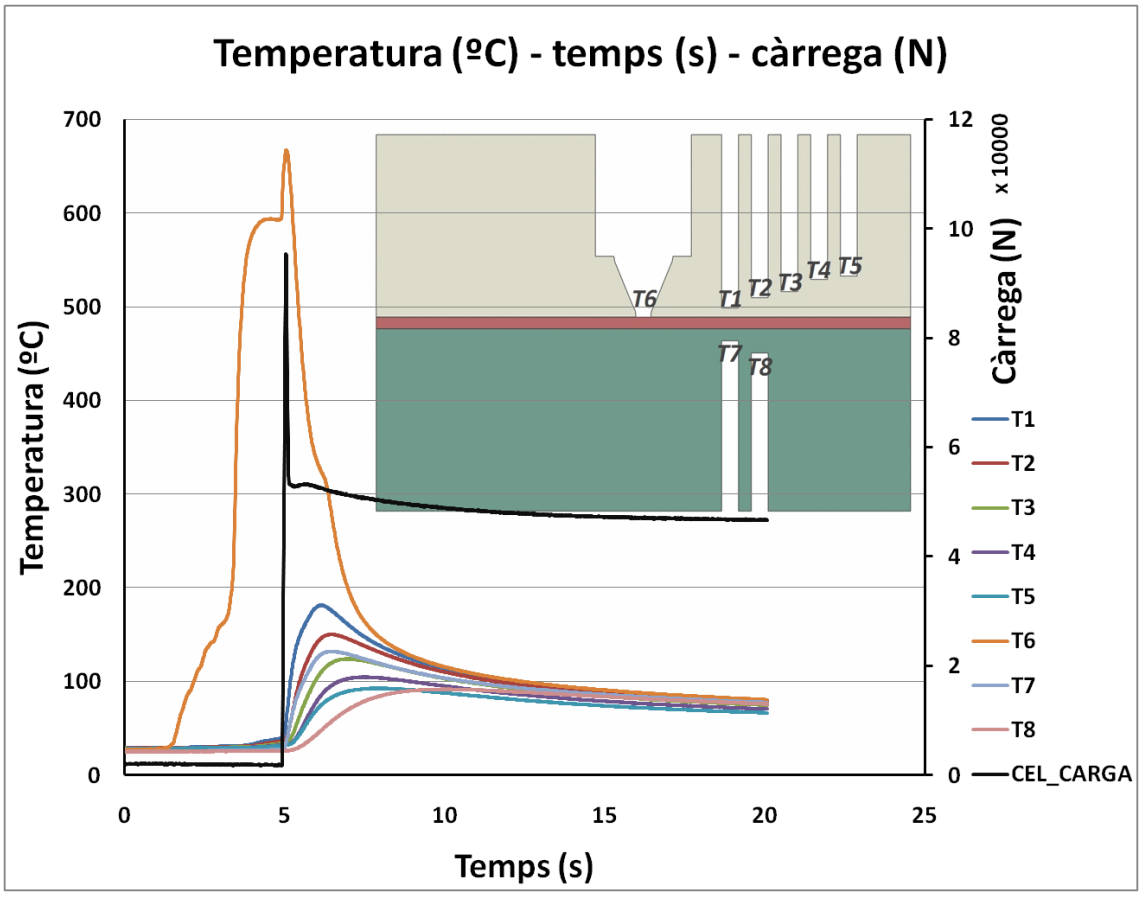


Gràfic 4. 4 Evolució de la velocitat de refredament amb la temperatura. Pressió de 2MPa.

S'observa que, en efecte, durant tota l'etapa de conformat i tremp, la velocitat de refredament, supera la crítica de tremp que és de aproximadament 50 – 60ºC/s.

Assaigs a 5MPa

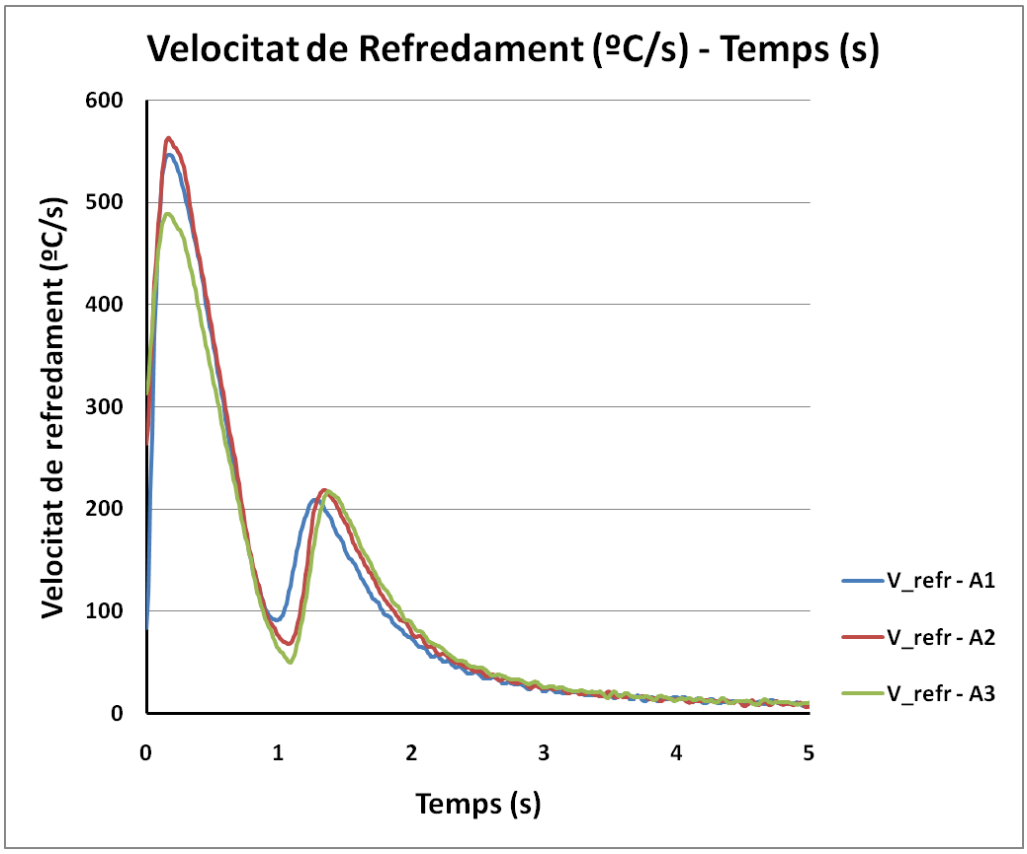
Per al cas d'una pressió de contacte de 5MPa s'observa a continuació, en el Gràfic 4. 5, l'evolució de les temperatures i la càrrega en funció del temps.



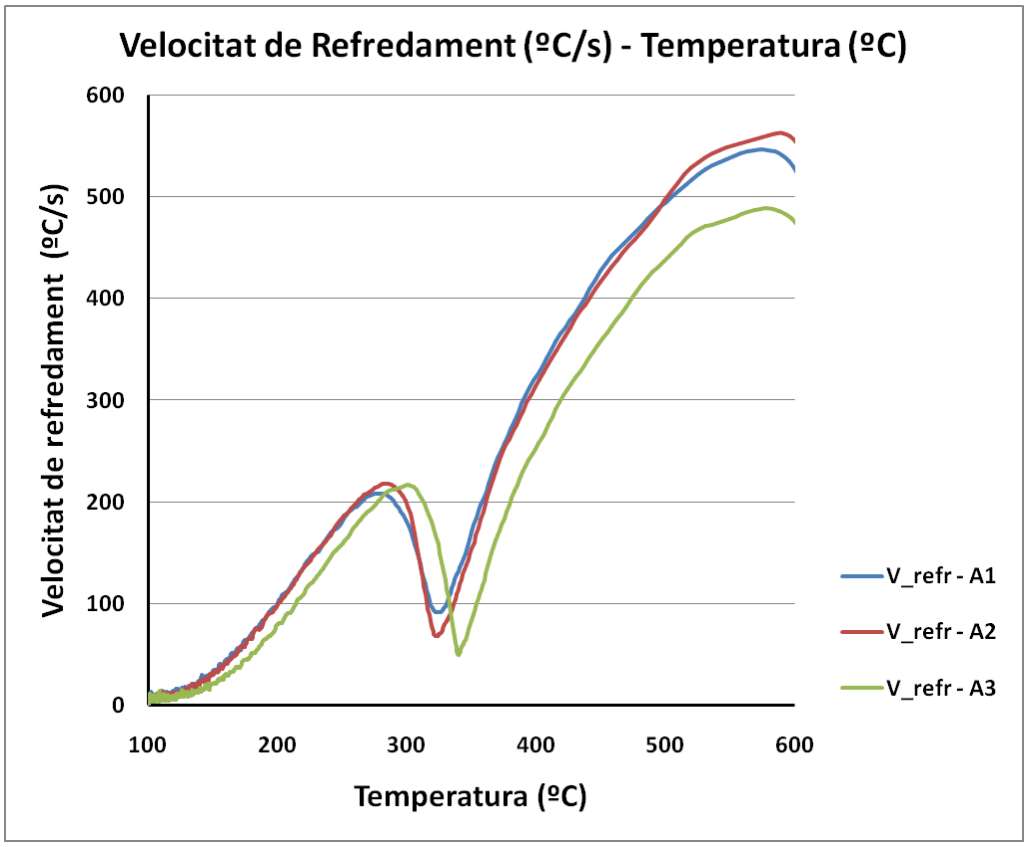
Gràfic 4. 5 Gràfic d'evolució de les temperatures i càrrega en funció del temps.

En aquest cas tornem a apreciar les mateixes característiques en les diferents etapes del procés experimental de conformat en calent de xapa. Cal recordar que aquest és un dels tres assaigs realitzats per una pressió de 5MPa i s'adjunta a fi de poder observar les característiques i etapes del procés.

Focalitzant la importància en l'etapa de conformat i tremp, a continuació s'adjuntaran les corbes de l'evolució de la velocitat de refredament en funció del temps i temperatura per als tres assaigs realitzats a una pressió de 5MPa. Veure el Gràfic 4. 6 i el Gràfic 4. 7 respectivament.



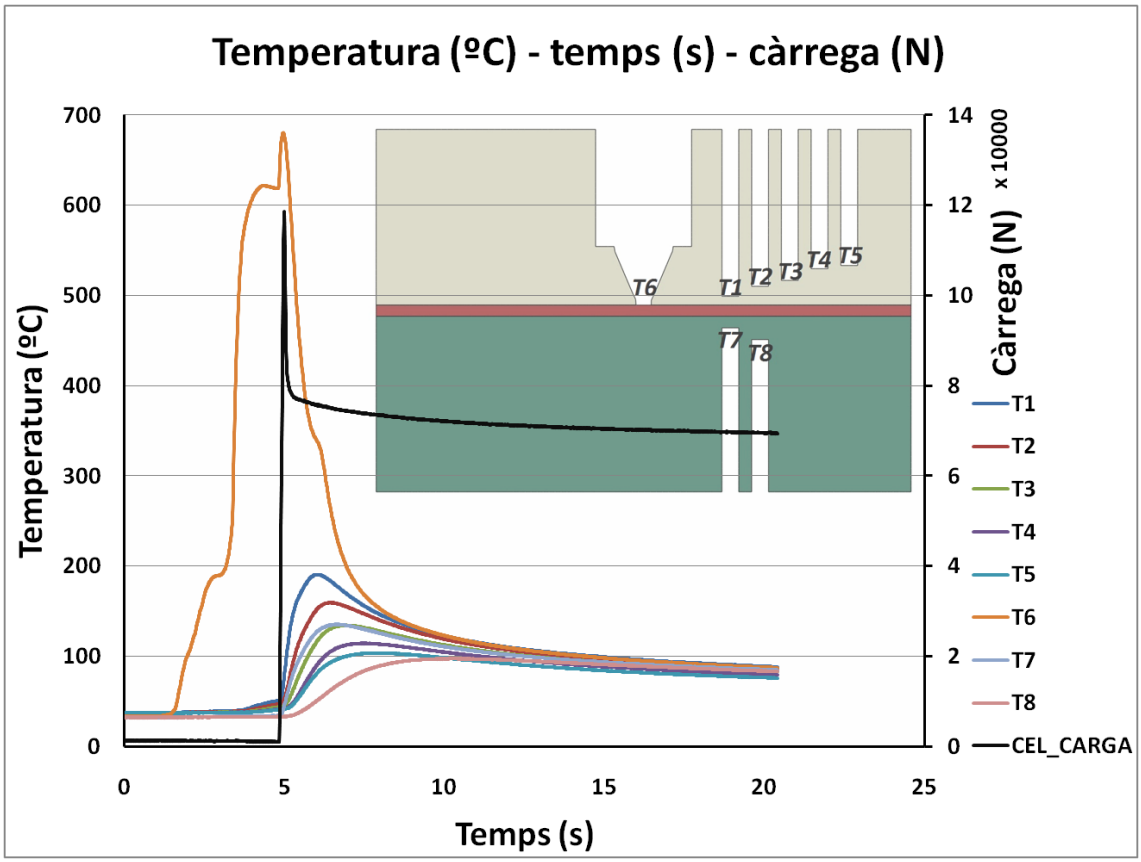
Gràfic 4. 6 Corbes d'evolució de la velocitat de refredament en funció del temps, a partir del pic de pressió, per als tres assaigs a una pressió de 5MPa.



Gràfic 4. 7 Evolució de la velocitat de refredament amb la temperatura dels tres assaigs amb una pressió de contacte de 5MPa.

Assaigs a 8MPa

Per al cas d'una pressió de contacte de 8MPa, s'han realitzat també tres assaigs experimentals. A continuació, en la Gràfic 4. 8, s'observa l'evolució de la temperatura en funció del temps per a un dels assaigs realitzats.

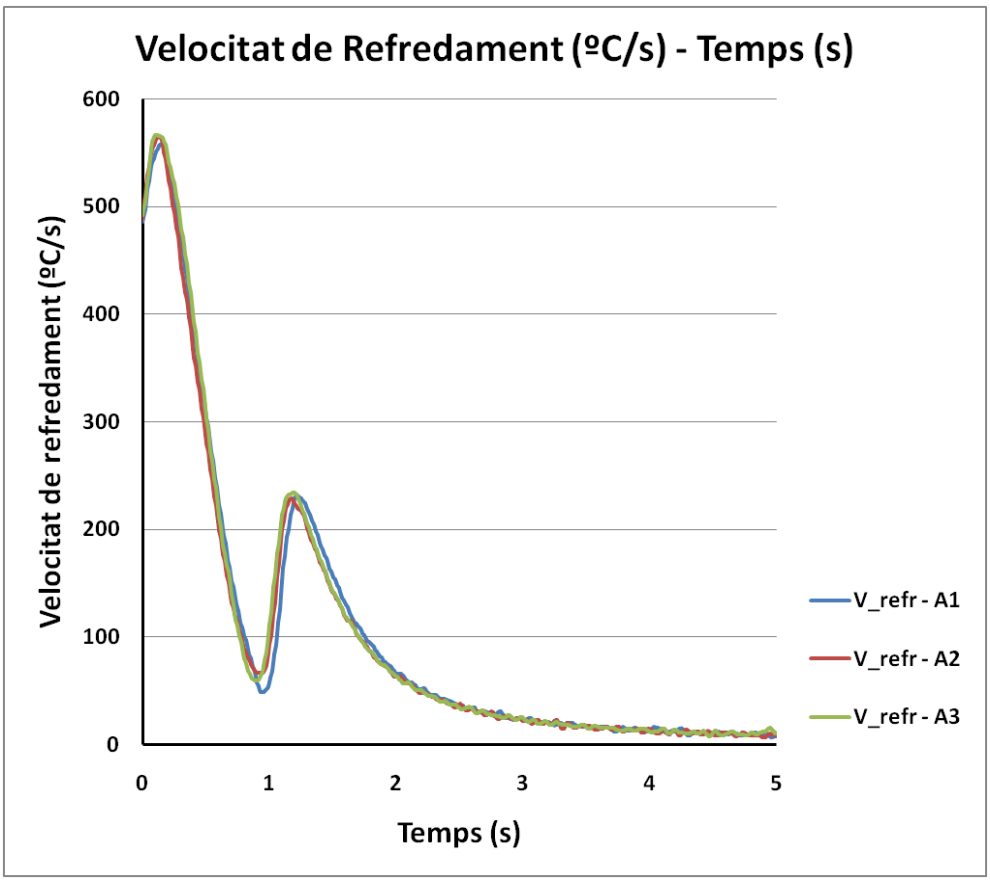


Gràfic 4. 8 Evolució de les temperatures en funció del temps per a un dels assaigs realitzats a una pressió de contacte de 8MPa.

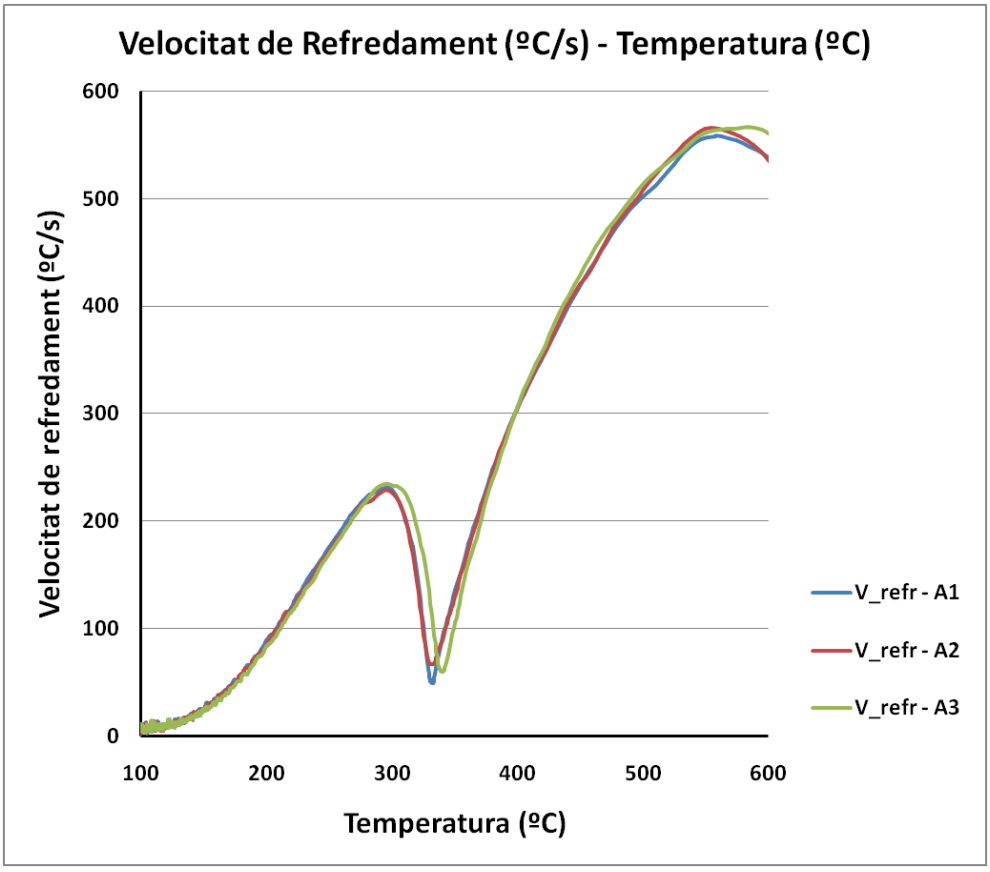
Cal tenir en compte que les pressions de contacte són sempre aproximades ja que resulta impossible mantenir una càrrega constant amb la premsa. És complicat ajustar la càrrega ja que es fa per mitjà d'una vàlvula de pressió i més complicat és encara evitar el pic de pressió degut a la inèrcia que porta el conjunt superior al baixar. Tota aquesta massa produeix un augment de pressió al circuit que fins que no arriba a la vàlvula, aquest no es redueix a la pressió estimada.

No obstant això, les aproximacions són força bones i no tenen cap efecte advers sobre els assaigs experimentals.

A continuació es presentaran els resultats per als tres assaigs a 8MPa, en forma de corbes que representen l'evolució de la temperatura en funció del temps i de la temperatura en els diferents gràfics, Gràfic 4. 9 i Gràfic 4. 10, respectivament.



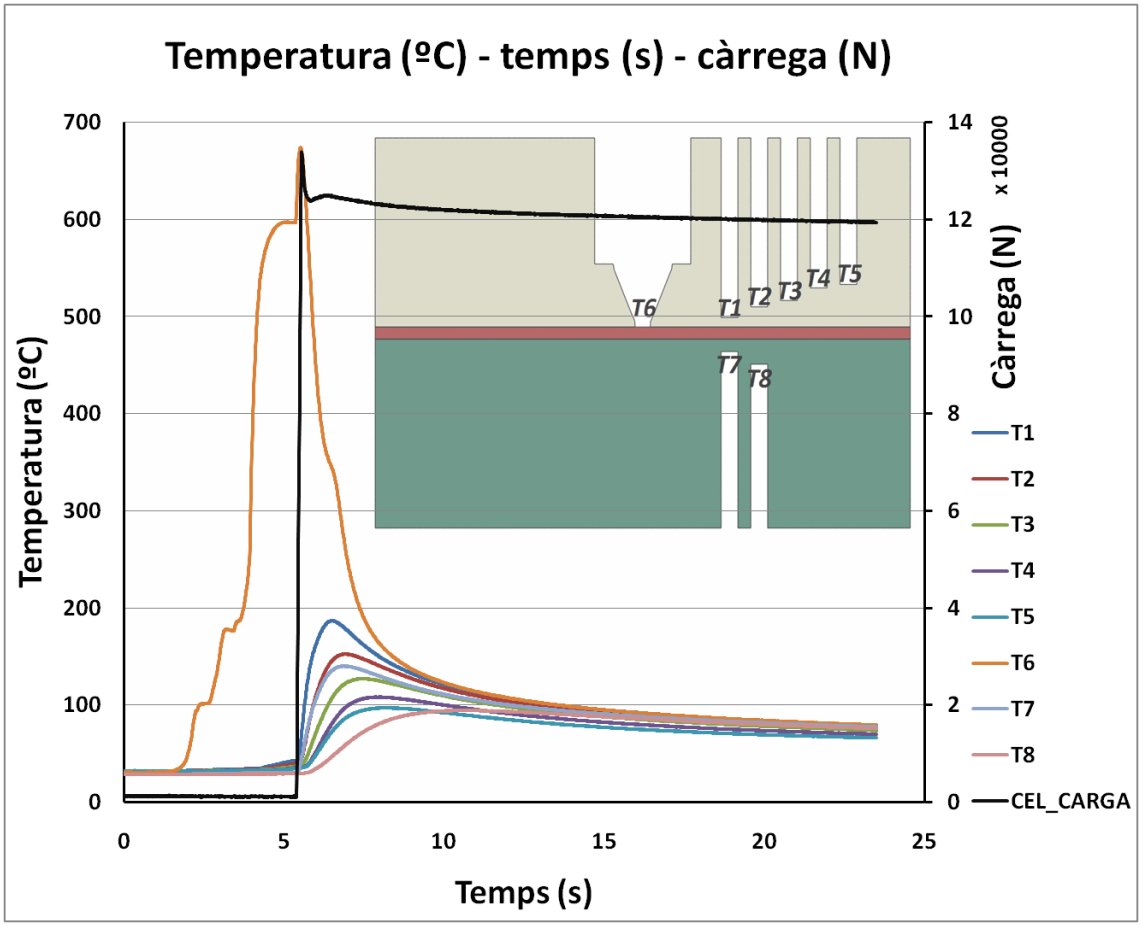
Gràfic 4. 9 Evolució de la velocitat de refredament amb el temps per a 8MPa.



Gràfic 4. 10 Evolució de la velocitat de refredament amb la temperatura per a 8MPa

Assaigs a 15MPa

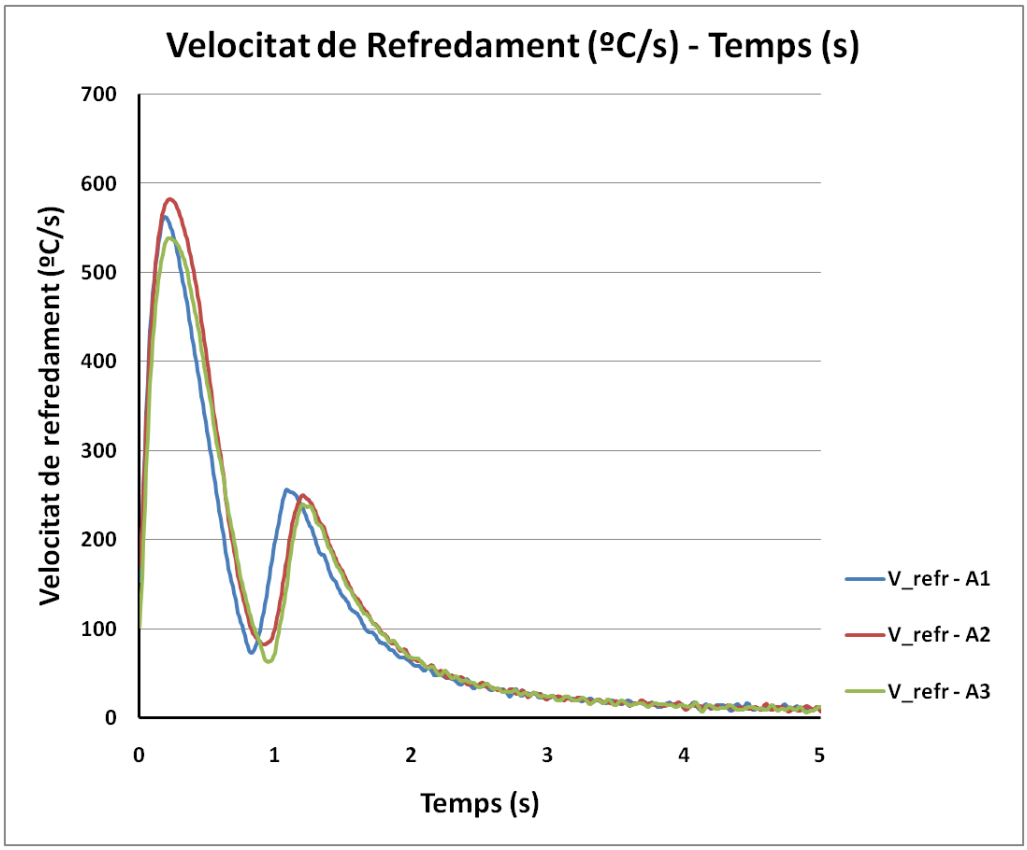
En aquest cas, per unes condicions de pressió de aproximadament 15MPa, s'han realitzat també tres assaigs, dels quals en tenim una mostra a continuació (Gràfic 4. 11). S'observa que a més pressió, més acompanya el pic de reacció del termoparell T6 degut a la pressió exercida per la premsa. En el moment del pic de pressió, el termoparell estableix un fort contacte amb la xapa, la qual cosa fa que la qualitat del contacte augmenti i, per tant, el termoparell marqui més temperatura que fins aleshores.



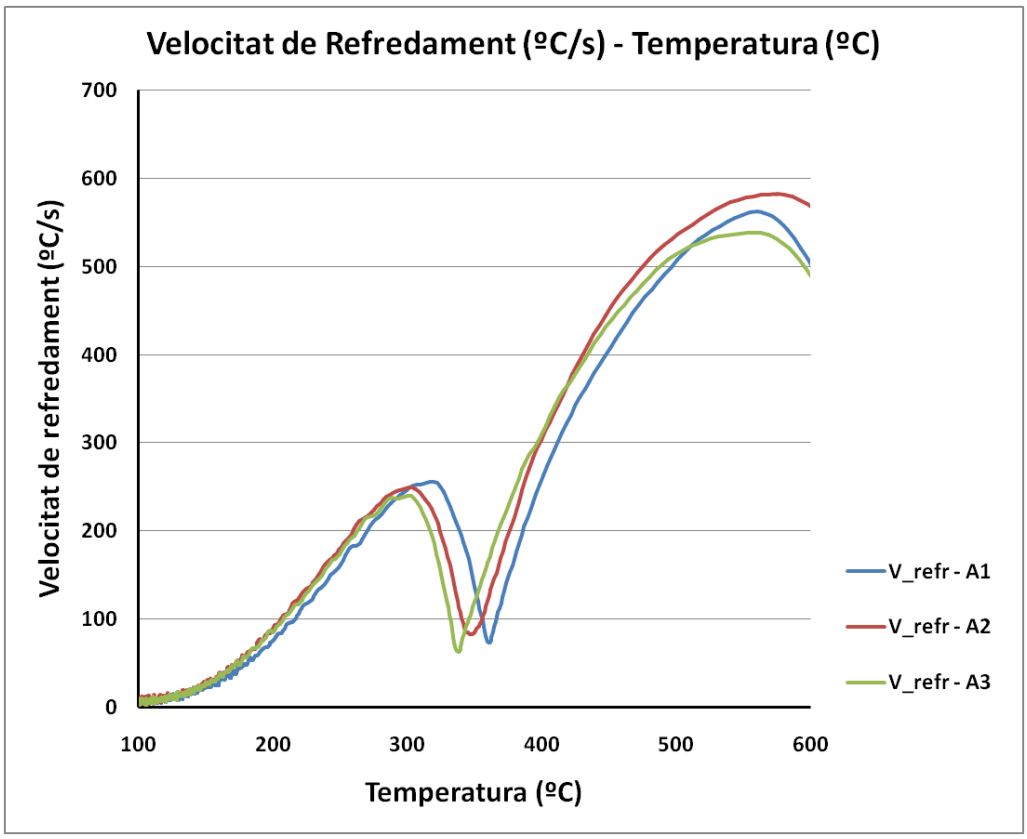
Gràfic 4. 11 Evolució de la temperatura i la càrrega en funció del temps per a un dels assaigs amb pressió de contacte de 15MPa.

Finalment, s'han extret també per aquests assaigs de 15MPa de pressió les gràfiques de l'evolució de les velocitats de refredament en funció del temps i en funció de la temperatura. Sempre considerant l'inici en el pic de pressió.

Els gràfics de a continuació representen les corbes esmentades anteriorment. Observar el Gràfic 4. 12 i el Gràfic 4. 13 respectivament.



Gràfic 4. 12 Evolució de la velocitat de refredament en funció del temps per als tres assaigs realitzats a 15 MPa de pressió.



Gràfic 4. 13 Evolució de la velocitat de refredament en funció de la temperatura per als tres assaigs realitzats a 15MPa de pressió.

4.3.2 Corbes de temperatura – temps per diferents offsets de contacte

En els processos de conformat per estampació en calent de xapa d'acer d'alta resistència mecànica, prenen una importància molt elevada tots els factors que envolten i incideixen en la qualitat del contacte tèrmic i, per tant, en aconseguir una transferència de calor òptima per aconseguir peces amb les propietats mecàniques desitjades.

Un dels factors més importants recau en la geometria. La matriu i el punxó que aportaran a la peça la forma desitjada han de mantenir un offset constant igual a l'espessor de la xapa. Això no obstant, és impossible d'aconseguir amb les eines de què disposa la industria actual. Aquest offset constant així com el control de la rugositat de les eines i xapa, aporta al procés unes condicions conegudes i, per tant, en facilita l'estudi. No obstant, això mai es produeix. La realitat és que, en les geometries complicades com són les que aconsegueixen produir les peces que s'usen en la industria, els offsets entre matriu i punxó són variables al llarg de tota la peça. A més a més s'ha vist que aquests offsets poden ser importants, de fins a dos o tres dècimes de mil·límetre més que l'espessor de la xapa. Això afecta molt negativament en l'etapa de conformat i tremp, ja que redueix la velocitat de refredament per zones i, per tant, no s'obté la mateixa estructura metal·lúrgica en les diferents zones o, si més no, no s'obté al mateix temps.

L'objectiu d'aquest punt és determinar la influència que té el fet de minimitzar la qualitat del contacte augmentant la distància entre la xapa i l'eina. Per això, es realitzaran proves experimentals posant topes a les vores de la xapa, entre les dues matrius de diferents espessors controlats amb exactitud. En la Figura 4. 4 s'observa el procediment dels assaigs i l'aplicació dels espessors al costat de la xapa per evitar el contacte amb offset zero.

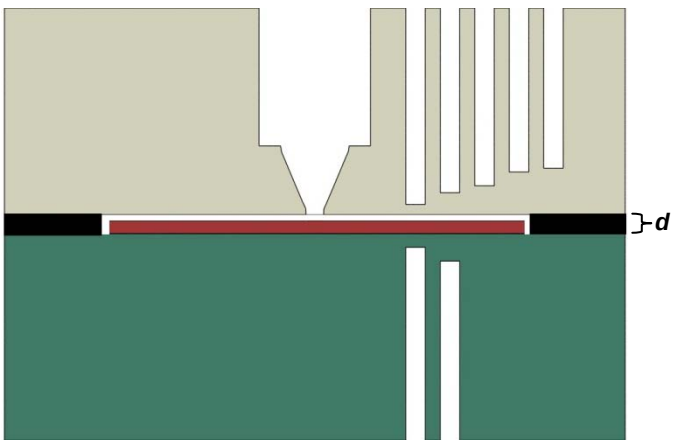
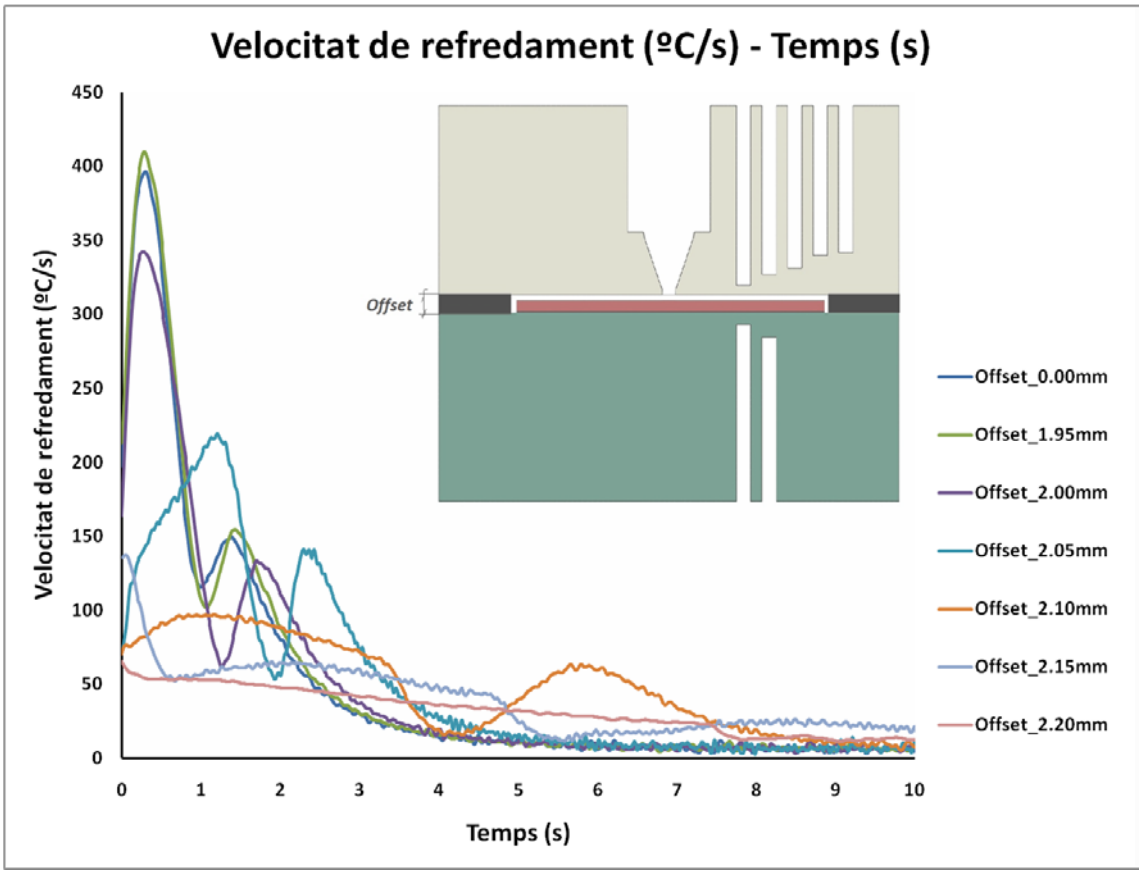


Figura 4. 4 Mètode de col·locació dels espessors per als assaigs d'offsets.

Tenint en compte que una vegada mesurada la mitjana d'espessor dels formats de xapa utilitzats s'ha vist que és de 1.92 mm., s'han realitzat set assaigs diferents variant l'espessor dels topes. En el primer assaig no s'hi ha posat res per aconseguir un contacte amb offset zero. En el segon assaig s'hi ha posat uns topes de 1.95mm. i en els següents s'ha anat augmentant l'espessor en 0.5 dècimes de mm. Fins a arribar als topes de 2.2mm.

Per aquests assaigs els format de xapa d'USIBOR 1500 P han estat al forn durant set minuts a 950ºC. La pressió exercida ha estat de aproximadament 8MPa.

En el següent gràfic, el Gràfic 4. 14, s'observa l'evolució de la velocitat de refredament en funció del temps per als diferents assaigs realitzats amb les condicions descrites amb anterioritat.



Gràfic 4. 14 Evolució de la velocitat de refredament en funció del temps, a partir del pic de pressió, per als deferents assaigs d'offset de contacte.

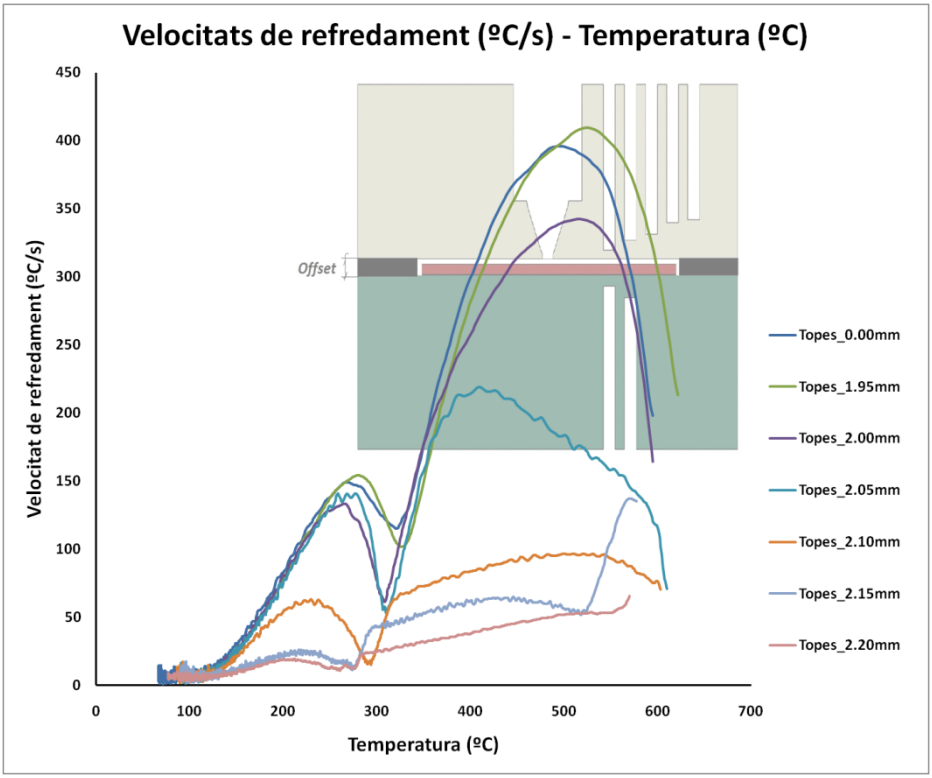
S'observa que per als dos primers casos les diferències són mínimes. Pot ser doncs que l'espessor de la xapa augmenti fins a superar els 1.95mm quan s'escalfi dins al forn. És tan sols una suposició i, com tot aquest punt, objecte d'estudi en un treball futur. A partir dels offset de 1.95mm si que ja comencen a disminuir les velocitats de

refredament de forma intensa. Aquest anàlisi permet observar que per offsets en el contacte superiors a 0.15 les corbes de velocitat de refredament es comencen a acostar perillosament a la velocitat crítica de tremp de 60ºC dels diagrames CCT de l'USIBOR amb una deformació aplicada. Això suposa un handicap per a l'obtenció d'una estructura homogènia en la peça final dels processos industrials.

Aquesta possible variació de les velocitats de refredament en les diferents zones d'una peça real pot suposar, a més a més, que la transformació martensítica de l'estructura per les diferents zones no es doni al mateix temps i fins i tot que es doni quan les eines ja es retiren per poder retirar la peça. En el procés de conformat en calent de xapa real l'etapa de conformat + tremp dura entre 4 i 5 segons, i, com es pot observar en el Gràfic 4. 14, en zones on l'offset fos de 0.15 – 0.20 mm en amunt la transformació martensítica no s'hauria acabat de produir o encara s'hauria de produir. Això no interessa, ja que, de manera descontrolada, s'obtindrien diferents propietats mecàniques al llarg de la peça.

Això no obstant, aplicat de manera controlada pot suposar un gran sistema per obtenir peces de diferents propietats mecàniques al llarg de l'horitzontal de la peça. Per tant, les eines actuarien com a *tailored tools.*

Les corbes de velocitat de refredament en funció de la temperatura s'adjunten a continuació (Gràfic 4. 15).



Gràfic 4. 15 Evolució de la velocitat de refredament en funció de la temperatura .

En els diferents assaigs realitzats amb offsets de contacte diversos s'han obtingut resultats molt interessants. Encara que no molt precisos, marquen la tendència molt clarament, i això permet extreure'n uns conclusions molt clares. A mesura que augmenta l'offset entre la xapa i l'eina en un contacte, disminueix la qualitat del contacte, amb la qual cosa les velocitats de refredament també disminueixen. Això suposa una variació en els temps de transformació de fase d'austenita a martensita i, per tant, suposa diferents temps òptims de conformat + tremp. Amb la qual cosa, si el format es treu del procés a un temps hipotètic de 4,5 segons, les zones de les eines que no estiguin ajustades correctament, es produiran diferencies de propietats mecàniques al llarg de la peça de manera descontrolada.

A més a més, es pot observar en el Gràfic 4. 15 la diferència de canvis de fase segons amb quina velocitat de refredament s'hi arribi. Existeixen diferències clares en l'alliberació d'energia que es produeix en els diferents casos d'estudi. Els canvis per a velocitats de refredament petites, semblants o inferiors a la crítica de tremp, són de baixa intensitat, no alliberen tant calor latent i es produeixen tard. Probablement ens els offsets més grans la transformació de fase no sigui totalment martensítica, sinó també austenítica - bainítica.

En aquest punt es dona la informació d'aquests assaigs inicials a fi de presentar les possibilitats dels assaigs experimentals per solucionar i/o estudiar la complexitat dels problemes reals dels processos d'estampació en calent en la industria, però s'espera arribar més enllà en treballs futurs.

4.3.3 Disseny d'experiment. Factorial complet 2^2

El disseny estadístic d'experiments contempla una amplia varietat d'estratègies experimentals que són òptimes per a generar l'informació que es busca. En aquest cas és adequat utilitzar el *disseny factorial complet* 2^2. Aquest, permet descriure els experiments més adequats per conèixer simultàniament quin efecte tenen k factors sobre una resposta i descobrir si interaccionen entre ells.

En aquest cas s'utilitzarà k=2 ja que són 2 (*a priori)* els factors que es poden modificar per estudiar l'efecte que tenen en la resposta.

L'objectiu del disseny d'experiments és esbrinar la incidència de les variables amb el mínim número d'experiments (i per tant, amb el mínim cost) i amb la menor incertesa possible.

En el nostre equip experimental d'estampació plana en calent són varies les variables o factors que podem modificar en els assaigs i que poden influir en la resposta. En aquest cas, segons les condicions d'assaig, la xapa experimentarà una velocitat de refredament o una altra. Però quina de les variables té més incidència en la resposta? Totes per igual? Unes més què les altres? Un disseny d'experiment òptim serà el què permetrà resoldre tots aquests dubtes.

L'objectiu és esbrinar en quin grau poden influir les variables en la resposta i conèixer així, el rang òptim d'assaigs i el factor que més influència té en la resposta.

Factors i domini experimental

Per escollir els factors i el seu domini experimental satisfactòriament cal conèixer el procés, el funcionament de l'equip i òbviament cal tenir ben ajustat l'equip de captura de dades. En la Taula 4. 1 hi podem observar els dos factors escollits i els respectius dominis experimentals. Els dos factors són continus.

Factors	***Domini experimental***	
	Nivell (-)	Nivell (+)
$\mathbf{X_1}$ = $T^a_{entrada}$ xapa	**400**ºC	**800**ºC
$\mathbf{X_2}$ = Pressió en la xapa	**2**MPa	**5**MPa

Taula 4. 1 Factors i dominis escollits.

Matriu d'experiments: El disseny factorial complet 2^2

De les moltes estratègies experimentals s'ha d'escollir la que donarà la informació més fiable en el mínim d'assaigs possible. L'experimentació que compleix amb aquests requisits és la que els factors prenen només dos valors (nivells). A més a més, per a que porti la mínima incertesa els valors han de coincidir amb els extrems dels dominis experimentals. En la Taula 4. 2 s'observa la matriu d'experiments que s'obté combinant els dos nivells de cada factor. Aquest és el disseny denominat factorial complet 2^2 (la base 2 indica que cada factor pren només 2 valors i 2^2=4 indica que existeixen 4 combinacions.

	Matriu d'experiments		Pla d'experimentació	
	X_1	X_2	T^a_{ent} xapa (ºC)	Pressió xapa (MPa)
1	-	-	200	2
2	+	-	600	2
3	-	+	200	15
4	+	+	600	15

Taula 4. 2 Matriu d'experiments del disseny factorial complet 2^2.

Realització del disseny d'experiment

Per a la realització del pla d'experimentació, s'utilitzaran els assaigs realitzats en el punt 4.3.1 per a les pressions de contacte de 2 i 15MPa. Les temperatures d'entrada que s'han pogut llegir estan al voltant dels 600ºC, però com que en algunes ocasions no s'hi arriba, s'ha marcat el nivell superior de temperatura a 600ºC. Cal tenir en compte però, que aquesta temperatura no és real, la real se situa prop dels 800ºC. Però en aquest cas, es farà cas de la temperatura que marca el termoparell T6.

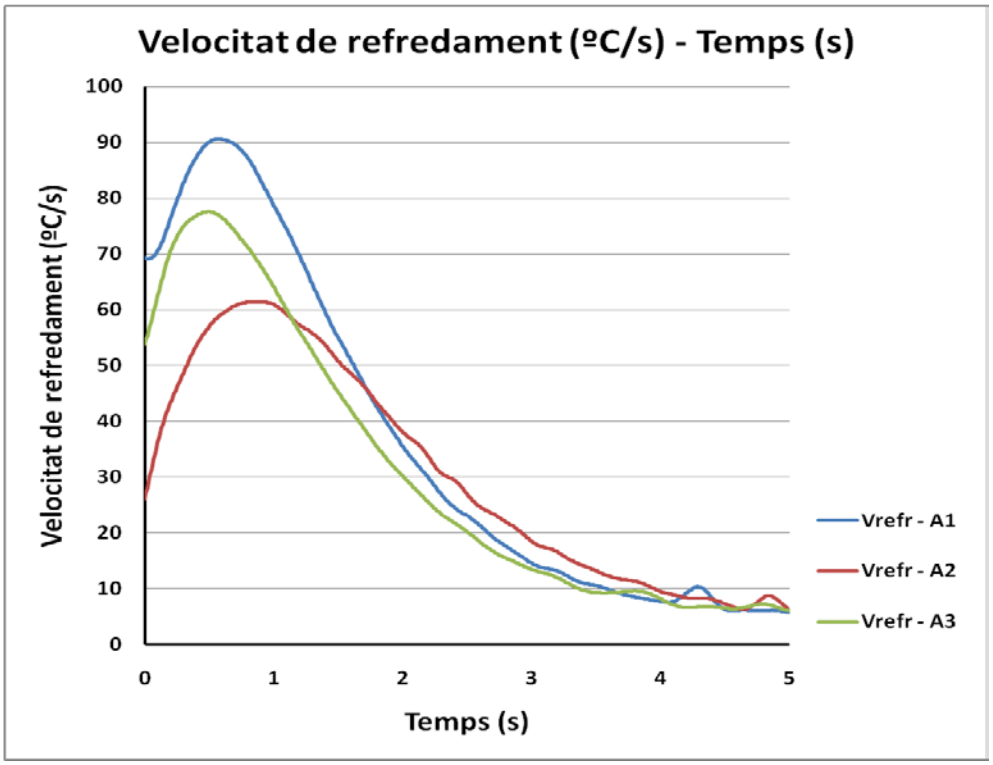
S'han hagut de realitzar assaigs per a les temperatures d'entrada inferiors, per a 2 i 15MPa. Tres repeticions per cada cas. D'aquesta manera, s'ha pogut completar i realitzar el disseny d'experiments.

Els formats de xapa han estat durant deu minuts al forn a 350ºC, i d'aquesta manera s'han obtingut temperatures d'entrada de aproximadament 200ºC.

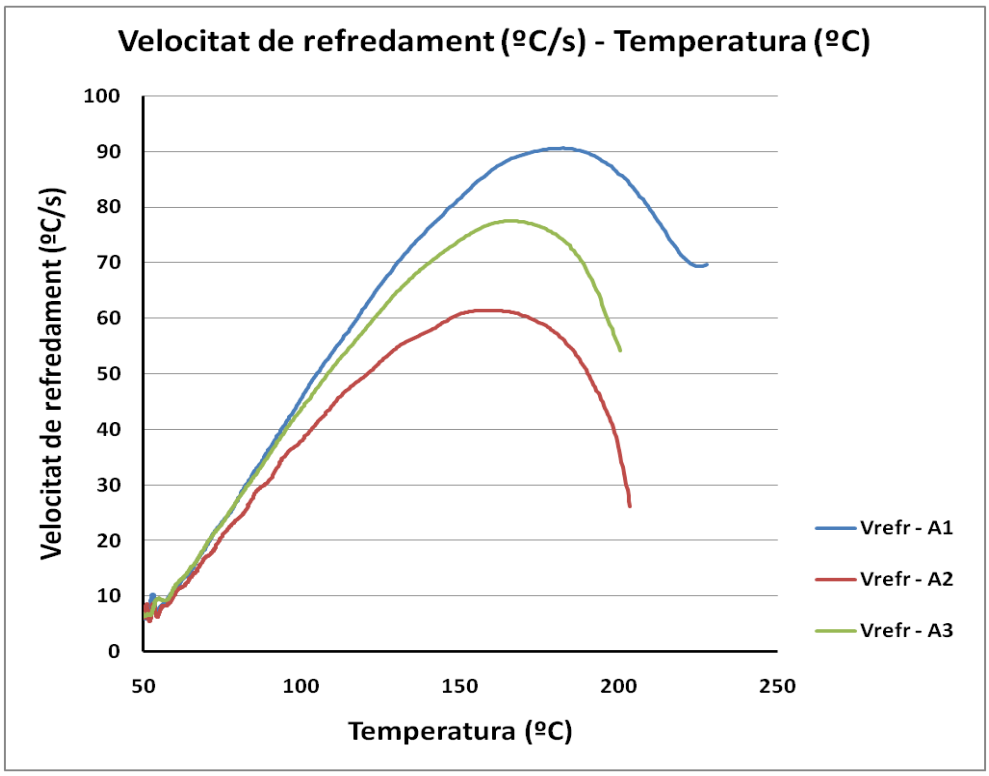
Aquest disseny d'experiment servirà principalment per quantificar la influència que tenen les variables de pressió i temperatura sobre la qualitat del contacte i, per tant, sobre la conductància tèrmica de contacte. Aquesta però, no servirà com a resposta o variable de sortida ja que no es pot obtenir directament dels assaigs. Es farà servir la velocitat de refredament ja que és una variable que està molt lligada a la qualitat del contacte. Més velocitat de refredament per un mateix increment de temperatura suposa més flux de calor per unitat de temps i, per tant, un valor de conductància de contacte més elevat.

A continuació s'adjunten els gràfics obtinguts en els assaigs de temperatures baixes (200ºC).

Assaigs a 2MPa i 200ºC de temperatura d'entrada

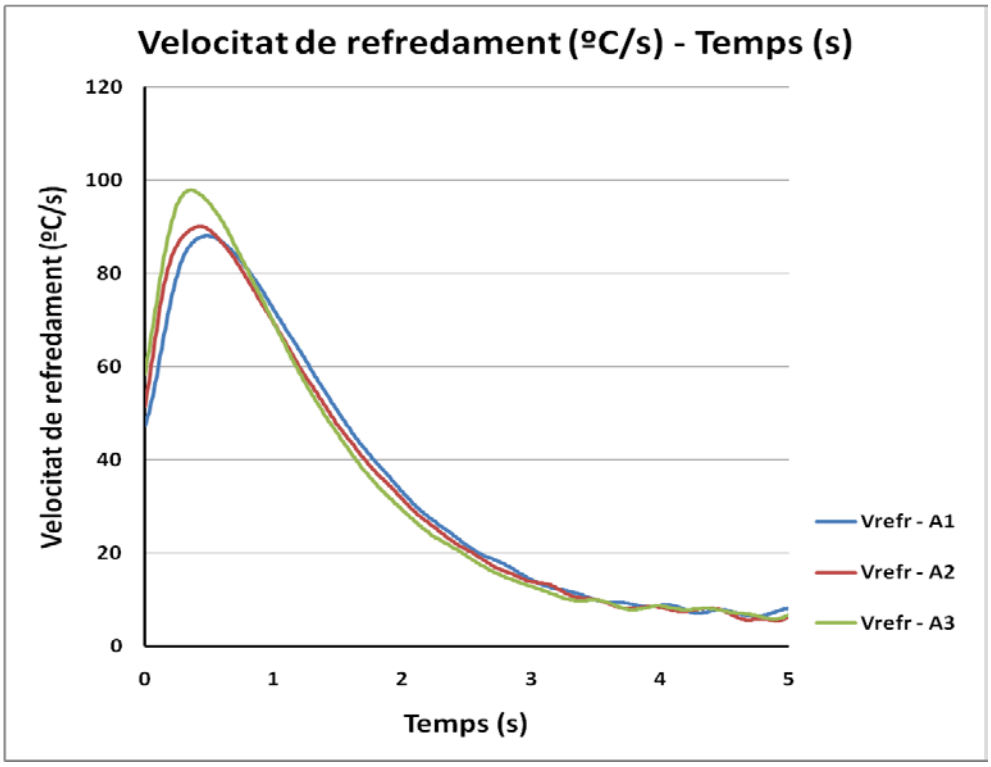


Gràfic 4. 16 Evolució de la velocitat de refredament en funció del temps per als tres assaigs realitzats a una pressió de contacte de 2MPa i una temperatura d'entrada de 200ºC.

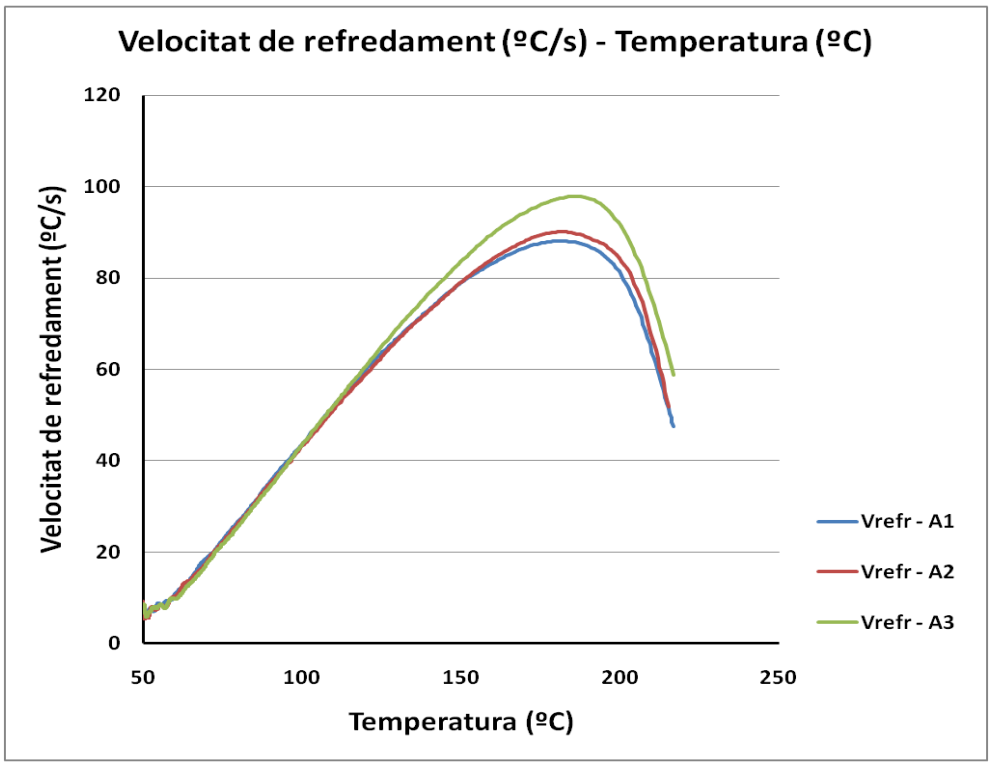


Gràfic 4. 17 Evolució de la velocitat de refredament en funció de la temperatura per als assaigs a 2MPa de pressió i 200ºC de temperatura d'entrada.

Assaigs a 15MPa i 200ºC de temperatura d'entrada



Gràfic 4. 18 Evolució de la velocitat de refredament en funció del temps per als assaigs a 15MPa de pressió i 200ºC de temperatura d'entrada.



Gràfic 4. 19 Evolució de la velocitat de refredament en funció de la temperatura per als assaigs a 15MPa de pressió i 200ºC de temperatura d'entrada.

Amb els gràfics dels assaigs del disseny d'experiment, que combinen les dues pressions de contacte de 2 i 15MPa amb les dues temperatures d'entrada de 200 i 600ºC s'han trobat les velocitat de refredament màximes dels diferents assaigs i s'ha n obtingut els resultats adjunts en la Taula 4. 3.

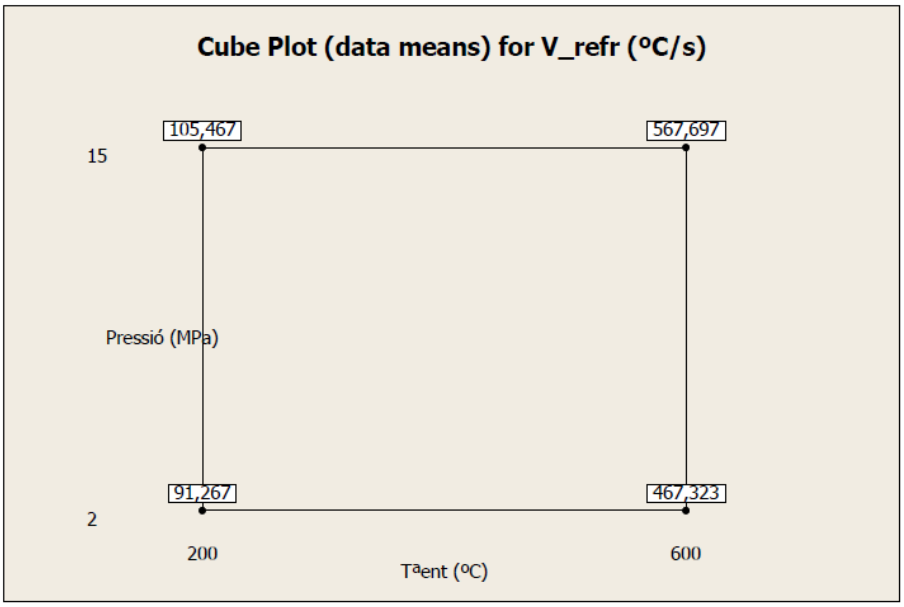
Tªent (ºC)	*Pressió (MPa)*	*V_refr (ºC/s)*
600	15	569,33
600	15	588,48
600	15	545,28
200	15	104,50
200	15	101,91
200	15	109,99
600	2	422,51
600	2	485,96
600	2	493,50
200	2	108,63
200	2	79,11
200	2	86,06

Taula 4. 3 Velocitats de refredament màximes obtingudes en les tres repeticions dels 4 assaigs del disseny d'experiment.

Tots aquests valors s'han utilitzat per a realitzar el disseny d'experiment en el software d'estadística Minitab [23].

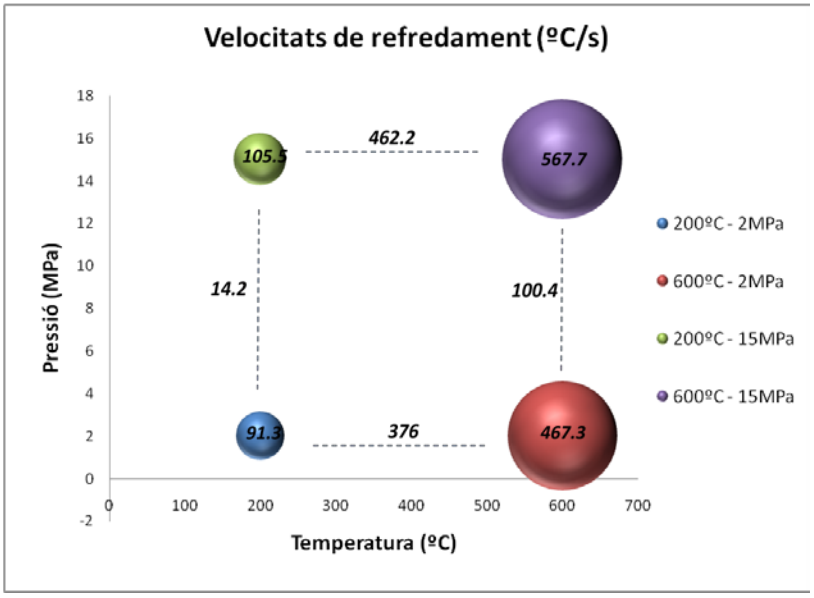
Resultats del disseny d'experiment

Els següents gràfics ajudaran a comprendre la influència de les variables estudiades sobre la velocitat de refredament en el procés.



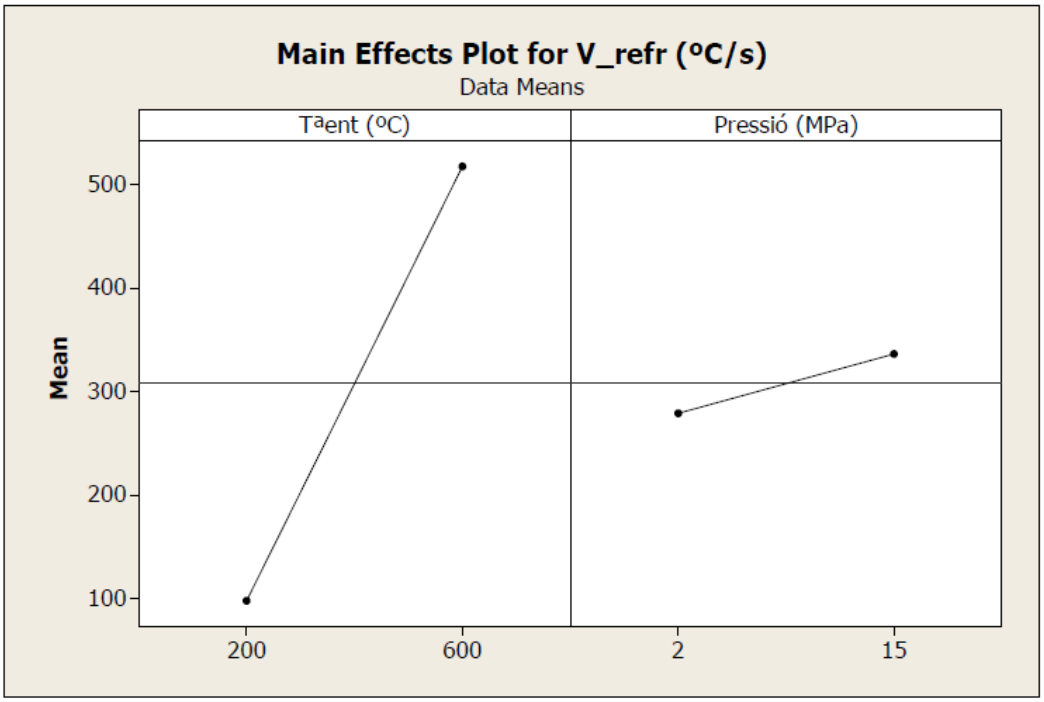
Gràfic 4. 20 Mitjana de les velocitats de refredament per cada combinació del disseny d'experiment.

El Gràfic 4. 20 dóna la informació de les velocitats de refredament obtingudes per cadascuna de les quatre combinacions del disseny d'experiment. Aquest gràfic es pot veure també amb els augments que representa el pas d'una combinació a una altra. Això ho observem en el Gràfic 4. 21.



Gràfic 4. 21 Gràfic de resultats de la matriu d'experiments.

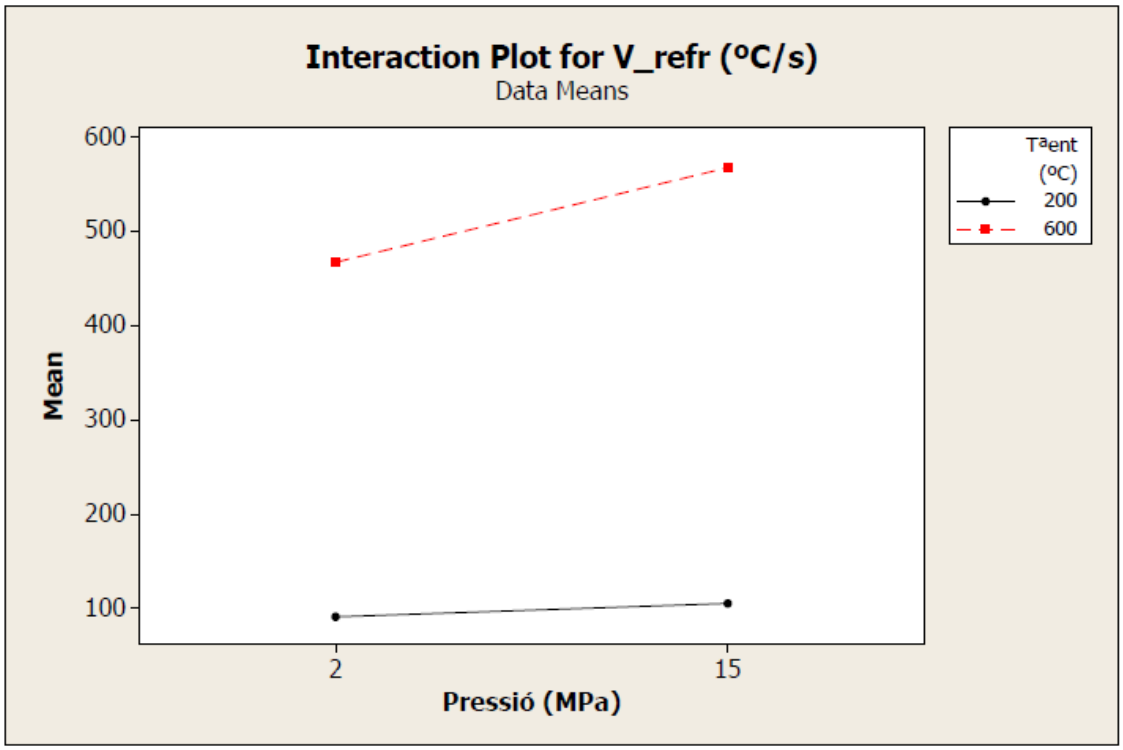
Per poder copsar quina de les variables té més incidència sobre la resposta o variable de sortida, en aquest cas, la velocitat de refredament, s'utilitzen gràfics com l'adjunt a continuació. Veure Gràfic 4. 22.



Gràfic 4. 22 Influència de les variables d'estudi sobre la resposta. En aquest cas, la velocitat de refredament.

S'observa en el Gràfic 4. 22 que la variable T^a_{ent} té major influència que la variable pressió de contacte sobre la velocitat de refredament. Aquesta és doncs, la conclusió a què ha portat aquest disseny d'experiment. Però, a què pot ser degut?

S'observa clarament en els gràfics que la variació de la pressió no té tanta influència com la variació de la temperatura. Veiem però, com interaccionen les dues variables, és a dir, en quin grau l'efecte d'un factor depèn de l'altre. Veure Gràfic 4. 23.



Gràfic 4. 23 Gràfic d'interacció entre les dues variables; pressió i temperatura d'entrada.

Es pot observar que variant la pressió de contacte de 2 a 15MPa, per temperatures d'entrada petites la velocitat de refredament varia molt poc. En canvi, per temperatures d'entrada elevades, la variació de la velocitat de refredament lleugerament més elevada.

Sembla ser doncs, que en un contacte tèrmic té molta influència el factor geomètric, és a dir, la zona de contacte real quan les superfícies s'observen de molt a prop. A temperatures altes, la facilitat que presenta el material en ser deformat, fa que les geometries, sempre rugoses, s'adaptin molt millor entre elles, de manera que hi ha molta més superfície real de contacte. Amb això es produeix molta més transferència de calor per conducció, que és la que millora i augmenta el flux de calor en un contacte tèrmic. En canvi, quan la temperatura d'entrada del format és menor, la facilitat del

material en deformar-se disminueix i, per tant, en el contacte la presència de transferència de calor per radiació augmenta i és, sens dubte, molt menys eficient.

4.4 Conclusions dels assaigs experimentals

El disseny, instal·lació i ajusts en l'equip experimental d'estampació plana en calent han permès, amb èxit, realitzar els assaigs previstos. Això no obstant, cal tenir present que s'han donat alguns errors. Alguns, inevitables, de mesura deguts a la naturalesa de l'ús dels instruments de mesura; altres deguts a errors de l'experimentalista però, no obstant, s'han pogut detectar les tendències de forma bastant precisa i fins i tot s'han obtingut resultats amb un grau de precisió considerable.

Gràcies als assaigs experimentals per a les diferents pressions de contacte s'han aconseguit les corbes de l'evolució de la temperatura dels diferents punts d'interès al llarg del procés que permetran, a posteriori, validar les simulacions numèriques per elements finits. I finalment, per enginyeria inversa, permetran trobar uns valors aproximats de conductància tèrmica de contacte per algunes condicions de pressió i temperatura.

S'han detectat fins i tot els canvis de fase en l'estructura i això permetrà introduir a les simulacions numèriques el calor latent de canvi de fase i verificar-lo amb els assaigs experimentals.

També importantíssim ha estat poder copsar i quantificar els efectes en la qualitat del contacte produïts per un mal ajust de les matrius que es dona freqüentment en la industria de l'automoció. Especialment, quan les geometries són complicades. S'han aconseguit diferents corbes de velocitat de refredament en funció del temps i la temperatura per a diferents casos d'offset en el contacte. Aquests assaigs han estat l'inici d'un estudi que avarca molt més que el què s'ha estudiat, per això, es preveu continuar estudiant la influència d'aquest efecte en treballs futurs.

Finalment, s'ha realitzat un disseny d'experiments que ha permès quantificar la influència que tenen les variables de procés de pressió i temperatura en la velocitat de refredament de la xapa i, per tant, en la qualitat del contacte. Els resultats determinen que la temperatura és la variable que més efecte té en la qualitat del contacte. La pressió també té influència, però no tanta.

Sembla ser però, que la variable temperatura influeix indirectament en un altre factor que, encara que no ha estat objecte d'estudi en aquest treball, també influeix en la qualitat del contacte. Aquest és la rugositat, de la qual depèn la quantitat de superfície real que es troba en contacte. La temperatura hi influeix indirectament perquè les altes temperatures faciliten la deformació del material i, per tant, a altes temperatures, amb una mica de pressió n'hi ha prou per a que la rugositat d'una superfície s'adapti a l'altra.

Caldria realitzar un estudi de l'efecte que tenen els diferents fenòmens de transferència de calor en un contacte tèrmic, però és clar que el fenomen clarament dominant és la transferència de calor per conducció en front del fenomen de radiació i més encara al de convecció. Aquesta pot ser la clau de la gran afectació de la temperatura en la qualitat del contacte ja que, com més superfície de contacte deguda a la deformació a altes temperatures, més transferència de calor per conducció es dona. Si aquest fenomen és el que predomina i l'augment de la superfície de contacte és degut a la temperatura i no a la pressió, podríem concloure que aquest és el motiu pel qual la temperatura té una major afectació que la pressió en la qualitat d'un contacte tèrmic i, per tant en la velocitat de refredament i la conductància tèrmica de contacte.

Ha estat de gran interès poder realitzar tots aquests assaigs experimentals ja que se n'ha extret un munt d'informació. A més a més, serviran d'eina de validació per un cas en el que, tan sols per la via experimental, es poden assolir els objectius. És el cas de l'obtenció dels paràmetres termomecànics necessaris per modelitzar i simular el procés d'estampació de xapa d'acers d'alta resistència mecànica.

5 Simulació numèrica pel mètode dels elements finits

5.1 Introducció als elements finits

Abans de presentar la modelització i simulació del procés experimental d'estampació plana en calent de xapa s'ha cregut convenient fer una breu introducció a la simulació numèrica pel mètode dels elements finits.

El mètode dels elements finits va començar es va començar a utilitzar durant la dècada dels anys setanta. Aleshores s'utilitzava només per a realitzar càlculs estructurals, els models eren simples i les condicions de càrrega que es podien aplicar eren molt limitades. Al llarg del anys, degut als avenços en els coneixements i a l'evolució tecnològica pel que fa als ordinadors, el mètode s'ha anat utilitzant en diferents aplicacions i camps. Algunes d'aquestes aplicacions han estat: els anàlisis dinàmics, de transferència de calor, de fluids, d'electromagnetisme, vibracions, acústica, etc. A més a més s'ha millorat molt la precisió dels resultats dels diferents anàlisis.

El mètode dels elements finits consisteix en estudiar la peça com un conjunt d'elements o "trossets" connectats entre si, anomenats elements finits, als quals se'ls aplica les equacions d'interès depenent del tipus l'anàlisi que s'estigui realitzant, de manera que s'obté un conjunt d'equacions algebraiques simultànies. Aleshores, sobre tot el conjunt, l'ordinador és el que s'encarrega de realitzar les diferents iteracions que permeten calcular la solució de totes aquestes equacions simultànies.

Pel que fa al numero de particions necessàries per a obtenir un resultat acurat de l'anàlisi no hi ha cap llei establerta, però a continuació es presenta un exemple simbòlic sobre el tema. En l'antiguitat, els grecs utilitzaven polígons per aproximar la circumferència d'un cercle. Es podria considerar que cada costat del polígon era un element finit. D'aquesta manera, com més constats tenia el polígon, més s'aproximava a la solució real. De manera similar, quants més elements finits té un model, més s'aproxima la solució a la realitat. No obstant això, la utilització de més elements finits suposa un increment del cost computacional, de manera que s'ha de buscar l'equilibri entre el nombre d'elements i el cost computacional que això suposa.

El camp de l'aplicació de la simulació numèrica per elements finits és molt ampli, es pot utilitzar ja sigui per a les grans estructures com per petits implants biomèdics. És per això que actualment la majoria de les industries competitives disposen de softwares de simulació numèrica per elements finits per realitzar càlculs sobre el

comportament dels seus productes o components, així com estudiar i/o corregir possibles problemes de desgast, ruptures, etc.

Una de les aplicacions més importants d'aquest mètode de càlcul, és troba en la etapa de disseny d'un producte o procés. Permet realitzar anàlisis i càlculs sobre un element de manera virtual i, d'aquesta manera estalvia la construcció i assaigs ens prototips que potser no serviran i evita el tant costós mètode de disseny anomenat de prova i error. L'aplicació d'aquest mètode estalvia mols diners a la industria.

Així doncs, la utilització d'aquest mètode dels elements finits es presenta com una eina de càlcul molt valuosa, tant per al disseny com per a l'avaluació d'equips o components en funcionament. Aquesta eina permet estudiar i representar tot tipus de geometria, fins i tot les més complicades i, a més a més, en l'actualitat permet aplicar tot tipus de càrregues o condicions de contorn i tot tipus de propietats dels materials. Permet modelitzar comportaments elàstics, plàstics, hiperelàstics, creep, materials compostos, etc. A més a més contemplar tot tipus de contacte entre les peces, mecànic, tèrmic, termomecànic, etc.

Per això, aquest mètode de càlcul es presenta com un gran candidat per a modelitzar i simular aquest procés. El software de simulació numèrica pel mètode dels elements finits utilitzat ha estat l'ABAQUS-69EF2 [24].

5.2 Geometries 3D i model geomètric

Per a la modelització del procés experimental d'estampació plana en calent de xapa s'han utilitzat les tres peces principals: el *format de xapa* , la *matriu superior* i la *matriu inferior*.

La xapa té un espessor d' aproximadament 1.9mm i una superfície de 90x150mm^2. A continuació s'adjunta una imatge del format de xapa (Figura 5. 1).

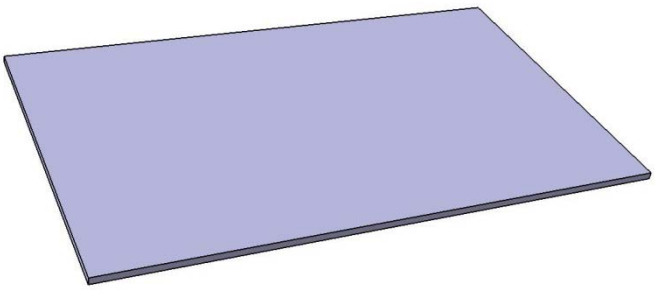


Figura 5. 1 Geometria 3D del format de xapa de 90x150x1.9.

Un altre dels elements utilitzats per a la modelització del procés experimental ha estat la matriu superior de la qual se n'adjunten algunes vistes en tres dimensions a continuació (Figura 5. 2 i Figura 5. 3).

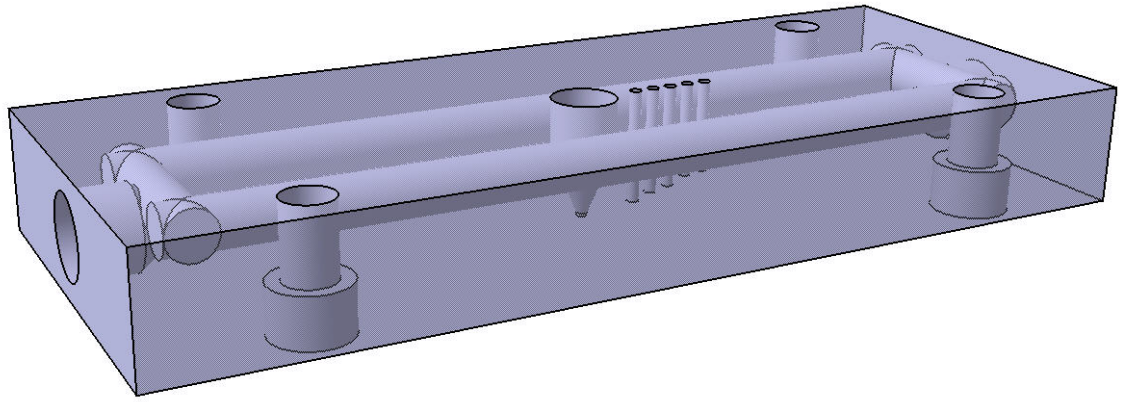


Figura 5. 2 Vista en perspectiva 3D i amb transparència en les cares frontals.

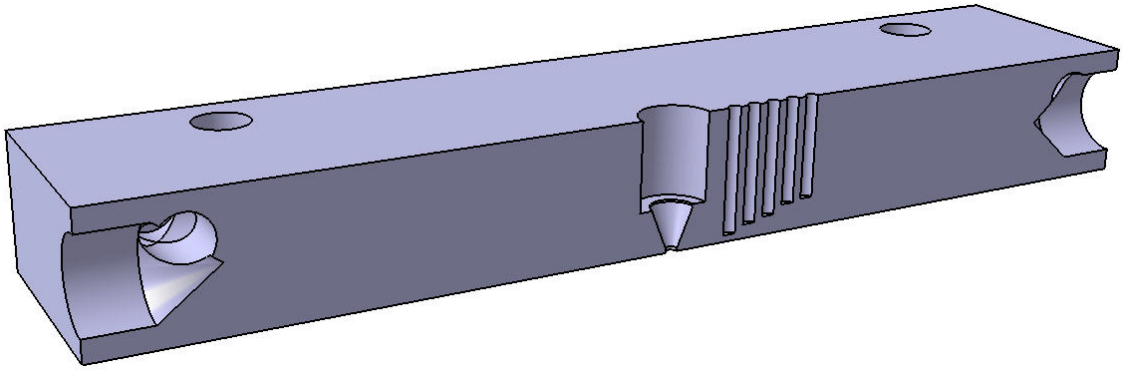


Figura 5. 3 Partició central de la matriu superior.

S'observen en la Figura 5. 3 els forats cecs que permeten l'accés dels termoparells a les diferents alçades de la matriu superior i el forat passant que permet l'accés del termoparell que mesurarà la temperatura de la xapa.

Finalment, s'ha utilitzat també la matriu inferior per completar el model geomètric que permetrà simular el procés experimental amb una bona precisió. En les figures adjuntes a continuació s'observen algunes vistes en tres dimensions de la matriu inferior. La Figura 5. 4 correspon a la vista en perspectiva de la matriu superior amb

les cares frontals en transparència i la Figura 5. 5 és un tall per la zona central de l'eina per tal de veure amb facilitat els forats que permeten l'accés dels termoparells en l'equip experimental.

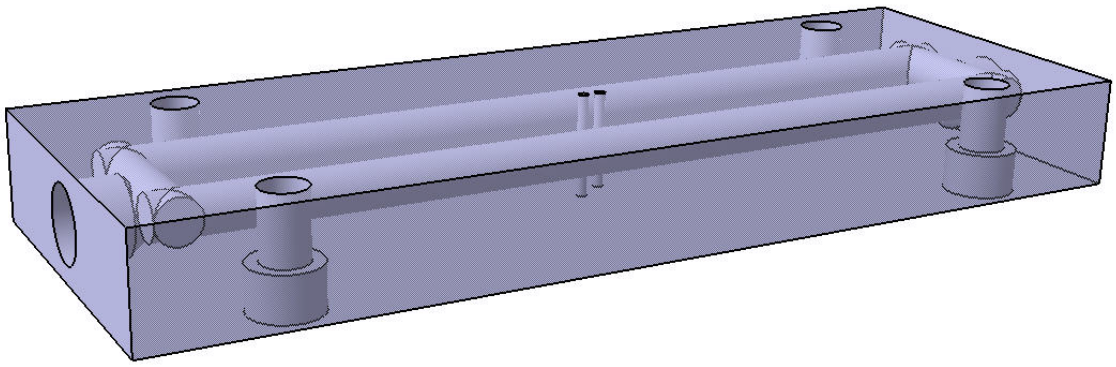


Figura 5. 4 Vista en perspectiva 3D i amb transparència en les cares frontals.

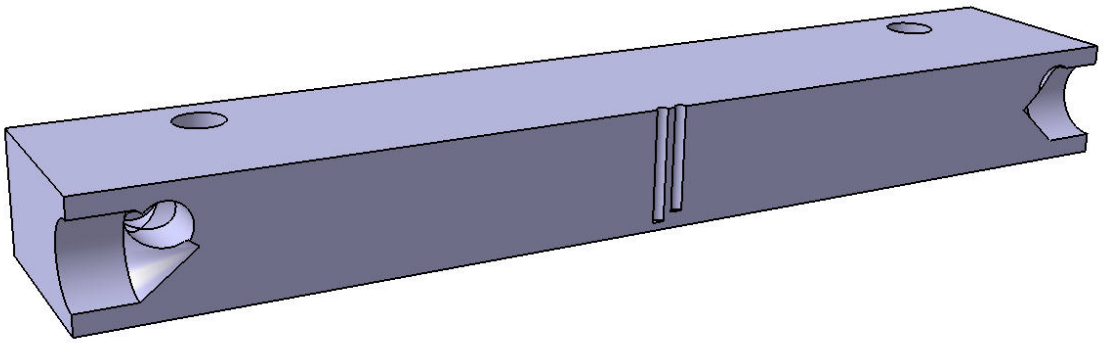


Figura 5. 5 Partició central de la matriu inferior

5.3 Propietats dels materials

Per a una bona modelització de qualsevol anàlisi és fonamental la descripció i definició de les propietats dels materials. En aquest model són dos els materials que s'han utilitzat. Per a les matrius d'estampació en calent s'ha utilitzat un acer d'alta conductivitat tèrmica produït per Rovalma, S.A. de la sèrie HTCS. Per al format de xapa d'acer s'ha utilitzar el conegut acer en la industria de l'estampació en calent de xapa anomenat USIBOR 1500P [3], [7], [6], [26] .

A continuació es descriuran les propietats utilitzades per als dos materials, l'USIBOR 1500P i l'HTCS.

Usibor 1500P

En la següent taula (Taula 5. 1) hi ha la definició de les propietats tèrmiques que s'han usat per modelitzar el procés.

Conductivitat tèrmica f(T)		***Calor latent de canvi de fase***			***Calor esfecífic - f(T)***	
W/m/ºC	**ºC**	**J/Kg**	**T-Líquid (ºC)**	**T-sòlid (ºC)**	**Cp (J/kg/ºC)**	**Temp (ºC)**
19	0	70000	360	390	433	0
19.5	50				456	50
20	100				475	100
20.5	150				494	150
21	200				512	200
21.3	225				521	225
21.5	250				529	250
21.8	275				536	275
22	300				543	300
22.3	325				545	325
22.5	350				547	350
22.8	375				539	375
23	399				530	399
23.1	401				535	401
24	500				545	500
25	600				560	600
26	700				576	700
27	800				591	800
28	900				606	900
29	1000				621	1000

Taula 5. 1 Descripció de les propietats tèrmiques de l'USIBOR 1500P.

El tipus d'anàlisi que es realitzarà serà un anàlisi de transferència de calor, la qual cosa vol dir que moltes de les propietats mecàniques més comunes en la definició de les propietats d'un material no seran necessàries. No obstant, es descriuran les propietats mecàniques bàsiques d'aquest acer per si, en algun cas en treballs futurs es volgués realitzar algun tipus de càlcul termomecànic. En aquest tipus de calculs si que és imprescindible definir les propietats tèrmiques i mecàniques i posar-les unes en funció de les altres.

A continuació, s'adjunta un taula amb algunes de les propietats mecàniques bàsiques com són la densitat, el coeficient d'expansió tèrmica, les propietats elàstiques en funció de la temperatura, les propietats plàstiques en funció de la temperatura, etc. En la Taula 5. 2 hi són detallades.

Densitat	*Elàstiques*			*Coef. d'expansió*	*Plàstiques*		
Kg/m3	M_Young (Pa)	M_Poisson	ºC	1/ºC	L.elàstic (Pa)	Def_plàstica	Temp (ºC)
7850	1,94E+11	0.28	0	1.2E-006	350000000	0	400
	1,92E+11	0.283	50		500000000	0.1	400
	1,90E+11	0.286	100		600000000	0.2	400
	1,87E+11	0.289	150		640000000	0.28	400
	1,84E+11	0.292	200		400000000	0	500
	1,82E+11	0.295	225		450000000	0.1	500
	1,80E+11	0.298	250		550000000	0.2	500
	1,78E+11	0.301	275		580000000	0.3	500
	1,76E+11	0.304	300		600000000	0.4	500
	1,74E+11	0.307	325		600000000	0.48	500
	1,72E+11	0.31	350		305000000	0	600
	1,70E+11	0.313	375		400000000	0.1	600
	1,68E+11	0.316	399		420000000	0.2	600
	1,72E+11	0.319	401		490000000	0.3	600
	1,58E+11	0.322	500		500000000	0.4	600
	1,43E+11	0.325	600		510000000	0.5	600
	1,29E+11	0.328	700		200000000	0	700
	1,15E+11	0.331	800		300000000	0.1	700
	1,02E+11	0.334	900		360000000	0.2	700
	9,10E+10	0.337	1000		390000000	0.3	700
					400000000	0.4	700
					400000000	0.5	700
					120000000	0	800
					220000000	0.1	800
					250000000	0.2	800
					280000000	0.3	800
					300000000	0.4	800
					310000000	0.48	800

Taula 5. 2 Descripció d'algunes de les propietats mecàniques més importants de l'USIBOR 1500P.

Acer d'eines d'alta conductivitat tèrmica HTCS

En la Taula 5. 3 hi ha descrites les propietats tèrmiques de l'acer d'eina utilitzat en l'equip experimental.

Conductivitat tèrmica f(T)		*Calor esfecífic - f(T)*	
W/m/ºC	ºC	Cp (J/kg/ºC)	Temp (ºC)
54	25	460	25
51	100	480	200
49	200	500	400
45	250		

Taula 5. 3 Propietats tèrmiques de l'acer d'eina d'alta conductivitat.

Per aquest cas s'han donat també les principals propietats mecàniques de l'acer d'eina d'alta conductivitat. Veure Taula 5. 4.

Densitat	*Elàstiques*		*Coef. d'expansió*		*Plàstiques*		
Kg/m3	**M_Young (Pa)**	**M_Poisson**	**1/ºC**	**Temp (ºC)**	**L.elàstic (Pa)**	**Def_plàstica**	**Temp (ºC)**
7950	1,96E+11	0.3	1.11E-005	100	600000000	0	450
			1.39E-005	300	700489000	0.000457139	450
			1.43E-005	500	750569000	0.000746515	450
			1.54E-005	700	800110000	0.00129689	450
			1.46E-005	800	850097000	0.0025203	450
			1.31E-005	1000	900096000	0.00665377	450
			1.42E-005	1200	932668000	0.0206318	450
					100000000	0	800
					105918000	0.00068	800
					124695000	0.00425132	800
					149914000	0.013312	800
					175317000	0.0302791	800
					200040000	0.0689498	800
					204045000	0.0930689	800
					100000000	0	900
					110075000	0.0115	900
					120086000	0.0480277	900
					125000000	0.0816296	900
					130079000	0.142388	900
					134231000	0.311426	900
					133686000	0.367248	900
					50000000	0	1000
					60179500	0.0108	1000
					65036500	0.0224159	1000
					70053700	0.0408444	1000
					80018700	0.119953	1000
					85110900	0.21864	1000
					86517000	0.380786	1000

Taula 5. 4 Principals propietats mecàniques de l'acer d'eina d'alta conductivitat.

5.4 Mallat i model d'elements finits

Una vegada determinats i assignats els materials a les 3 peces corresponents, s'ha muntat el conjunt del model 3D.

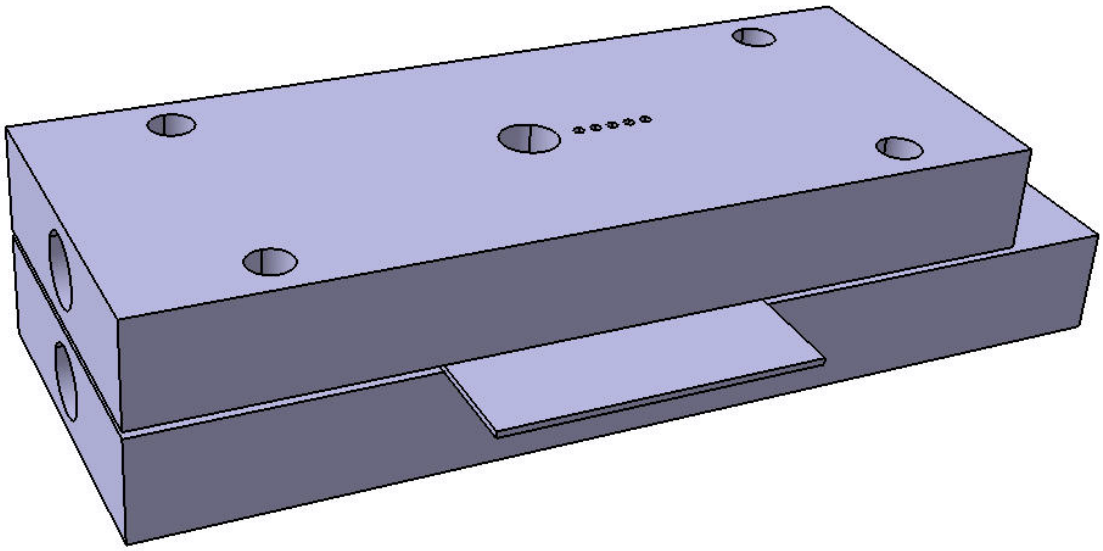


Figura 5. 6 Conjunt 3D de les peces que composen el model.

Per preparar la malla amb els elements finits, s'ha utilitzat un software especial per mallar i preparar models d'elements finits anomenat Hypermesh v10.0. El tipus d'element utilitzat per a les eines és el tetraedre lineal per transferència de calor anomenat DC3D4 (4 nodes). Per al mallat de la xapa s'han utilitzat elements de tipus hexaedre lineal per transferència de calor anomenat DC3D8 (8nodes). En la Figura 5. 7 s'observa la malla de la matriu superior i en la Figura 5. 8 s'observa un detall de la malla en la part interior.

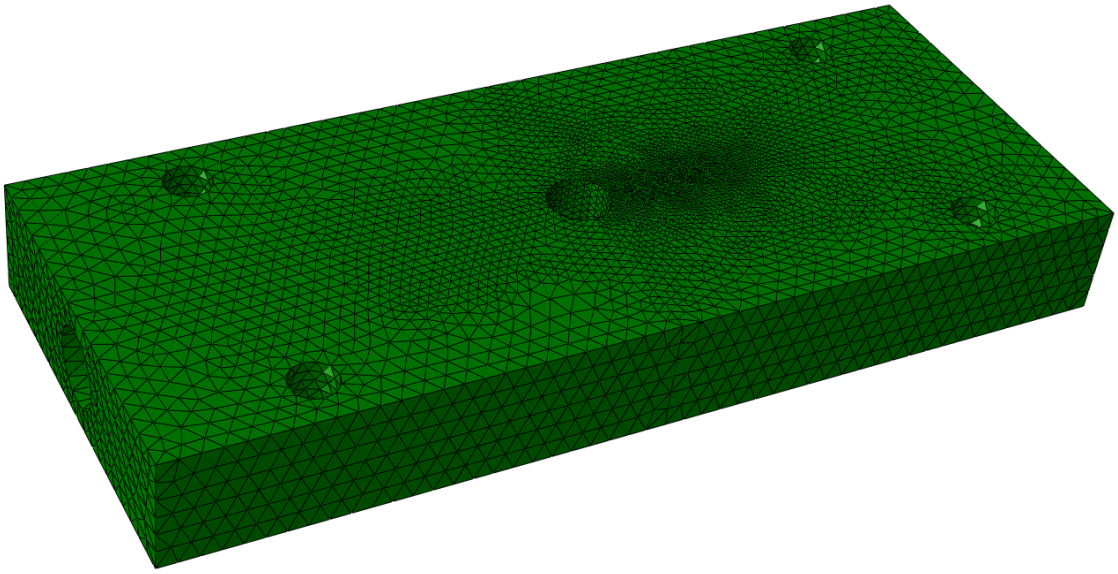


Figura 5. 7 Mallat 3D de la matriu superior.

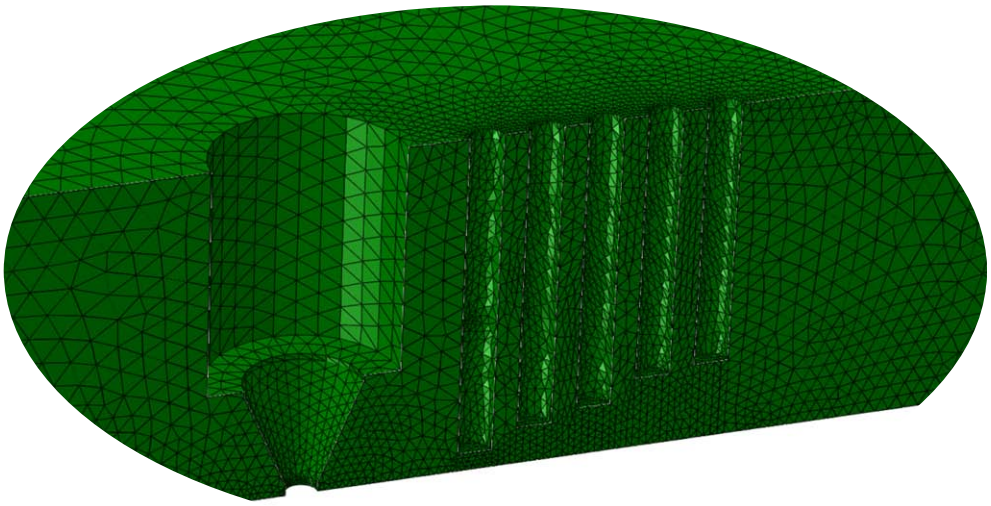


Figura 5. 8 Detall interior de la malla de la matriu superior.

S'ha procedit de la mateixa manera mallant la matriu inferior amb al mateix tipus d'elements 3D. A continuació de n'adjunta una imatge de la peça mallada (Figura 5. 9).

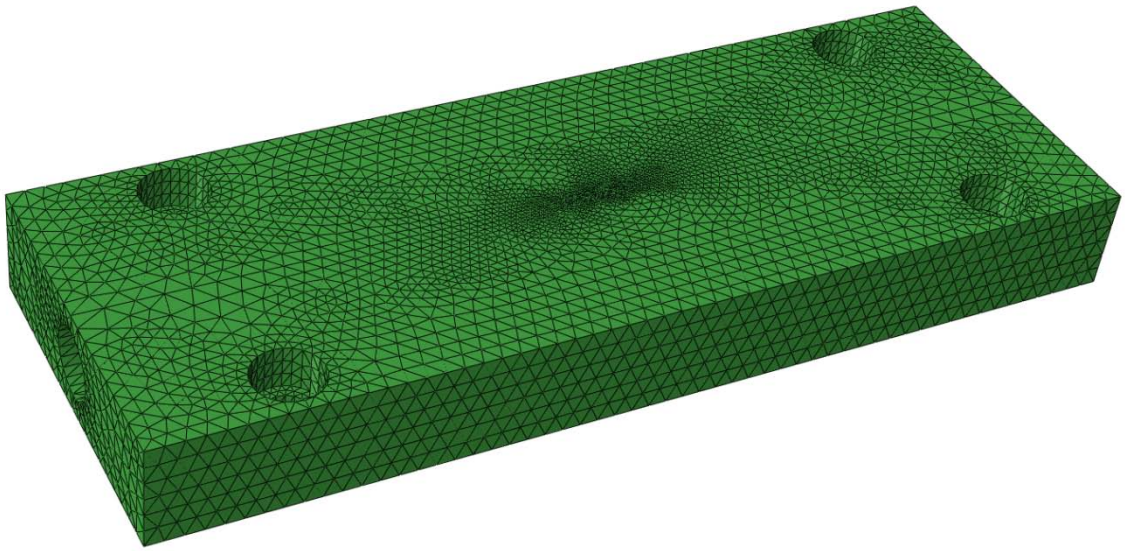


Figura 5. 9 Mallat 3D de la matriu inferior.

Per al mallat 3D del format de xapa s'han utilitzat elements hexaèdrics com es pot observar en la Figura 5. 10. Hi ha diferents elements en espessor per poder controlar els gradients tèrmics en la direcció del flux de calor, de la mateixa manera que s'ha fet per a les matrius en la zona d'interès de mesura, que correspon a la part central on es col·loquen els termoparells.

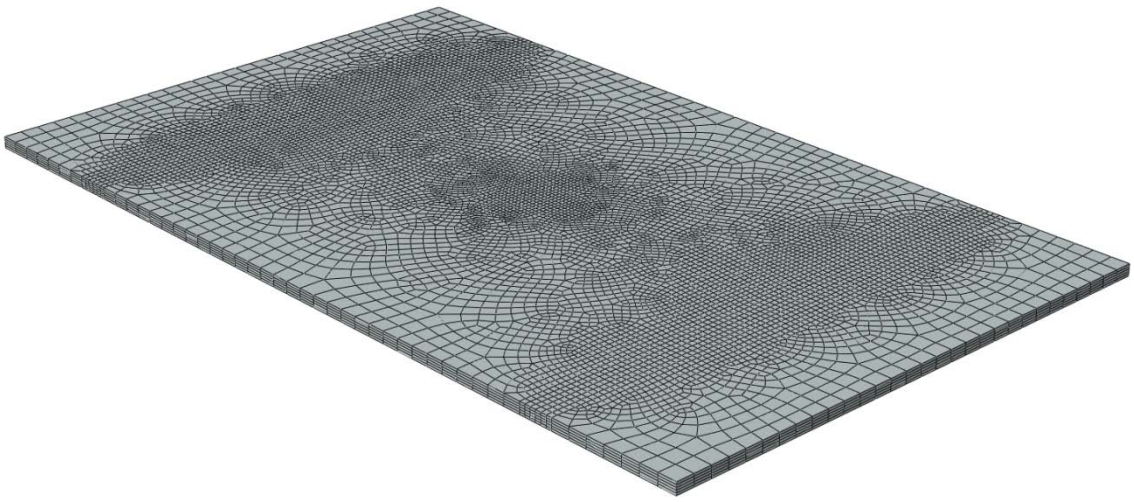


Figura 5. 10 Mallat 3D del format de xapa.

Les zones on la mida d'element superior és menor permeten controlar i calcular millor els gradients tèrmics en la direcció horitzontal de la peça. Aquestes xones d'interès són la zona central on es col·loquen els termoparells i les zones amb contacte amb la vora de les matrius.

Finalment, el model d'elements finits ha quedat tal com es pot observar en la Figura 5. 11, adjunta a continuació.

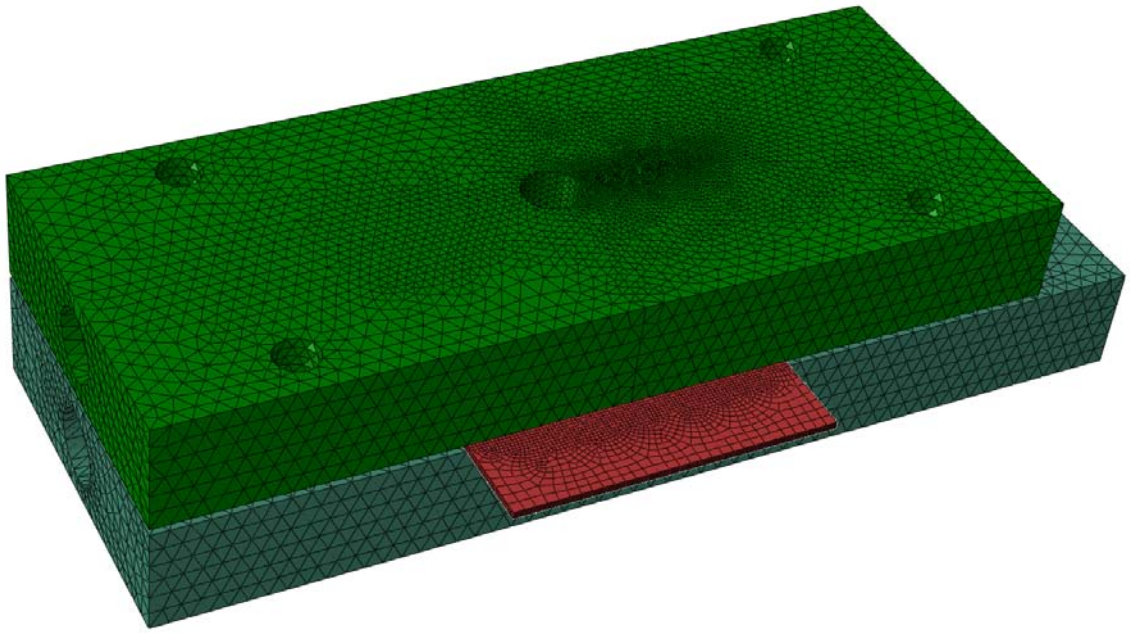


Figura 5. 11 Model d'elements finits 3D del conjunt experimental.

5.5 Condicions de contorn i de càrrega

Una vegada s'han importat les diferents peces, s'han definit i assignat les diferents propietats a les peces corresponents i s'ha definit el tipus d'anàlisi que es vol realitzar, en aquest cas un anàlisi de transferència de calor, s'han de definir les condicions de contorn i les càrregues del model. Aquest és un pas importantíssim per a l'obtenció d'uns resultats fiables.

Cal tenir estudiat a la perfecció el procés o component en funcionament que es vol modelitzar i simular per tal de saber definir amb èxit aquestes condicions inicials i de procés. És en aquest punt on es defineixen les condicions de contorn tèrmiques, les propietats de contacte de tot tipus, s'assignen les diferents propietats a les diferents superfícies, es defineixen condicions inicials de temperatura, de velocitat, etc.

Per a la modelització del conjunt experimental presentat fins ara, coneixent els fenòmens que es produeixen en el procés, s'han fixat les condicions de contorn que es presenten a continuació.

Primerament, cal tenir en compte que s'ha dividit el càlcul en dos etapes, la primera correspon al temps durant el qual la xapa està en contacte amb la matriu superior fins que la xapa, empesa per la matriu superior, arriba a contactar amb la matriu inferior i es produeix la pressió de contacte. La segona etapa, la de pressió s'ha allargat fins a 10 segons. La primera té una durada variable segons el temps que s'ha trigat experimentalment a empènyer la xapa fins a la matriu inferior. Aquests està entre 1.6 i 2 segons. Tot aquest procés s'ha simulat connectant i desconnectant contactes.

Les condicions de contorn que estan definides de principi a fi del càlcul són les següents: convecció en les cares laterals de les matrius superior i inferior amb un coeficient de convecció de 5W/m2/ºC tal com s'observa en la Figura 5. 12, convecció de la cara superior de la matriu superior i de la cara inferior de la matriu inferior amb un coeficient de 100W/m^2/ºC tal com s'observa en la Figura 5. 13.

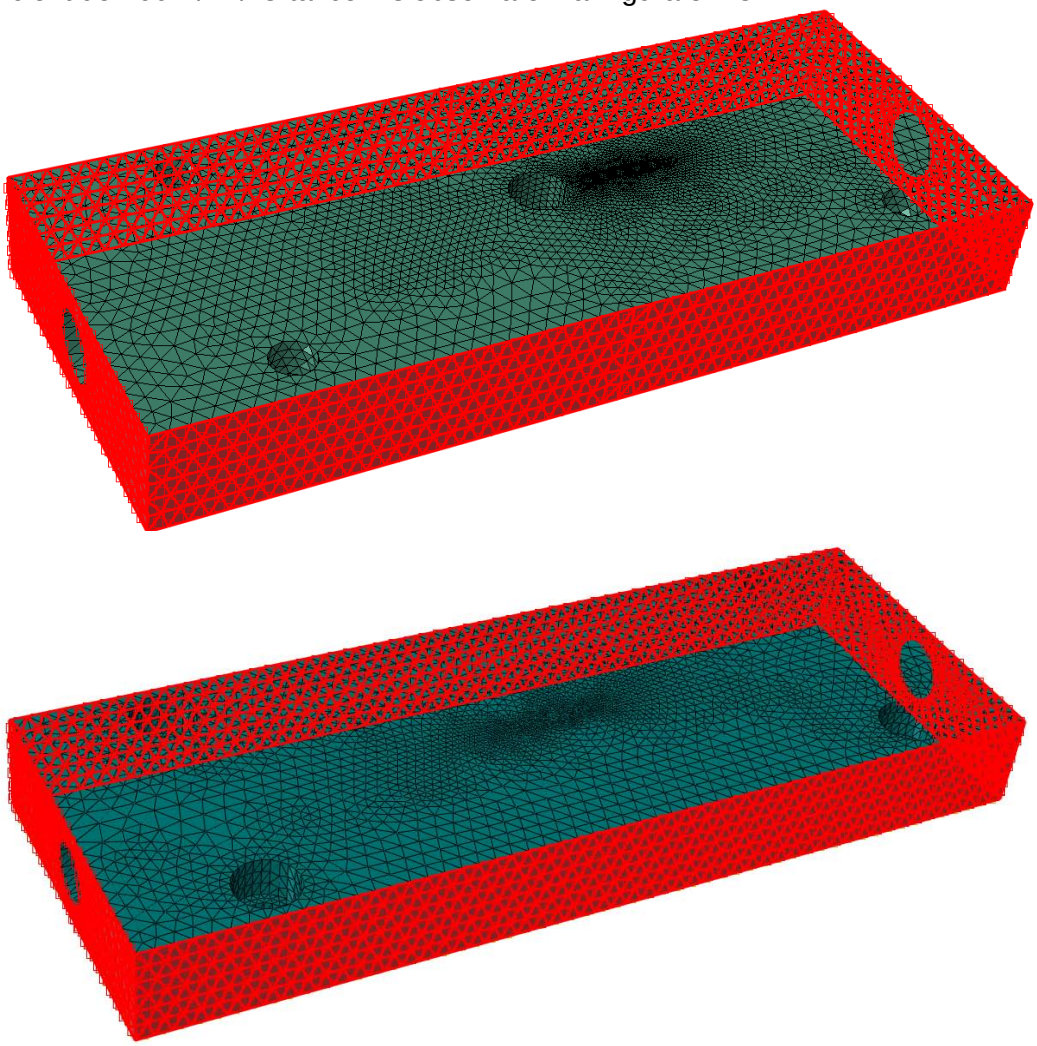


Figura 5. 12 Propietats de convecció a les cares laterals de les matrius.

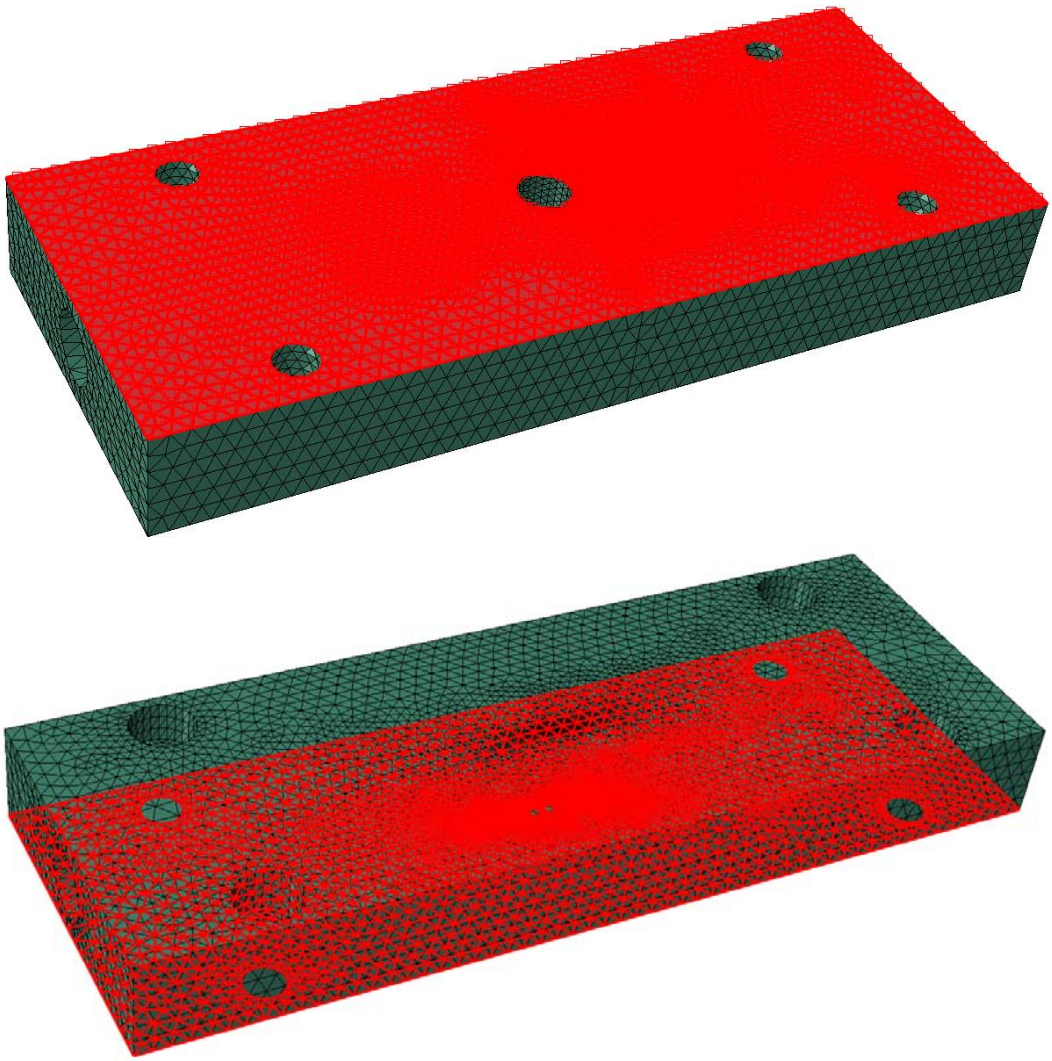


Figura 5. 13 Propietats de convecció a les cares externes de les matrius.

S'ha considerat una temperatura ambient de 25ºC. També per a la xapa s'han definit unes propietats de convecció i radiació per la zona externa, la que queda fora de les matrius, per tot el càlcul. En la Figura 5. 14 s'observa una imatge de les superfícies amb convecció i radiació definides. El coeficient de convecció és de 5W/m^2/ºC i la emissivitat de la xapa s'ha suposat de 0.7.

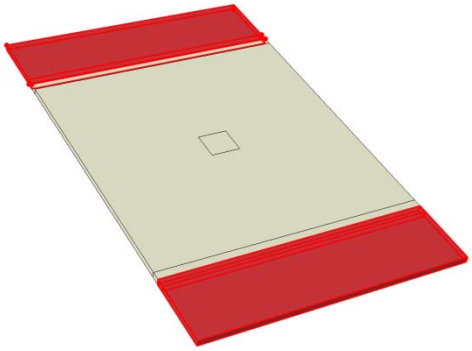


Figura 5. 14 Propietats de convecció i radiació en la xapa.

Durant la primera etapa existeix en la xapa un propietat de convecció i radiació per a la zona inferior ja que no hi ha contacte amb la matriu inferior. En la Figura 5. 15 podem observar la superfície a la què s'hi ha aplicat radiació i convecció amb els mateixos coeficients que per al cas anterior.

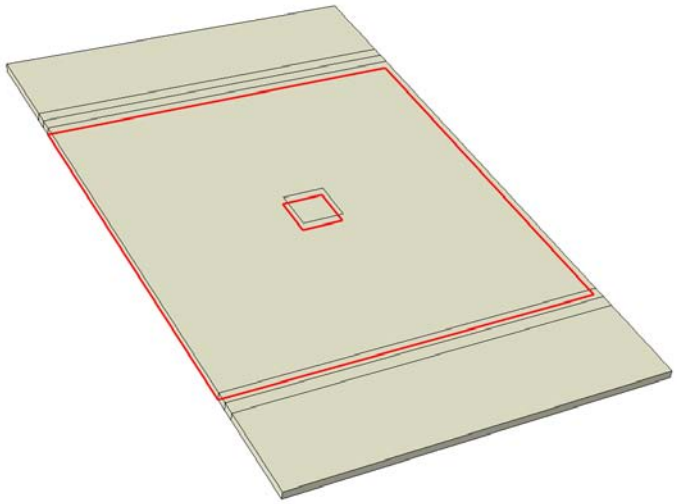


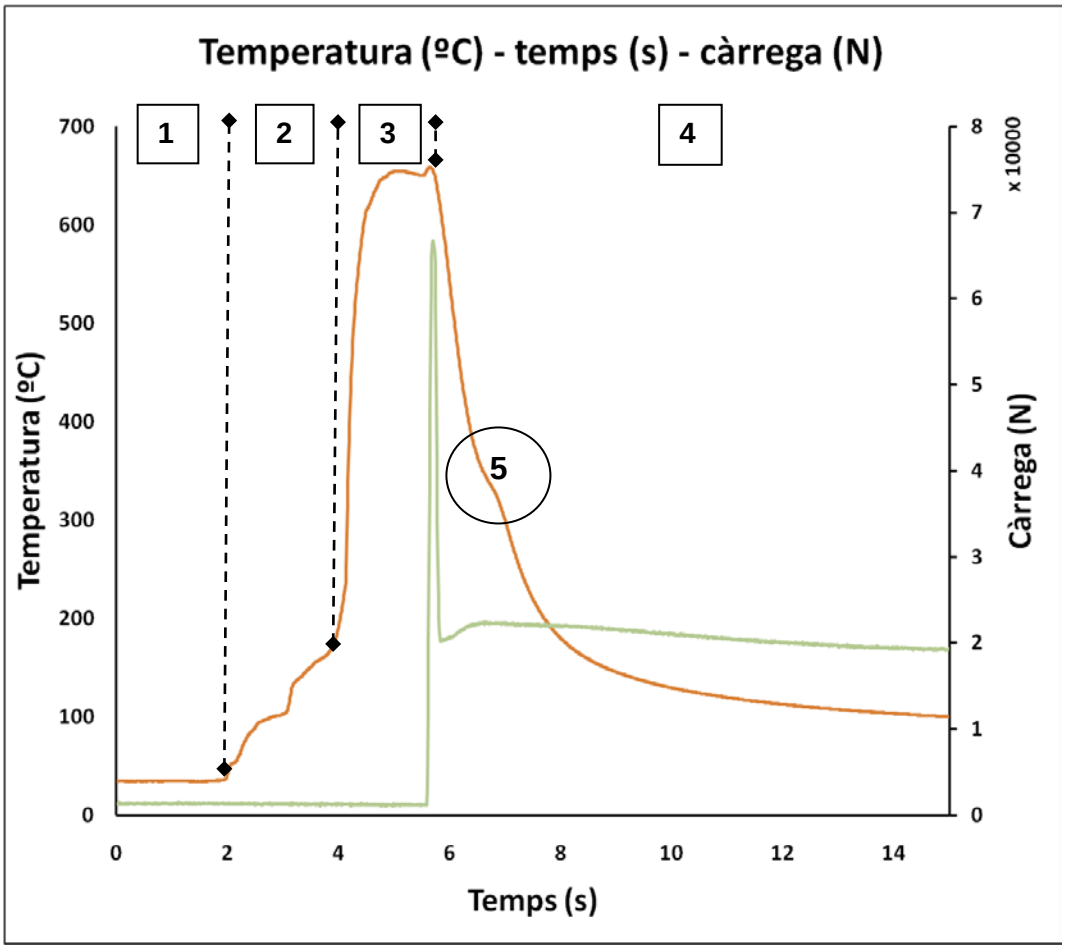
Figura 5. 15 Propietats de convecció i radiació en la xapa per a la primera etapa de càlcul.

En aquesta primera etapa, entre la xapa i la matriu superior s'ha assignat una propietat de contacte tèrmic amb una conductància de contacte constant de 100W/m^2/ºC. Aquesta però, es desactiva en el moment que comença la segona etapa on existeix una pressió elevada que depèn de l'assaig que s'estigués realitzant. Hi ha assaigs per a 2, 5, 8 i 15MPa.

Abans de comentar les propietats de contacte tèrmic de la segona etapa entre les eines i el format de xapa, cal esmentar com s'han definit les condicions inicials de temperatura.

A partir d'aquest moment, ja s'ha de tenir en compte quin dels assaigs experimentals s'estava realitzant, per quina pressió de contacte, quines eren les temperatures de les eines i la xapa, els temps de cada etapa de conformat, etc. Per això, cal analitzar els gràfics que s'han extret amb les respectives corbes d'evolució de la temperatura i càrrega en funció del temps. En aquest treball es realitzaran les modelitzacions i simulacions de només dues de les pressions assajades, les corresponents al disseny d'experiment, per 2 i 15MPa.

Veiem doncs un dels gràfics dels assaigs experimentals, Gràfic 5. 1.

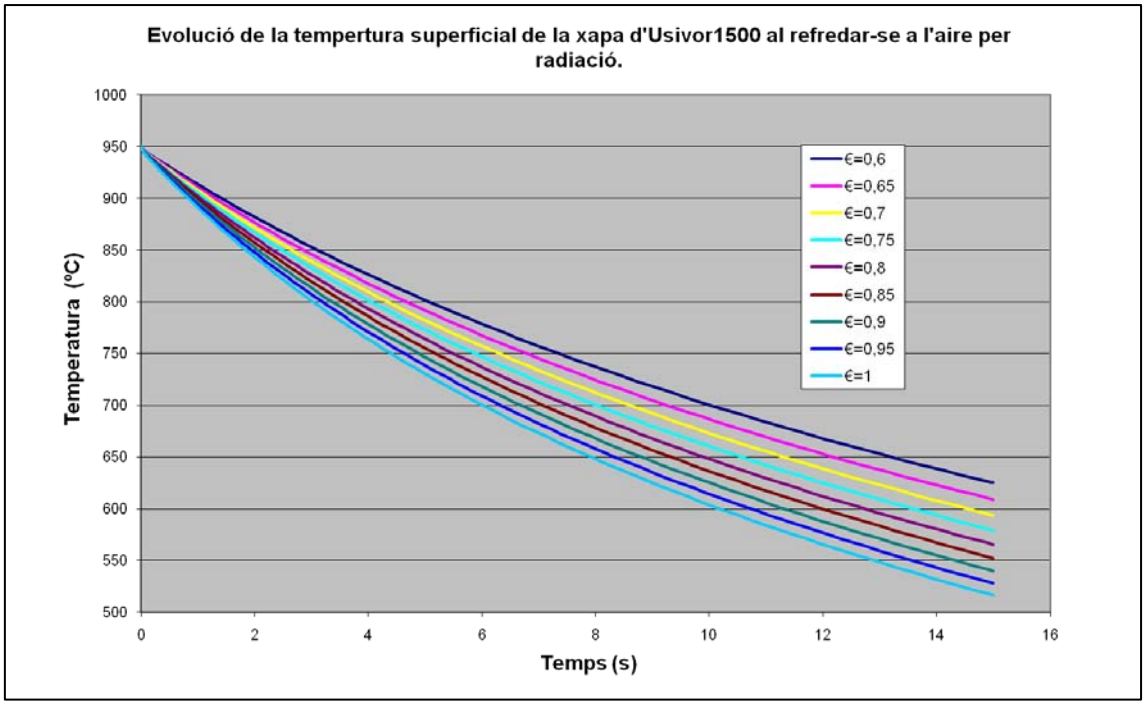


Gràfic 5. 1 Evolució de temperatura i càrrega en funció del temps.

Per una banda, la temperatura de les matrius és coneguda ja que hi han termoparells que la indiquen ja des de l'inici del càlcul. Però el cas de la xapa no és així, a temperatures altes l'error del termoparell és gran i això s'ha de tenir en compte, a més a més el termoparell T6 només indica la temperatura de la xapa a partir del contacte amb aquesta però no durant la col·locació. Per això, la temperatura exacte de la xapa al final de la segona etapa no és coneguda.

Com que si que és conegut el temps que ha trigat la xapa des del forn fins a la col·locació (entre 3 i 4 segons) s'han realitzat unes simulacions de refredament a l'aire per radiació d'una xapa d'USIBOR 1500 P. D'aquesta manera, es podrà conèixer la temperatura a la qual està la xapa a l'inici de l'etapa 3.

A continuació es presenta el gràfic obtingut de refredament per radiació d'un format de xapa d'acer Usibor1500 (veure Gràfic 5. 2). S'observa que entre els 3 i 4 segons i per una emissivitat aproximada de 0.7 la temperatura corresponent és de aproximadament 850ºC.



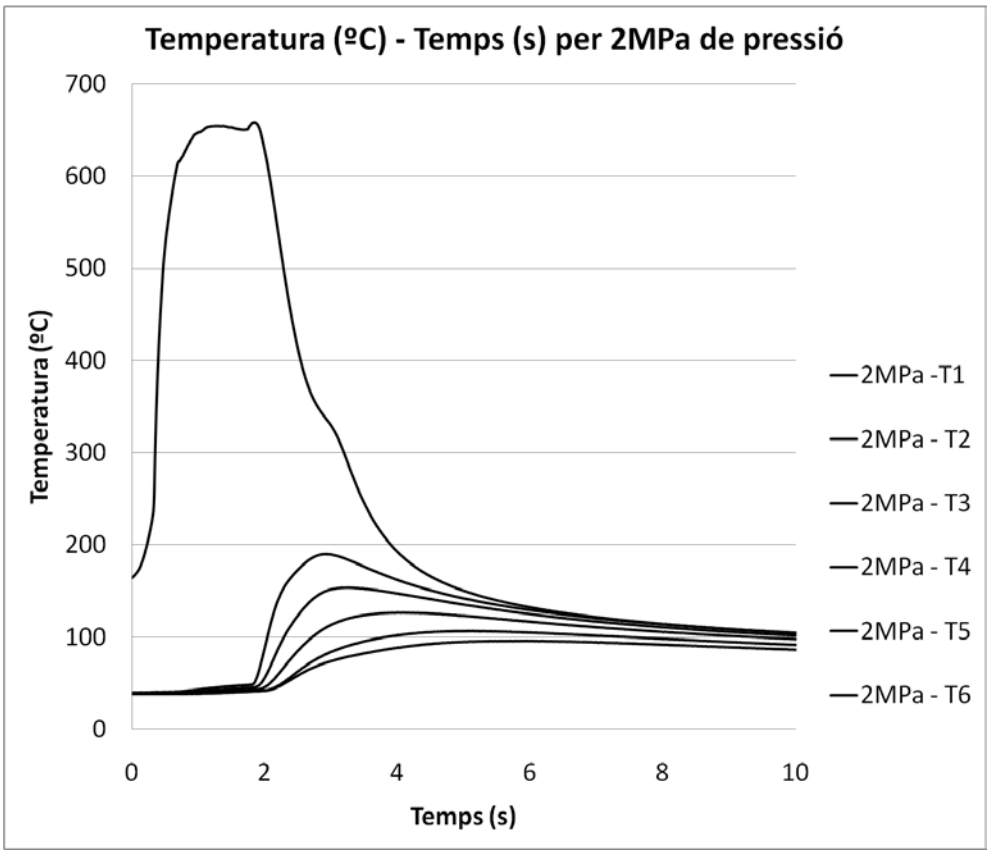
Gràfic 5. 2 Evolució de la temperatura superficial de la xapa amb un refredament a l'aire per radiació.

Finalment doncs, la temperatura inicial de les matrius s'ha considerat de 32ºC i la temperatura inicial de la xapa és de 850ºC.

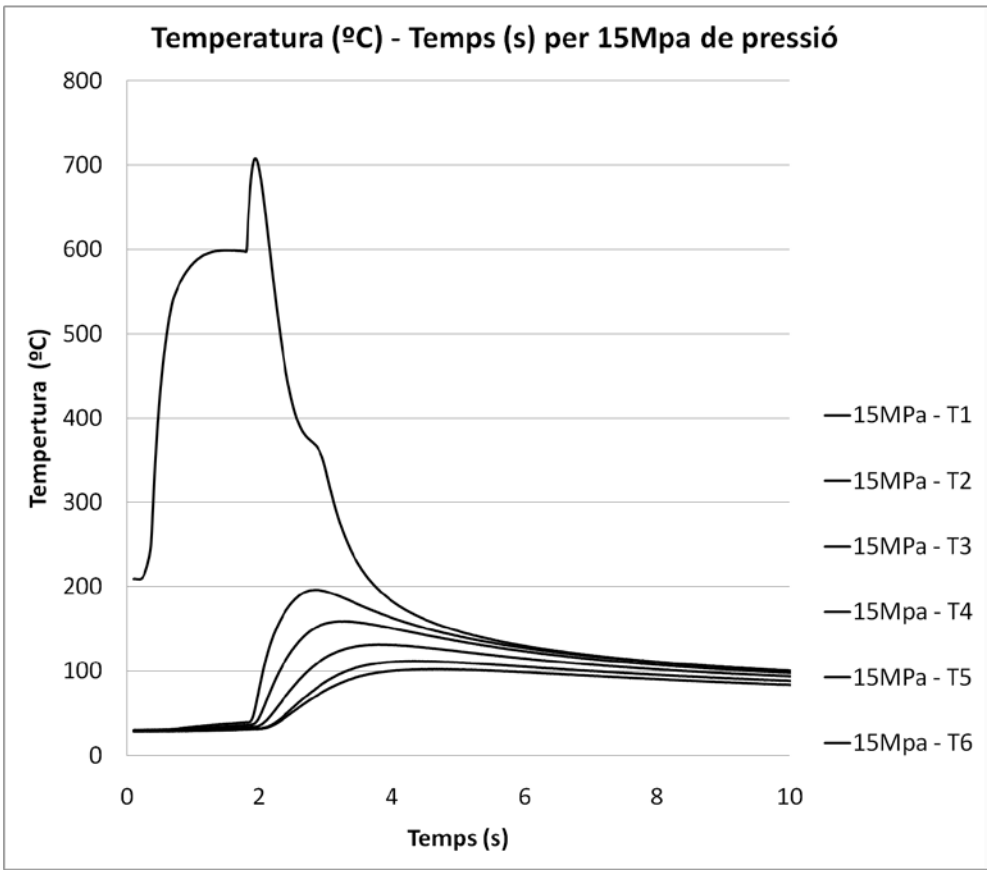
Fins aquí, s'han descrit totes les condicions de contorn i condicions inicials del model exceptuant el contacte tèrmic entre les eines i el format de xapa que s'ha d'aplicar a partir de la segona etapa del càlcul. En aquest s'ha de definir una conductància tèrmica de contacte que correspon al paràmetre que s'està buscant. Per això, s'iterarà amb diferents valors i aquests seran en funció de la temperatura.

L'objectiu és trobar el paràmetre de conductància tèrmica de contacte que farà que l'evolució de la temperatura en els punts corresponents a la col·locació dels termoparells s'ajusti amb les corbes obtingudes en els assaigs experimentals. S'ajustarà la simulació per dues pressions diferents, 2 i 15MPa, de les quals hi ha els gràfics experimentals a continuació (Gràfic 5. 3 i Gràfic 5. 4).

Les pressions escollides són les corresponents a les utilitzades en l'assaig d'experiment. L'objectiu en aquest punt és mostrar el que permet fer l'eina de simulació numèrica, per això, no s'han ajustat totes les pressions. En un treball futur es pretén analitzar a fons tots aquests aspectes que aquí s'han deixat de banda.



Gràfic 5. 3 Assaig experimental per a 2MPa de pressió.



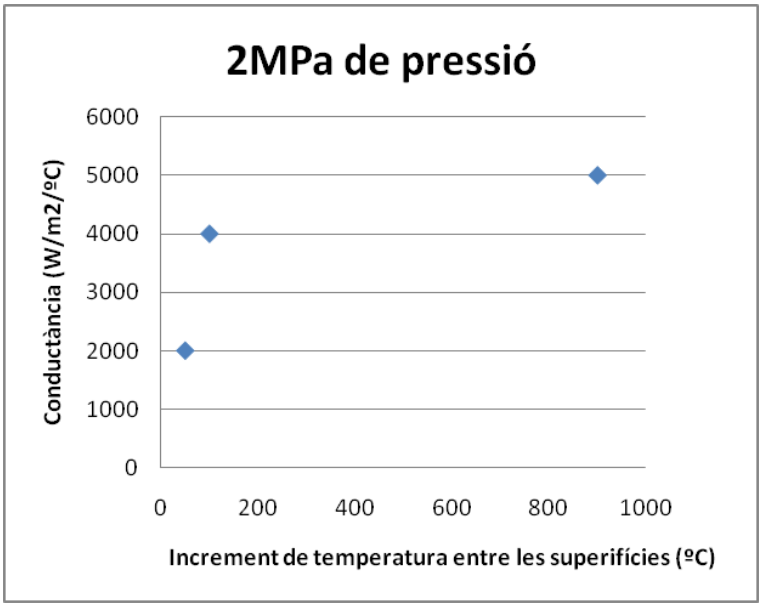
Gràfic 5. 4 Assaig experimental per a 15MPa de pressió.

5.5 Resultats i conclusions

S'han realitzat diferents simulacions amb iteracions dels valors de conductància tèrmica de contacte. En cada cas, l'objectiu era validar les corbes obtingudes per simulació numèrica amb les corbes experimentals. S'han ajustat els valors de conductància tèrmica en funció de la temperatura per a les pressions de 2 i 15MPa. Els resultats obtinguts es descriuen a continuació.

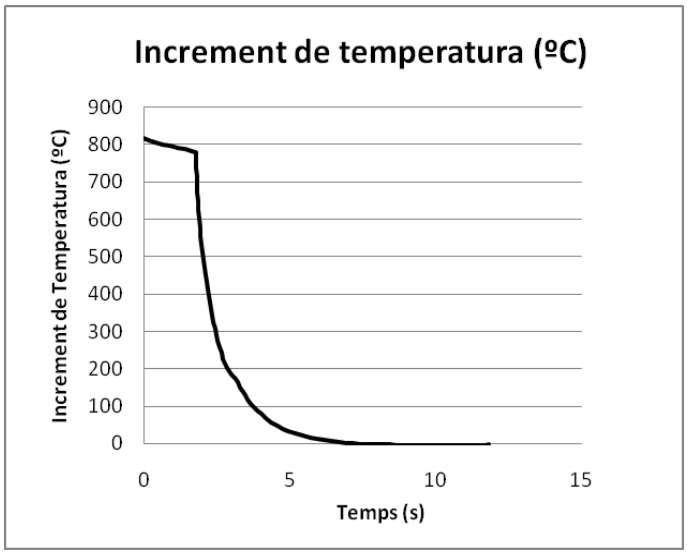
2MPa de pressió de contacte

Després de realitzar varies iteracions amb els valors del paràmetre de conductància, s'ha vist que els valors en funció de la temperatura que millor ajusten la simulació a les corbes experimentals són els que s'observen en el Gràfic 5. 5.



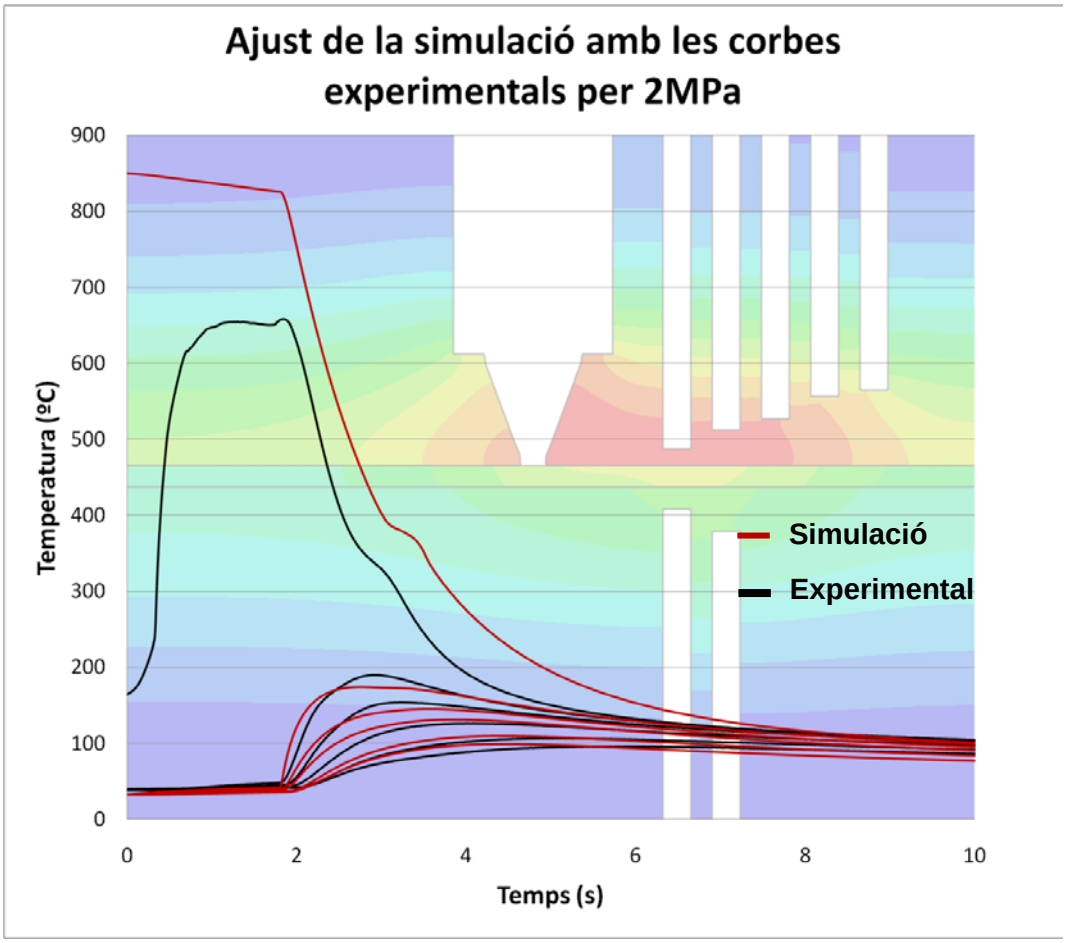
Gràfic 5. 5 Valors de conductància tèrmica de contacte en funció de la temperatura per a una pressió de 2MPa.

Cal tenir en compte que el programa aplica el valor de conductància tèrmica corresponent al valor de l'increment de temperatura que hi ha entre la superfície de la xapa i la de la matriu. Per, això, per conèixer quin valor de conductància s'aplica durant el càlcul s'ha de veure l'evolució de d'aquest increment de temperatura durant el càlcul (Gràfic 5. 6).



Gràfic 5. 6 Increment de temperatura entre la xapa i la matriu per a 2MPa.

Per a la simulació numèrica amb aquests valors s'han extret les corbes d'evolució de temperatura en els punts on experimentalment hi han col·locats els termoparells i s'ha obtingut el resultat adjunt en el Gràfic 5. 7.

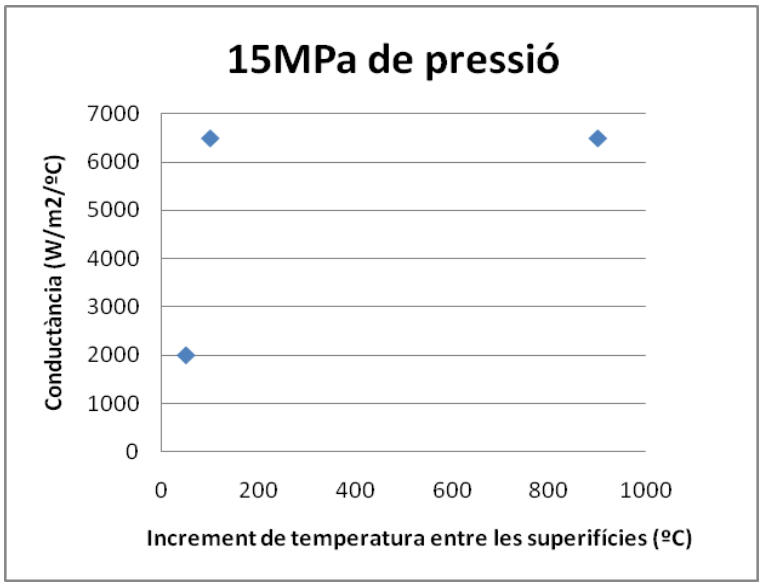


Gràfic 5. 7 Ajust de la simulació amb les corbes experimentals per a una pressió de contacte de 2MPa.

S'observa al final del primer tram que la temperatura de la xapa en la simulació queda molt per sobre de la experimental, això és degut a l'error de l'aparell de mesura. Ja s'ha vist que la temperatura de partida és d'uns 850ºC i s'observa que durant el temps d'empenta de la xapa cap a la matriu inferior, l'evolució de la temperatura en les diferents alçades de la matriu superior és la correcta, per tant, la modelització durant la primera etapa també ho és. Així doncs, s'entén que la temperatura real de la superfície de la xapa a l'inici de la segona etapa, la de pressió és de aproximadament 800-820ºC. A partir d'aquest punt, per a verificar que la simulació s'ajusta als assaigs experimentals, la corba de l'evolució de temperatura de la xapa hauria de seguir el mateix pendent que la de l'assaig experimental. Es pot observar que l'ajust és força bo, per això es donen per vàlids els valors de conductància tèrmica descrits en el Gràfic 5. 5.

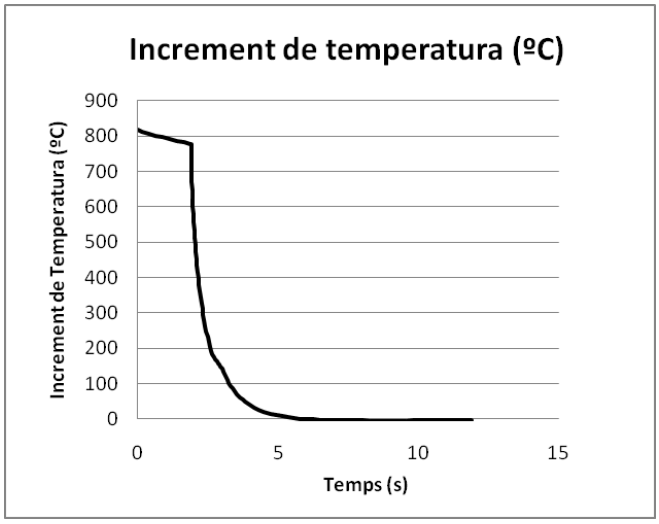
15MPa de pressió de contacte

Després de realitzar varies iteracions amb els valors del paràmetre de conductància, s'ha vist que els valors en funció de la temperatura que millor ajusten la simulació a les corbes experimentals són els adjunts en el Gràfic 5. 8.



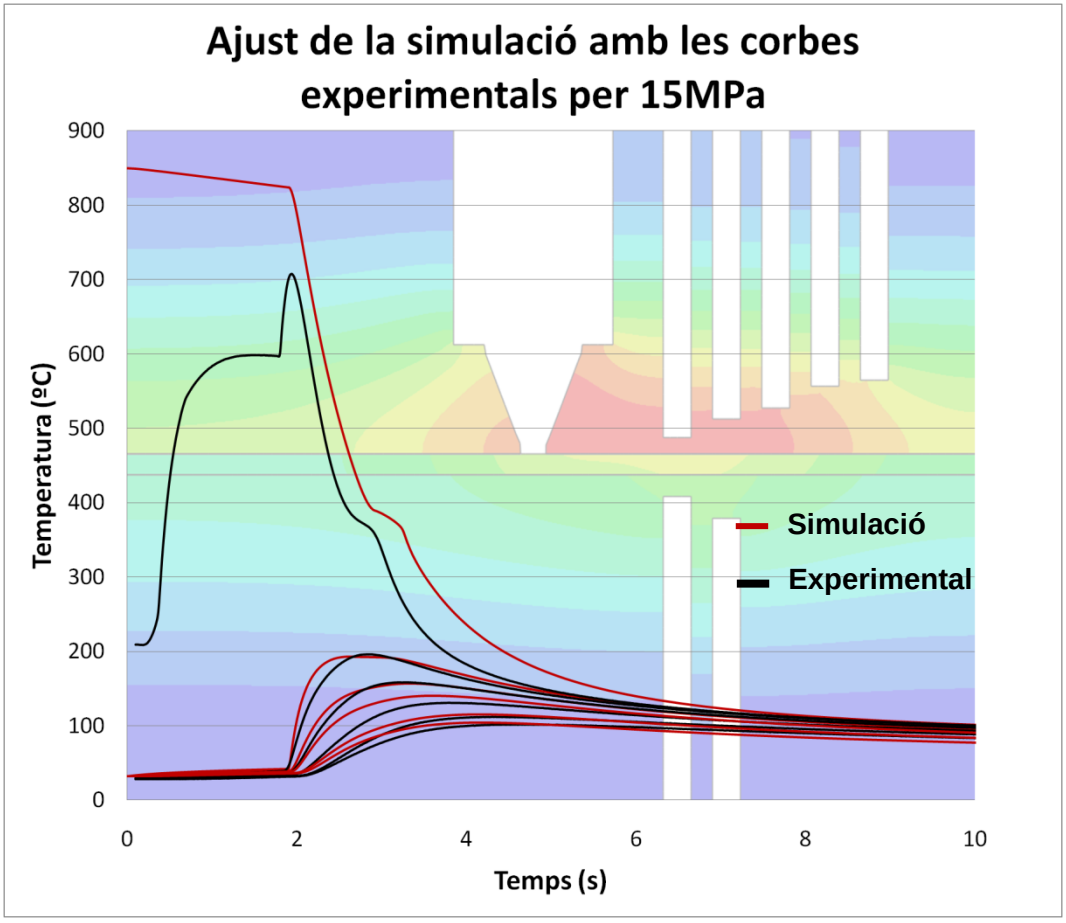
Gràfic 5. 8 Valors de conductància tèrmica de contacte en funció de la temperatura per a una pressió de 15MPa.

Cal tenir en compte que el programa aplica el valor de conductància tèrmica corresponent al valor de l'increment de temperatura que hi ha entre la superfície de la xapa i la de la matriu. Per, això, per conèixer quin valor de conductància s'aplica durant el càlcul s'ha de veure l'evolució de d'aquest increment de temperatura durant el càlcul (Gràfic 5. 9).



Gràfic 5. 9 Increment de temperatura entre la xapa i la matriu per a 15MPa.

Finalment, s'han extret les corbes d'evolució de la temperatura en la simulació dels punts on se situen experimentalment els termoparells per validar-les amb les experimentals. Observar Gràfic 5. 10.



Gràfic 5. 10 Ajust de la simulació amb les corbes experimentals per a una pressió de contacte de 15MPa.

Els objectius d'aquest punt eren mostrar la potència de la simulació numèrica pel mètode dels elements finits alhora de realitzar càlculs de transferència de calor i, per tant, per resoldre la obtenció dels paràmetres termomecànics necessaris per a la correcta modelització i simulació dels processos d'estampació en calent de xapa. A quedat demostrat que es un bon mètode.

No obstant, s'ha de continuar treballant en el tema per aconseguir programar una rutina que s'encarregui d'anar iterant els valors de conductància i verificant amb les corbes experimentals si el valor és bo o no ho és. Això ho hauria de fer per cada interval de temps definit i per la fita d'error definida. D'aquesta manera s'aconseguiria un mètode automàtic i molt precís.

Però és clar que primerament s'ha de treballar sobre els resultats experimentals ja que, si aquests no són bons i precisos, la utilitat d'aquests minva i deixen de ser una eina de verificació fiable. Per això s'hauria de replantejar el fet d'utilitzar termoparells, aquests sempre marcaran una temperatura que no serà la de la peça a mesurar degut a que existeix també una conductància tèrmica de contacte. Hi ha altres instruments de mesura com els piròmetres òptics que poden oferir un bon resultat de mesura i no tenen el problema de la conductància. És clar que també s'han de calibrar mol bé.

Finalment, s'ha pogut modelitzar bé el procés experimental i s'han obtingut uns resultats força bons, per això, es considera que aquesta primera aproximació al mètode ha estat tot un èxit.

6 Conclusions

A l'actualitat, la tecnologia de l'estampació en calent de xapa d'acer d'alta resistència mecànica es veu obligada a evolucionar dia a dia per satisfer els requeriments de la industria de l'automòbil. La gran conformabilitat i la reducció d'efectes com l'springback que es donen en la deformació a alta temperatura, juntament amb la possibilitat de controlar l'evolució microestructural durant el refredament, són les eines que la tecnologia de l'estampació en calent utilitza per aconseguir produir peces amb una important reducció de l'espessor mantenint el compliment dels requisits de resistència a l'impacte i de seguretat. D'aquesta manera, s'augmenta molt la relació propietats mecàniques – pes.

No obstant, comparat amb el conformat de xapa a temperatura ambient, la optimització del procés d'estampació en calent necessita un coneixement profund tant del comportament dels materials a alta temperatura com dels fenòmens de transferència de calor en el contacte dels diferents elements. A més a més, el disseny òptim dels útils i del procés requereix disposar d'unes eines de simulació numèrica on s'hi ha d'implementar un model acoblat termo – mecànic – metal·lúrgic i, per això, existeix la necessitat de determinar tots els paràmetres necessaris per a modelitzar i simular aquests processos.

En aquest projecte, una vegada realitzat l'estudi del conformat per estampació en calent de xapa i detectada la problemàtica existent alhora de simular de manera efectiva aquests processos, l'objectiu principal ha estat dissenyar i ajustar un equip experimental a fi de poder determinar els paràmetres necessaris per a la modelització.

El domini de la tècnica i el fenòmens que s'hi produeixen, així com la problemàtica existent i les possibles solucions a adoptar, han permès instal·lar i ajustar l'equip amb èxit. Aquest, s'ha sensoritzat per tal de poder obtenir corbes d'evolució de temperatura i de càrrega en funció del temps, la qual cosa ha permès determinar la influència de la pressió i la temperatura sobre la velocitat de refredament de la xapa i, per tant, sobre el paràmetre de conductància tèrmica de contacte. Tot i que el funcionament del muntatge ha estat satisfactori, cal destacar que els instruments de mesura escollits, termoparells en aquest cas, no donen una mesura exacta de la temperatura i per tant, s'han de contemplar els errors existents i intentar compensar-los per tal que les proves experimentals s'ajustin el màxim a la realitat. S'ha aconseguit realitza assaigs per a 2, 5, 8 i 15Mpa.

Malgrat no sigui un dels principals objectius del projecte, s'ha establert un mètode per obtenir els valors de conductància tèrmica de contacte utilitzant l'enginyeria inversa i un software de simulació numèrica per elements finits. Aquest mètode s'ha servit dels assaigs experimentals realitzats a diferents pressions com a eina de validació dels resultats obtinguts per simulació numèrica. D'aquesta manera, s'ha aconseguit una aproximació inicial força bona del mètode per a obtenir un dels paràmetres més importants per a la modelització i simulació d'aquests processos. A més a més, s'han aconseguit obtenir valors de conductància per a les pressions de 2 i 15MPa.

També s'han realitzat assaigs per quantificar l'efecte que tenen els mals ajusts en la fabricació dels utillatges dels equips per estampació en calent de xapa de la industria. S'ha vist que per a offsets en el contacte superiors a 0.15mm es produeixen velocitats de refredament molt baixes que se situen prop de la velocitat crítica de tremp. Això alenteix la transformació de fase en dos o més segons en comparació a les zones amb bona qualitat de contacte i per tant, perilla que en aquestes, no s'obtingui l'estructura martensítica desitjada.

Per tal d'ampliar el coneixement en la influència que tenen les variables de pressió i temperatura s'ha realitzat un disseny d'experiment. A partir d'aquest s'ha detectat que la temperatura té una incidència major que la pressió en la velocitat de refredament i per tant, en la qualitat del contacte.

Finalment doncs, es pot concloure que els objectius del projecte s'han assolit amb èxit i que, a més a més, s'han aconseguit fer les primeres proves d'obtenció de la conductància tèrmica de contacte amb un mètode que ha de continuar evolucionant. Aquest treball ha aportat un coneixement notable de la tècnica de l'estampació en calent de xapa i del disseny d'equips experimentals per a obtenir i controlar els paràmetres de transferència de calor que es donen en aquest procés. S'espera continuar treballant en aquest tema desenvolupant l'equip i la instrumentació de mesura i evolucionant el mètode d'obtenció dels paràmetres de transferència de calor del procés.

7 Accions futures

En aquest projecte s'ha introduït la tècnica de l'estampació en calent de xapa d'acers d'alta resistència mecànica. També s'han vist els avantatges i els inconvenients de la tècnica alhora d'obtenir peces amb els requeriments que la industria de l'automòbil exigeix. La introducció en la tècnica, els coneixements en transferència de calor i ciència de materials entre d'altres, ha permès el muntatge d'un equip experimental d'estampació en calent per realitzar assaigs que serviran d'eina de validació de les simulacions numèriques a fi de determinar el valor de conductància tèrmica de contacte.

Finalment, gràcies a la sensorització de càrrega i temperatura, s'han obtingut gràfiques d'evolució de la temperatura en funció del temps prou bones. No obstant, alhora de utilitzar-les com a eina de validació dels càlculs d'elements finits, s'han hagut de tenir en compte els errors que els instruments de mesura de temperatura utilitzats donen per motius de contacte tèrmic. La lectura errònia d'un termoparell és força inevitable però, es pretén que en treballs futurs s'utilitzin altres instruments de mesura. Una altra opció és quantificar i compensar el errors de mesura que aquests aparells proporcionen.

Per altra banda, s'ha estudiat l'efecte que té la qualitat del contacte pel que fa a l'ajust entre matrius. Ha estat un estudi breu i inicial que en un treball futur es pot desenvolupar. S'ha vist per mitjà d'un disseny d'experiment la influència dels paràmetres de pressió i temperatura en la velocitat de refredament. Se n'han extret unes conclusions, però aquest estudi es podria ampliar introduint el paràmetre de la rugositat i quantificant l'efecte que té la temperatura alhora de deformar el material i per tant, augmentar l'àrea de contacte.

Per últim, una proposta de treball futur, és desenvolupar el mètode d'obtenció de la conductància tèrmica de contacte. S'hauria de crear una rutina que s'encarregués d'iterar els valors de conductància automàticament, utilitzant els valors experimentals per a validar el resultat cada interval petit de temps. D'aquesta manera es podria determinar el resultat amb una fita d'error coneguda i escollida. No obstant, aquest mètode numèric necessita unes dades experimentals molt fiables, per tant, primerament s'hauria de desenvolupar un mètode de captura de dades més fiable.

8 Impacte ambiental

És important en un projecte, realitzar un estudi de l'impacte ambiental que ha suposat. Cadascuna de les petites coses que es fan en aquesta societat aporta un dany ambiental, per petit que sigui, que és bo quantificar per poder sensibilitzar-nos amb el medi ambient.. Per tant, l'objectiu d'aquest punt és determinar l'impacte o dany ambiental que ah suposat la realització d'aquest treball [25].

En aquest cas, el tipus principal d'impacte ha estat degut al consum d'energia elèctrica.

Consum elèctric

S'han utilitzat diferents aparells que consumeixen energia elèctrica provinent de la xarxa elèctrica (kWh). Per calcular les emissions associades cal aplicar un factor de conversió d'emissions de CO_2 atribuïdes al consum final elèctric (g de CO_2/kWh). Segons l'informe "*La energía en España 2007"* (Secretaria General d'Energia, del Ministeri d'Indústria, Turisme i Comerç), les emissions de CO_2 atribuïdes al consum final d'electricitat són de 450 g de CO_2/kWh (0.45 Kt de CO_2/GWh). A continuació d'adjunta un taula amb els aparells utilitzats i els consum per cadascun (Taula 8. 1).

Màquina	Hores d'ús	Potència (kW)	Energia (kWh)	Kg (CO2)
Ordinador CTM	400	0,2	80	36
Ordinador personal	80	0,2	16	7,2
Ordinador portàtil	120	0,2	24	10,8
Premsa	120	7,36	883,2	397,44
Forn	120	4	480	216
Impressora	6	1,1	6,6	2,97
Bufador aire calent	3	2	6	2,7
			TOTAL:	**673,11**

Taula 8. 1 Consum d'energia elèctrica i emissions de CO_2 a l'atmosfera.

Així doncs, degut al consum d'energia elèctrica al realitzar aquest projecte s'ha emès un total de 673.11Kg de CO_2 a l'atmosfera.

Per altra banda, cal esmentar que per al disseny de l'equip experimental s'ha procurat aprofitar el màxim de peces i utillatges de què disposava el CTM. Tot i així, ha estat necessari mecanitzar un total de 100 Kg d'acer per disposar de l'equip complet.

En el cas hipotètic, que sorgís la necessitat de reciclar el material utilitzat, cal saber que l'acer és un material 100% reciclable. No obstant, el reciclatge d'aquest suposa un consum considerable de combustibles fòssils. A continuació s'observa una imatge de l'evolució del percentatge d'acer reciclat en els ultima anys (Figura 8. 1).

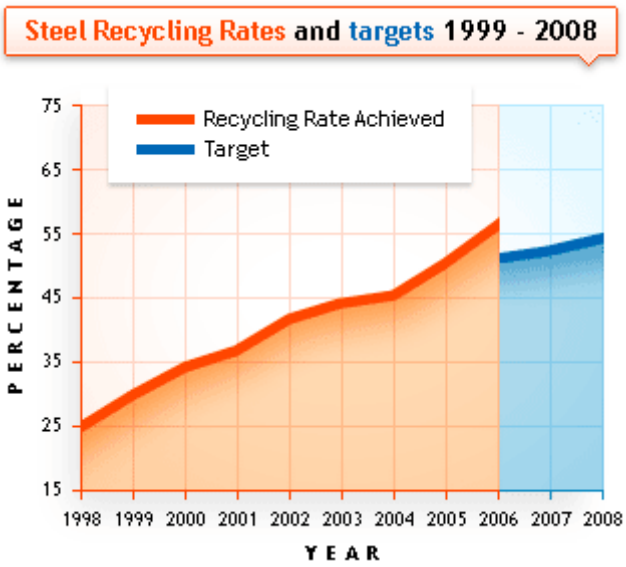


Figura 8. 1 Evolució del percentatge d'acer reciclat.

Finalment, encara que no es podria incloure en l'impacte del propi projecte, es pot realitzar un estudi de les emissions de CO_2 a l'atmosfera degudes al consum de combustible fòssil en els trasllats amb vehicle dièsel. El recorregut ha estat del propi domicili fins al CTM Centre Tecnològic. En la s'observa el total d'emissions.

Combustible	Factor d'emissió	Recorregut (Km)	Consum (l/100Km)	Litres Totals	Kg de CO2
Gasoil	2,6154Kg de CO2/l	2080	7	145,6	380,80224

Taula 8. 2 Consum de combustible fòssil i emissions de CO_2 a l'atmosfera.

9 Bibliografia

Referències bibliogràfiques

[1] Paul Akerström, *Modelling and simulation of Hot Stamping.* Luleâ Univesity of Technology, 2006.

[2] Aberto Turetta, *Investigation of thermal, mechanical and microstructural properties of quenchenable high strength steels in hot stamping operations.* Università degli Studi di Padova, 2008.

[3] Malek Naderi, *Hot Stamping of Ultra High Strength Steels,* Tag der mündlichen Prüfung, 2007.

[4] Martin Jonsson, *Products in hot stamped boron steels, presented by* Gestamp, [www.autosteel.org].

[5] T. Altan. “Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts”. Part I: Process methods and uses. Center for Precision Forming (CPF), Engineering Reserch Center for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University, 2006. Part II: Microstructure, material strength changes during hot stamping. Center for Precision Forming (CPF), The Ohio State University, 2007.

[6] Arcelor Mittal. “Steels for hot stamping”. Extract from the product catalogue, European Edition, 2008.

[7] https://www.rovalma.com

[8] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 4ªEdició (1996): *Fundamentos de transferencia de calor.* Ed. Prentice Hall, México.

[9] M. Krishnan, D. G. R. Sharma. “Determination of the interfacial heat transfer coefficient h in unidirectional heat flow by beck’s non linear estimation procedure”. Pergamon, Int.Comm.Heat Mass Transfer, Vol.23, No.2, pp.203-214, 1996.

[10] Salomonsson and M. Oldenburg. “Investigation of heat transfer in the press hardening process”. Modelling&Simulation II. Hot sheet metal forming of high-performance steel, 2009.

[11] R. Kolleck, S. Pfanner and E. P. Warnke. “Development of Cooled Tools for Press Hardening of Boron Steel Sheets”. Key Engineering Materials Vol. 344, pp.225-232, Trans Tech Publications, Switzerland, 2007.

[12] M. Merklein, J. Lechler and T. Stoehr. “Investigations of the thermal behavior of ultra high strength boron manganese steels within hot stamping”. Chair of Manufacturing Technology, University Erlangen, Nuremberg.

[13] F. Tondini, P. Bosetti and S. Bruschi. “Inverse Analysis for HTC Identification. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference Milan, 2009.

[14] M. Rosochowska, R. Balendra, K. Chodnikiewicz. “Measurements of termal contact conductance”. Journal of Materials Processing Technology 135, 204-210, Glasgow, 2003.

[15] J. V. Beck. “Nonlinear estimation applied to the nonlinear inverse heat conuction problem”. Int. J. Mass Transfer, Vol.13, pp.703-716. Pergamon Press, Great Britain, 1970.

[16] http://www.hbm.com/es/menu-top/home/

[17] http://sine.ni.com/nips/cds/print/p/lang/es/nid/202545

[18] http://sine.ni.com/nips/cds/print/p/lang/es/nid/208788

[19] Josep Sanjuán Muñoz, “*Identificació I caracterització de termòmetres d’alta pressió per a la mission especial LPF (LISA Pathfinder)”*, Projecte final de carrera, ETSEIB, 2004.

[20] http://www.monografias.com/trabajos3/transductores/transductores.shtml

[21] http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termocuplas.htm

[22] Joan Ferré, *Diseño factorial completo 2^2. Universidad Rovira i Virgili, Tarragona.*

[23] MINITAB, *Design an experiment,* Minitab user’s manual.

[24] Abaqus analysis user’s manual.

[25] www15.gencat.cat/cads/AppPHP/images/stories/guia_calcul_emissions_maig09.pdf

[26] http://www.matweb.com. *Online Material Information Resource-MatWeb, 2009.*

Referències complementàries

F. J. Lenze, J. Banik and S. Sikora. “Applications of hot formed parts for body in white”. International Deep Drawing Research Group, IDDRG International Conference, Sweden, 2008.

Berlung, K. Amundsson and L-O. Hellgren. “Hot stamped components with *soft zones* for improved crashworthiness-simulation and validation of product performance”. International Deep Drawing Research Group, IDDRG International Conference, Sweden, 2008.

M. Geiger, M. Merhlein and C. Hoff. “Basic Investigations on the Hot Stamping Steel 22MnB5”. Advanced Materials Reserch Vols. 6-8, pp.795-804. Trans Tech Publications, Switzerland, 2005.

H. Hoffmann, H. So, H. Steinbeiss. “Design of Hot Stamping Tools with Cooling System”. El Servier, Institute of Metal Forming and Casting, Technische Universitat München, Garching, Germany, 2007.

B. Abdulhay, B. Bourouga, C. Dessain, G. Brun, J. Wilsius. “Experimental study of heat transfer in hot stamping process”. Int. J. Mater Form, Vol.2 Suppl 1:255-257, 2009.

D. W. Fan, H. S Kim, S. Birosca and B.C De Cooman. “Critical Review of Hot Stamping Technology for Automotive Steels”. Graduate Insitute of Ferrous Technology, Pohang University of Science and Technology, Pohang, South Korea, 2007.

K. N. Prabhu and A. A. Ashish. “Inverse modeling of heat transfer with application to solidification and quenching”. Materials and manufacturing processes, Vol.17, No 4, pp.469-481, 2002.

J. V. Beck, B. Blackwell, A. Haji-Sheikh. “Comparison of some inverse heat conduction methods using experimental data”. Pergamon, Int.J.Heat Mass Transfer. Vol. 39, No.17, pp.3649-3657, Great Britain, 1996.

I. Savija, J. R. Culham, M. M. Yovanovich. “Review of thermal conductance models for joints incorporating enhancement materials”. Microelectronics Heat Transfer Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada, E.E Marotta, 2002.

F. H. Milanez, M. M. Yovanocich, J. R. Culham. “Effect of surface asperity truncation on termal contact conductance”. Inter Society Conference on Thermal Phenomena, 2002.