

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Disseny i fabricació d'un utillatge escalfador de xapes i aïllat tèrmicament per a una màquina de deformació incremental

Document: Memòria

Alumne: Arnau Casassayas Grau

Tutor: Maria Luisa Garcia-Romeu de Luna
Departament: Enginyeria mecànica i construcció industrial
Àrea: Enginyeria de processos de fabricació

Convocatòria: Juny 2019

Índex

1. INTRODUCCIÓ	5
1.1. Antecedents	5
1.1.1. Peticionari	5
1.1.2. Entorn i croquis	5
1.1.3. Exposició del problema	6
1.2. Objecte	6
1.3. Requeriments i abast	7
1.3.1. Requeriments	7
1.3.2. Abast	8
2. DISSENY CONCEPTUAL	9
2.1. Conceptes generals	9
2.1.1. Ubicació	9
2.1.2. Aspecte general	9
2.1.3. Principi de funcionament	9
2.2. Solucions existents	10
3. DESCRIPCIÓ DE LA SOLUCIÓ FINAL	12
3.1. Part estructural	12
3.1.1. Suports	13
3.1.2. Pilars de suport	13
3.1.3. Unions	13
3.2. Part calefactora	14
3.2.1. Elements tèrmics	15
3.2.2. Elements aïllants	16
3.2.3. Mesura de temperatura	16
3.2.4. Recobrimet metàl·lic	17
3.3. Part elèctrica	18
3.3.1. Dispositius elèctrics	18
3.3.2. Maniobra de funcionament	19
4. SIMULACIONS	20
5. COMPROVACIÓ DEL FUNCIONAMENT	22
5.1. Posada en marxa	22
5.2. Proves de validació	22

6. RESUM COMPLERT DE CARACTERÍSTIQUES DE L'UTILLATGE	24
6.1. Part estructural	24
6.2. Part calefactora	24
6.3. Part elèctrica	24
7. RESUM DEL PRESSUPOST	25
8. CONCLUSIONS	25
9. RELACIÓ DELS DOCUMENTS	26
10. BIBLIOGRAFIA	27
ANNEX A: PROPOSTES ALTERNATIVES	29
A.1. Sistemes aplicables al disseny	30
A.2. Solucions alternatives	31
ANNEX B: DESCRIPCIONS TÈCNIQUES	33
B.1. Part estructural	34
B.2. Part calefactora	34
B.2.1. Elements aïllants	34
B.2.2. Resistència tèrmica	35
B.3. Part elèctrica	41
ANNEX C: CÀLCULS DE RESISTÈNCIA ESTRUCTURAL	43
C.1. Dades inicials	44
C.2. Càlculs realitzats	46
C.2.1. Falla estàtica	46
C.2.2. Falla a fatiga	48
ANNEX D: CÀLCULS DE DIMENSIONAMENT DEL FORN I LA RESISTÈNCIA TÈRMICA	52
D.1. Dades inicials	53
D.2. Dimensionaments	53
D.2.1. Dimensionament del forn	53
D.2.2. Dimensionament de la resistència tèrmica	56
ANNEX E: CÀLCULS DE DIMENSIONAMENT DEL CABLE ELÈCTRIC	61
E.1. Dades inicials	62
E.2. Dimensionament del cable i els dispositius de seguretat	62
ANNEX F: SIMULACIONS I PROVES REALS	64
F.1. Simulacions	65
F.1.1. Geometria	65

F.1.2. Mallat	66
F.1.3. Condicions de contorn	67
F.1.4. Resultats	70
F.2. Proves reals	71
F.2.1. Comprovacions i muntatge	72
F.2.2. Resultats de les proves	74
ANNEX G: MANUAL D'USUARI I MANTENIMENT	77
G.1. Manual d'usuari	78
G.2. Manual de manteniment	79

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

1.1.1. Peticionari

El peticionari d'aquest projecte és la Universitat de Girona. Concretament, el grup de recerca *GREP* que es troba situat al Parc Científic i Tecnològic, carrer Pic de Peguera, núm. 15 (porta B – taller 5) de la ciutat de Girona, C.P. 17003.

1.1.2. Entorn i croquis

Aquests últims anys s'han fet molts avanços en l'estudi de la influència dels paràmetres de procés, en el procés de deformació incremental de planxes en geometries bàsiques. Es poden deformar varis tipus de xapes, des de polimèriques a metàl·liques.

Aquest tipus de tecnologia consisteix en anar deformant una planxa metàl·lica o polimèrica, mitjançant un punxó que pot anar col·locat al capçal d'una màquina CNC. Normalment, l'eina penetra una profunditat determinada sobre la superfície de la planxa i va resseguint el contorn que es vol aconseguir.

El Grup de Recerca en Enginyeria del producte, Procés i Producció (*GREP*) disposa d'una màquina CNC adaptada i un utillatge per aguantar les planxes que s'han d'assajar. Quan es realitzen els assajos, una taula dinamomètrica recull informació de les forces que actuen sobre la planxa durant l'experiment. Actualment, aquest utillatge només permet deformar materials a temperatura ambient, ja que no es disposa de cap sistema d'escalfament previ. Es pot veure l'entorn de treball a la Figura 1.



Figura 1: Entorn de treball de la màquina de deformació incremental

Les dimensions de treball de la taula de la fresadora CNC són de 900 mm d'amplada, 550 mm de fondària i 290 mm d'alçada. És a dir, el punxó que realitza les deformacions sobre la superfície de la xapa només es pot moure dins aquests rangs de treball. També s'ha de tenir en compte que el sensor de força utilitzat, eleva l'utilatge uns 60 mm. La Figura 2 mostra aquest espai disponible dins l'entorn de treball.

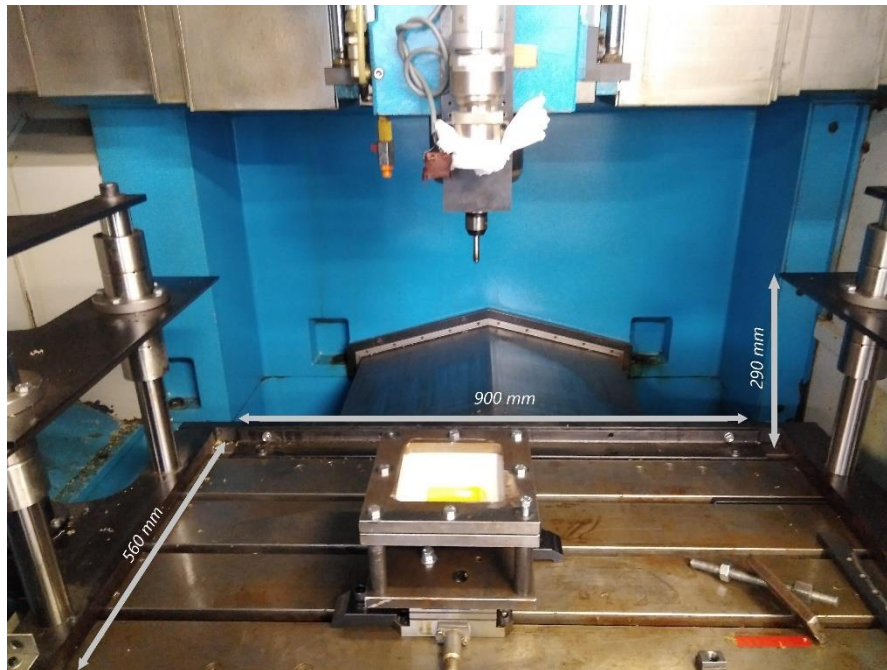


Figura 2: dimensions disponibles de l'entorn de treball

1.1.3. Exposició del problema

Tal i com s'ha explicat anteriorment, fins a l'actualitat s'han estat realitzat experiments utilitzant el mètode de deformació incremental (ISF) amb planxes que només es deformen plàsticament a temperatura ambient.

Un dels inconvenients que això comporta és que no es pugui experimentar amb alguns materials metàl·lics i polimèrics que necessiten arribar a una certa temperatura per poder-se deformar plàsticament. Això implica que el grup de recerca està limitat als materials que només es deformen a temperatura ambient.

1.2. Objecte

L'objecte d'aquest projecte consisteix en dissenyar i fabricar un nou utilatge que, a més de fer de suport de les xapes que s'han de deformar, permeti un escalfament del material previ a la deformació. Amb tot això, també s'inclou un sistema control que permeti la regulació de la temperatura de tot el conjunt.

1.3. Requeriments i abast

1.3.1. Requeriments

Per poder dissenyar i fabricar un utillatge que permeti, a més de la subjecció, escalfar planxes per una màquina de deformació incremental, cal saber quines són les necessitats que s'han de satisfer i quines limitacions es tenen per poder acomplir exactament amb el que hi ha a la realitat. A la Taula 1 es pot veure el llistat de requeriments pel projecte.

Taula 1: Llista de requeriments i desitjos

REQUERIMENTS I LIMITACIONS DEL DISSENY I FABRICACIÓ D'UN UTILLATGE PER UNA MÀQUINA DE ISF

Conceptes	Data	Tipus	Descripció
<i>Funció</i>	17/05/18	Req.	L'utillatge ha de permetre l'escalfament de planxes metàl·liques i polimèriques.
	17/05/18	Req.	S'ha de poder saber quan la planxa assoleix la temperatura de consigna.
	20/06/18	Req.	L'element actualment utilitzat per prendre mesures de força en fred s'hauria de poder col·locar per prendre mesures dels futurs experiments en calent.
<i>Material</i>	20/06/18	Req.	Els materials i els elements utilitzats en la fabricació ha de ser resistents als canvis de temperatura i a les forces aplicades durant el procés de deformació.
<i>Lubricació</i>	20/06/18	Req.	S'ha de poder utilitzar qualsevol lubricant a l'hora de deformar la xapa.*
<i>Dimensions</i>	17/05/18	Req.	L'espai màxim disponible dins la màquina és de 900x560x290 mm.
	17/05/18	Req.	La presència d'altres utillatges en la màquina i el volum del capçal provoca que aquest només tingui uns 220 mm per moure's a dreta i esquerra. (Situant el 0 al centre)
	17/05/18	Req.	La taula dinamomètrica (<i>KISTLER</i>) té unes dimensions de 140x170x60 mm i va situada sota l'actual utillatge fixada amb cargols.
<i>Control</i>	17/05/18	Desig	El sistema d'aportació de calor s'hauria d'aturar automàticament un cop s'arribi a la temperatura de consigna.

<i>Adquisició de temperatura</i>	17/05/18	Desig	Un cop arribat a la temperatura desitjada i aturat el sistema d'aportació de calor, el procés de deformació incremental hauria de començar automàticament.
	05/07/18	Desig	S'ha d'observar com es distribueix la temperatura sobre la superfície de la xapa.

* Els experiments actuals es fan amb lubricant líquid i quan les peces que es volen formar es trenquen, aquest lubricant cau sobre la taula on se situa l'utillatge.

1.3.2. Abast

Partint de l'utillatge existent d'ISF, s'extraurà el coneixement necessari del procés, sobre el qual s'hi afegiran els requeriments de treballar amb aportació de calor: recobriment del contorn que permeti aïllar el seu interior de l'ambient, emmagatzemar i controlar les dades de temperatura, etc. L'elecció de les resistències i els termoparells adequats per a la mesura de temperatura també formaran part de l'abast del projecte. Per concloure, es realitzarà un conjunt d'experiments amb l'utillatge en funcionament per tal de validar-lo.

2. DISSENY CONCEPTUAL

Al llarg d'aquest apartat es fa una descripció general de la solució, a partir dels paràmetres establerts durant la fase de recerca d'informació i la redacció dels requeriments. També es mostren les diferents solucions extretes de la bibliografia consultada, en forma de quadre comparatiu, algunes de les quals es van descartar des d'un bon començament i d'altres se'n va fer una valoració.

2.1. Conceptes generals

En aquesta secció es mostren el conjunt de particularitats que descriuen la solució final des del punt de vista de la ubicació dins la màquina, el disseny i el funcionament. És a dir, perquè la solució sigui compatible amb els requeriments, ha de complir amb les característiques que es descriuen a continuació.

2.1.1. Ubicació

El nou utillatge s'ha de situar el més centrat possible a la taula de la fresadora CNC, per tal d'aprofitar al màxim l'espai que es pot moure el capçal. Cal tenir present que abans s'haurà de situar el sensor de forces (*KISTLER*) i després fixar l'utillatge just a sobre amb cargols.

2.1.2. Aspecte general

El disseny consisteix en una caixa metàl·lica que s'utilitza com a forn i té la funció d'escalfar les planxes. Però a diferència dels forns per fer tractaments tèrmics convencionals, enlloc de porta té una obertura superior on s'hi fixen les planxes. Aquest forn està format per plaques de fibra ceràmica aïllants, envoltades per planxes metàl·liques que ho mantenen tot fixat.

A més del forn, hi ha la part estructural, formada per plaques metàl·liques que fan de suport de la part calefactorsa i les xapes a deformar, i barres cilíndriques que donen rigidesa tota l'estructura. Cal afegir, que l'ús de les barres està pensat perquè suportin els esforços durant la deformació i no ho faci el forn.

2.1.3. Principi de funcionament

La funció principal d'aquest utillatge és mantenir fixes les planxes que s'hagin de deformar, mitjançant un el sistema descrit a l'apartat anterior. Però l'objectiu d'aquest projecte era permetre la realització d'experiments amb planxes metàl·liques i polimèriques que es deformen plàsticament a temperatures elevades. Per això el nou disseny, a més dels suport per mantenir les planxes fixes durant la deformació, incorpora dins l'estructura, un forn amb unes resistències

tèrmiques que escalfen prèviament aquestes xapes sense haver-les de manipular. És a dir, un cop es fixin a l'utillatge, no s'han de tornar a tocar fins que s'hagi acabat el procés escalfament-deformació.

L'objectiu de fer-ho mitjançant aquest sistema és reduir la probabilitat que es produeixi un accident, per això s'ha pensat en un disseny en què només s'ha de manipular la planxa abans de començar els experiments i un cop s'hagi finalitzat tot el procés.

2.2. Solucions existents

Durant el procés de recerca d'informació, s'han buscat diferents mètodes d'escalfament de xapa per màquines de deformació incremental. Aquests mètodes s'han extret de publicacions científiques, en què s'expliquen els experiments de deformació incremental en xapes calentes, el disseny del sistema que escalfa les xapes i els resultats obtinguts en funció de diferents paràmetres.

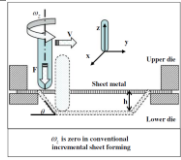
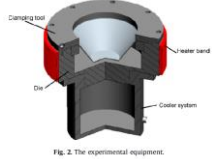
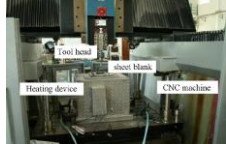
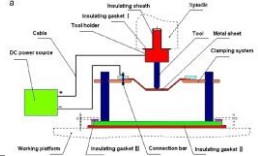
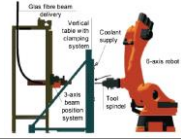
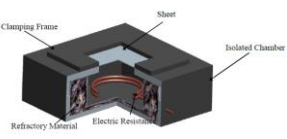
Al final d'aquest apartat hi ha un quadre resum, representat a la Taula 2, que mostra els diferents mètodes d'escalfament de xapa trobats a les publicacions científiques. A cada columna hi apareix un paràmetre del qual depenen els resultats finals, i a les darreres es diu si és un mètode compatible amb els requeriments establerts, i les referències de la publicació científica.

Els sistemes *Unit a sistema de subjecció*, *Cambra d'escalfament* i *Cambra aïllada tèrmicament* són els que s'adeqüen més als requeriments, ja que treballen amb lubricant i les temperatures de treball permeten escalfar metalls i polímers. Tot i que no s'anomenen, també es poden aproximar les dimensions d'aquests sistemes a les de l'utillatge utilitzat fins ara, la qual cosa fa que sigui més senzill fer un disseny per la màquina del Parc Científic i Tecnològic.

La resta de mètodes s'han descartat, principalment, per la complexitat dels dissenys i el principi de funcionament, o perquè l'escalfament no es produeix en tota la superfície de la xapa.

A l'Annex A s'explica de forma detallada les solucions alternatives proposades. Bàsicament, es mostra un disseny amb geometria circular i un altre amb geometria quadrada, però tots dos amb un mateix sistema d'escalfament de la planxa.

Taula 2: Resum de sistemes d'escalfament de planxes

Mètode escalfament	Foto	Material escalfat	Temp. Eina (°C)	Temp. Planxa(°C)	Lubricant	Dimensions planxa (mm)	Dimensions utilatge	Adquisició/control temperatura	Aplicable al disseny	Referències
Local amb eina		Aliatge Mg AZ31	105	100	-	150x150x1	-	Termòmetre infraroig	No	Park, J., Kim, J., Park, N., Kim, Y., 2009.
Unit a sistema subjecció		Aliatge Mg AZ31	-	200-300	Sí (MoS ₂)	Ø130x1	-	Termoparells i controlador PID	Si	Ambrogio, G., Filice, L., Manco, G., 2008.
Cambra d'escalfament		Aliatge Mg AZ31	-	150-350	Sí (MoS ₂)	100x100	-	-	Si	Zhang, Q., Guo, H., Xiao, F., Gao, L., Bondarev, a. B., Han, W., 2009.
Local amb circuit electrònic		Aliatge Mg AZ31 i aliatge de TiAl ₂ Mn ₁₅	Corrent elèctric (A) 300 - 600		Sí (MoS ₂)	1 mm de gruix	-	-	No	Fan, G., Gao, L., Hussain, G., Wu, Z., 2008.
Local amb raig làser		Al5182 i 65Cr2	Fins a 350 (làser)	Similar a la del làser	No	225x225x1.25 (en posició vertical)	1000x1000x500	Control numèric del raig làser i càmera infraroja	No	Duflou, J., Callebaut, B., Verbert, J., Debaerdemaeker, H., 2008.
Cambra aïllada tèrmicament		PMMA	185-255 (interior cambra)	80-122 (superfície planxa)	Sí (oli mineral)	Planxes de gruix 2, 4 i 6 mm	-	Càmera tèrmica	Si	Conte, R., Gagliardi, F., Russo, P., Ambrogio, G., 2017.

3. DESCRIPCIÓ DE LA SOLUCIÓ FINAL

Anteriorment s'ha dit que el disseny es divideix en dues parts: la part estructural i la part calefactors; però també cal afegir un tercer capítol dedicat a la part elèctrica que fa funcionar tot el sistema. S'ha de dir que dins la part calefactors hi ha el forn, que aporta calor al sistema; i l'extensió del forn, que eleva la fixació de les planxes per poder fer deformacions de més profunditat. A la Figura 3 es pot observar com l'estructura uneix el forn amb la seva extensió i alhora manté els conjunts centrats amb el forat central.

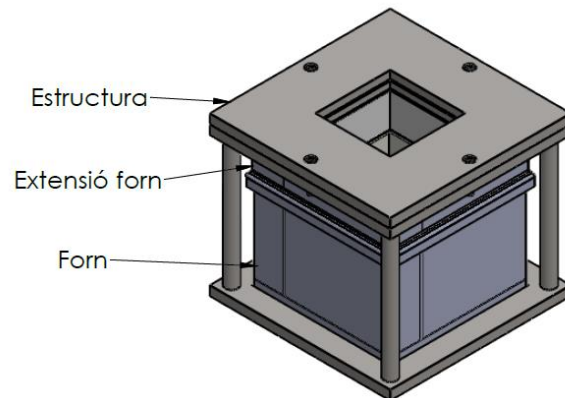


Figura 3: Conjunt complet de l'utillatge per al sistema de deformació incremental

3.1. Part estructural

En general, la fresadora CNC no genera uns grans esforços per deformar les planxes i, en conseqüència l'utillatge no hauria d'acabar malmès degut a les forces resultants. Tot i així, els elements que formen la part estructural són d'acer i s'han dissenyat per tal que aguantin pics de força que podrien passar dels 1500 N. Per comprovar les propietats dels materials utilitzats, a l'Annex B hi apareixen les descripcions tècniques. A la Figura 4 s'enumeren cadascuna de les peces que conformen l'estructura de l'utillatge.

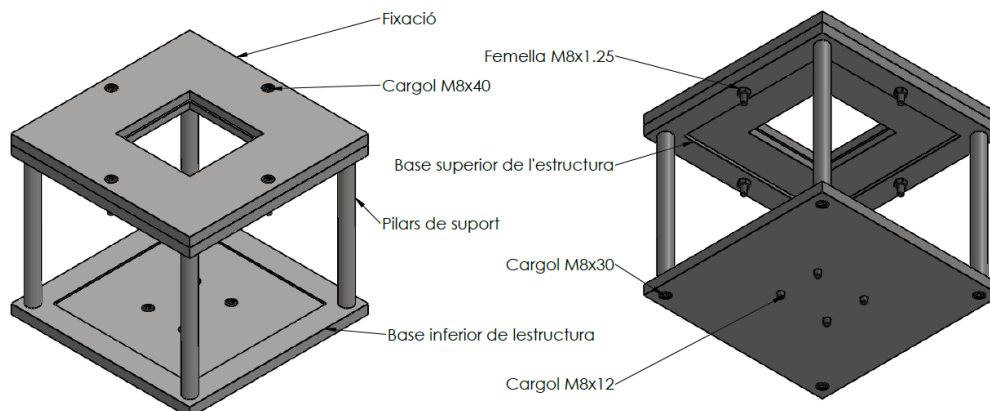


Figura 4: Elements de la part estructural

Degut a la forma del disseny, la part que acaba rebent tots els esforços és la *Base inferior de l'estructura* i per tal de demostrar que aguantarà, s'ha fet un càlcul de falla estàtica i un càlcul de falla a fatiga. A l'Annex C es poden repassar tots els càlculs de resistència de l'estructura, els quals consisteixen en trobar el coeficient de seguretat per falla estàtica i el coeficient de seguretat per falla a fatiga. Es pot avançar que els resultats dels dos càlculs són favorables i, per tant, no s'espera que la peça calculada s'acabi trencant.

3.1.1. Suports

El conjunt està format per un suport a la part inferior i dos suports a la part superior. Els de la part superior serveixen per mantenir fixes les planxes durant l'escalfament i la deformació. Un és la *Fixació*, que s'uneix a la *Base superior de l'estructura* amb cargols i impedeix els moviments de les planxes durant el procés de deformació. I l'altre és la *Base superior de l'estructura* que, a més d'unir-se amb la *Fixació*, es cargola als *Pilars de suport* que connecten la part superior amb la inferior.

A la part inferior hi ha la *Base inferior de l'estructura* que per una banda es cargola als *Pilars de suport* i uneix tot el conjunt. I per una altra banda, fixa tot l'utilitatge al sensor de forces, que alhora està fixat a la bancada.

Cal afegir, que tant a la *Base superior de l'estructura* com a la *Base inferior de l'estructura* s'hi mecanitza una caixa de 222 x 222 mm que fa de centratge pel forn.

3.1.2. Pilars de suport

Entre la *Base superior de l'estructura* i la *Base inferior de l'estructura* hi ha quatre *Pilars de suport* que mantenen separades les dues parts i creen una estructura rígida. Però el més important és que impedeixen que els esforços realitzats durant el procés de deformació caiguin sobre el forn i a la llarga el puguin malmetre. Aquestes barres són de $\varnothing 20 \times 208$ mm i amb dos forats roscats de M8x1,25 a cada extrem.

3.1.3. Unions

Les unions es realitzen entre la *Fixació* i la *Base superior de l'estructura*; entre la *Base superior de l'estructura* i els *Pilars de suport*; els *Pilars de suport* i la *Base inferior de l'estructura*; i entre la *Base inferior de l'estructura* i el sensor de forces. Per facilitar el procés de muntatge i les futures compres de recanvis, en tots els punt d'unió s'utilitzen cargols DIN 912 M8x1,25. En la unió entre la *Fixació* i la *Base superior de l'estructura* es requereix l'ús de femelles DIN 936 M8x1,25, ja que les dues peces tenen forats passants.

3.2. Part calefactora

En aquest subapartat és fa referència a la part de l'utillatge encarregada d'escalfar les planxes. És a dir, es fa una explicació detallada de cadascun dels elements que integra el forn i la seva extensió. El fet d'utilitzar una extensió, es per donar alçada a tot el conjunt i permetre la possibilitat de fer deformacions molt més profundes, però fabricant un forn més compacte que es pugui utilitzar en aplicacions que no es requereixi d'alçada o que siguin totalment diferents a la deformació incremental. A les Figures 5 i 6 es poden veure les peces que formen forn i la seva extensió, respectivament.

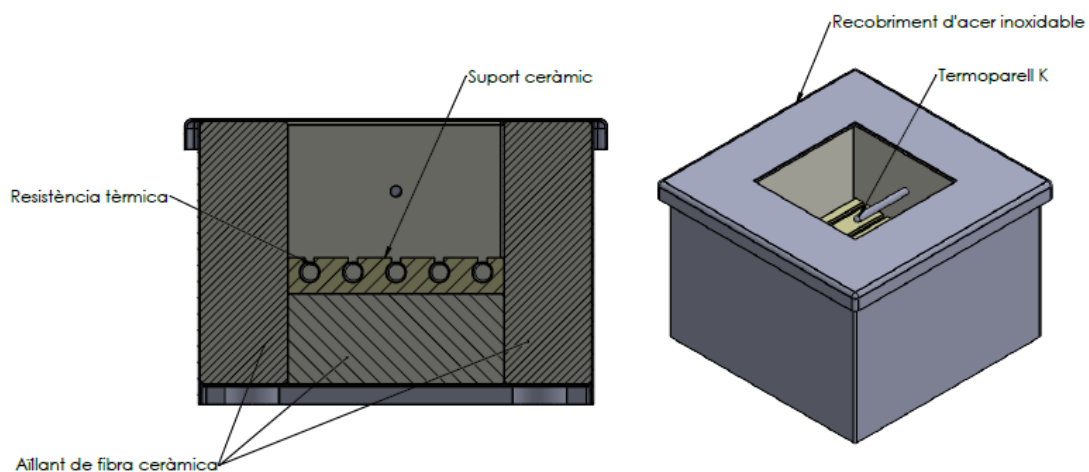


Figura 5: Conjunt d'elements del forn

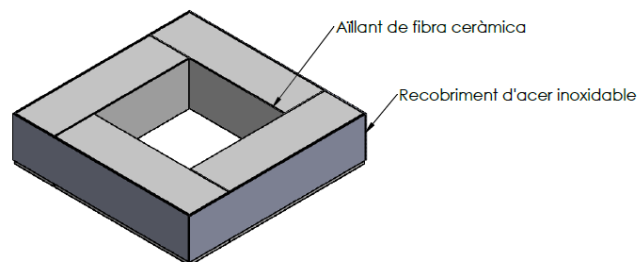


Figura 6: Peces corresponents a l'extensió del forn

Tot i que sempre s'ha partit de la necessitat de treballar amb planxes de 150 x 150 mm, i per tant, deixant un forat central de 120 x 120 mm, per arribar a les dades que s'anomenen tot seguit, s'han realitzat una sèrie de càlculs de dimensionament explicats a l'Annex D. Per començar, es calcula la potència que necessita el forn a partir de les pèrdues de calor per conducció i convecció, i tot seguit es calculen les característiques de la resistència bobinada, seguint els passos que indica el manual del fabricant de resistències, *KANTHAL*. Totes les característiques de la resistència i dels materials que conformen el forn també es poden trobar a l'Annex B.

Cal afegir que per complementar els càlculs teòrics, s'ha realitzat alguna simulació mitjançant el programa d'elements finits *ANSYS 19.1* (Versió d'estudiant) per tal d'observar la distribució de temperatures dins el forn i comprovar que els resultats teòrics permeten a la resistència assolir una temperatura determinada. Els resultats de les simulacions i les proves reals es poden trobar a l'Annex E.

3.2.1. Elements tèrmics

Un cop fets aquests càlculs de dimensionament, s'ha arribat a la conclusió que per poder assolir la temperatura desitjada s'ha d'utilitzar una resistència bobinada de 230V i 800 W. Aquesta bobina consisteix en un fil resistiu de \varnothing 0,6 mm amb un valor de resistència de 3,97 Ω /m i 2,55 W/cm² de càrrega tèrmica. El material del fil resistiu utilitzat és un aliatge d'un 20 % crom i la resta de níquel amb el nom comercial Nikrothal 80. A la Figura 7 es pot veure el tipus de fil utilitzat abans i després de fer el bobinat.



Figura 7: Fil resistiu Nikrothal 80 abans i després de bobinar-lo

Igual que algunes mufles per fer tractaments tèrmics, la resistència està formada per un fil bobinat que s'introdueix en els canals d'una placa ceràmica, d'aquesta manera queda ben suportada i no s'ha de col·locar cap altre element que l'aguanti. La única diferència és que a les mufles s'introdueixen les peces dins el forn i es tanquen amb una porta, i aquest nou disseny té un forat a la part superior on s'hi col·loquen les planxes.

Utilitzant aquest sistema, la resistència queda desprotegida del lubricant que es pugui vessar durant els assajos. Per evitar que la resistència es contaminei i la seva vida útil es redueixi dràsticament, s'hi col·locarà un placa de mica de 115 x 115 mm a sobre. Aquest complement deixa passar la calor i evita el contacte directe del lubricant amb la resistència, però a la llarga s'acaba fent malbé i s'ha de canviar

3.2.2. Elements aïllants

Per tal d'aconseguir el màxim rendiment de la resistència i evitar possibles accidents, s'utilitzen unes plaques aïllants de fibra ceràmica que impediran qualsevol fuga de calor. Aquests elements es fabriquen de moltes formes, però la més útil per aquesta aplicació és la placa rectangular. Concretament, les plaques utilitzades per aquesta aplicació són de 50 mm de gruix es tallen a 170 x 160 mm pels laterals del forn, 220 x 220 mm per la base del forn i de 170 x 55 mm per l'extensió del forn. Un cop tallades, les plaques es munten de tal manera que al centre formen un espai buit de 120 x 120 mm.

Com s'ha dit anteriorment, per aguantar el fil bobinat hi ha una placa ceràmica amb uns canals dibuixats per on s'introduirà la resistència, tal i com es pot veure a la Figura 8. Aquesta placa només té la funció de suport, per tant, anirà col·locada sobre una altra placa de fibra ceràmica que farà d'aïllant. El material utilitzat és A42P i s'enumeren algunes propietats a l'Annex B. Cal afegir que la bobina estarà formada per 16,6 cm de fil i es repartirà per 5 canals.



Figura 8: Suport ceràmic A42P

3.2.3. Mesura de temperatura

Per tenir un bon control de la temperatura, s'utilitzen diferents elements de mesura, en funció de la zona que es vulgui analitzar. A les parts que més interessa saber quina temperatura hi ha en qualsevol moment són: l'interior de l'utilitatge i la part exterior de la planxa que es vulgui escalfar.

A l'interior de l'utilitatge s'hi ha col·locat un termoparell tipus K que serveix per controlar la temperatura i, en qualsevol cas, evitar que la resistència arribi a la capacitat màxima i que amb el temps s'acabi deteriorant.

Paral·lelament, és necessari l'ús d'un petit controlador per poder veure quin és el valor de temperatura que registra el termoparell i poder introduir una consigna a la resistència tèrmica. Per poder realitzar aquestes funcions, s'utilitza un regulador de temperatura JUMO Quantrol LC100 que es mostra a la Figura 9.



Figura 9: Regulador JUMO Quantrol LC100

D'altra banda, per controlar la temperatura superficial de les planxes s'utilitzarà una càmera tèrmica. Amb aquest tipus d'aparell de mesura és més senzill saber quan la cara exterior de la xapa arriba a la temperatura desitjada.

3.2.4. Recobriments metàl·lics

Tant el forn com la seva extensió, necessiten un recobriments que doni rigidesa i mantingui les plaques aïllants i la resta d'elements interns, fixes. Per això, s'ha decidit unir les peces que conformen les dues parts, amb planxes d'acer inoxidable d'1,2 mm de gruix. S'escull acer inoxidable ja que no és tan bon conductor de la calor com el ferro, i en cas que aparegui alguna fuga, la conducció a través del metall en contacte no es produirà tan ràpid.

Pel forn, s'utilitzen planxes plegades i unides amb cargols. D'aquesta manera permet el fàcil desmuntatge quan arribi el moment de canviar algun element intern com pot ser la resistència, el termoparell o la placa de mica.

En canvi, les planxes de recobriments per l'extensió del forn s'uneixen amb petits punts de soldadura. Com que aquest subconjunt consta de quatre planxes de 222,4 x 50 x 1,2 mm que envolten les respectives plaques aïllants, no caldria canviar cap element i, per tant no s'hauria de desmuntar mai.

3.3. Part elèctrica

Dins aquest capítol, es fa una breu descripció del sistema elèctric que alimenta la resistència i el controlador. Per fer-ho, s'ha pensat en la fabricació d'un petit quadre elèctric per poder tenir el control de tot el conjunt. Totes les dades importants dels elements que formen la part elèctrica es troben a l'Annex B

3.3.1. Dispositius elèctrics

Per fer el quadre, s'ha escollit un armari metàl·lic de 300 x 200 x 150 mm com el de la Figura 10, al qual s'hi ha fet dos forats quadrats per incorporar-hi un interruptor d'engegada i parada de la part calefactors, i el controlador PID. La finalitat dels forats és per deixar la part del cablejat amagada dins l'armari i poder tenir l'interruptor i el display del controlador a l'exterior.



Figura 10: Armari metàl·lic IDE

Pel que fa a l'interruptor, s'utilitza un GAVE A-550 de 12 A. La finalitat d'aquest element és poder aturar i encendre el forn de forma manual i independent al controlador, perquè d'aquesta manera es pugui configurar sense que la resistència estigui funcionant. També es podria utilitzar com a parada d'emergència si fos necessari. A la Figura 11 es pot veure com és l'interruptor.



Figura 11: Interruptor manual de parada i marxa del forn

A més d'aquests elements, també s'hi afegeix un interruptor magnetotèrmic de 6 A com el de la Figura 12 i un relé de 230V AC amb la seva base, com es pot veure a la Figura 13. La funció del magnetotèrmic és protegir el controlador i la part calefactors de possibles sobrecàrregues i curtcircuits. D'altra banda, el relé s'encarrega de permetre o tallar el pas de corrent cap a la resistència, en funció de la temperatura que mesuri el termoparell.



Figura 12: Interruptor magnetotèrmic de 6 A

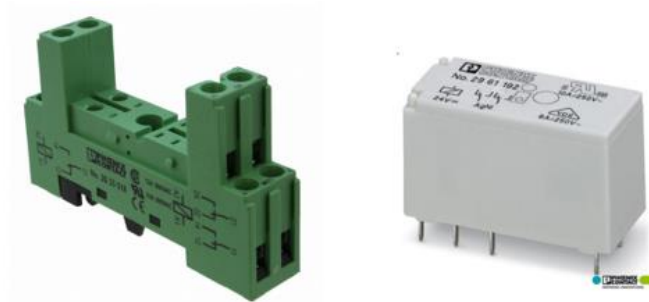


Figura 13: Relé i base del relé

Tota aquesta instal·lació es farà amb cable elèctric de coure d'1,5 mm² de secció. A l'Annex E es poden veure els càlculs de dimensionament pel fil elèctric i el magnetotèrmic de seguretat.

3.3.2. Maniobra de funcionament

El circuit realitzat per aportar energia elèctrica a la resistència i el controlador s'ha fet el més senzill possible, per tal que el client ho pugui entendre i, que en futures millores pugui adaptar-ho a les pròpies necessitats. A continuació, es fa una breu explicació de la maniobra.

Primer de tot, cal connectar l'endoll a la xarxa elèctrica de 230 V AC. Un cop endollat, s'hauria d'encendre el controlador amb el qual l'usuari pot programar la temperatura amb la que vol treballar. Si no s'encén, vol dir que el magnetotèrmic està baixat i impedeix el pas del corrent, per tant, s'hauria de pujar. És aconsellable deixar la resistència apagada, a través de l'interruptor, mentre s'estigui manipulant el controlador.

Finalment, un cop programada la temperatura, es pot encendre el forn mitjançant l'interruptor. En funció de la temperatura que s'hagi programat i la que registri el termoparell, el relé s'activarà per deixar passar corrent cap a la resistència i augmentar la temperatura, o es desactivarà perquè ja haurà arribat a la consigna. Es pot fer que les operacions de parada i engegada del relé es realitzin durant el procés de deformació o que només es produeixi un cop fins que s'arribi a la temperatura de consigna.

4. SIMULACIONS

En aquest apartat es fa una breu menció dels resultats obtinguts en les simulacions realitzades amb el programa d'elements finits *ANSYS 19.1* (versió d'estudiant). Tota la informació sobre la geometria, el mallat i la configuració de les condicions de contorn es troba àmpliament detallada a l'Annex F.

Tot i això, cal afegir que s'ha partit d'algunes dades obtingudes en el dimensionament de la resistència i de la necessitat d'arribar a un valor de consigna de 300°C. A la Taula 3 es mostren algunes les dades introduïdes al programa i les dimensions de la resistència. Per facilitar la simulació, s'ha considerat la resistència com un tub amb una superfície equivalent als 5 canals que ocupa la resistència bobinada per la qual s'ha optat.

Taula 3: Dades de la simulació

DADES PER LA SIMULACIÓ		
	VALOR	UNITATS
TEMPERATURA DE CONSIGNA	300	°C
Ø EXTERIOR RESISTÈNCIA	55	mm
Ø INTERIOR RESISTÈNCIA	50	mm
ALÇADA	30	mm
POTÈNCIA	800	W
CÀRREGA SUPERFICIAL	7,76	W/cm ²

L'objectiu d'aquestes simulacions era observar la distribució de temperatures dins l'utilatge i comprovar que es pot arribar a la consigna a partir dels valors trobats en el dimensionament. Si s'observa la Figura 14, es pot veure com la temperatura de l'aire que envolta la resistència s'eleva fins a 400°C.

Aquest augment de temperatura fa baixar la densitat de l'aire i, d'aquesta manera fa que pugui i s'acabi trobant amb la planxa. Amb aquest fenomen de convecció forçada s'aconsegueix escalfar la planxa de manera uniforme, ja que tota la superfície queda envoltada per aire calent.

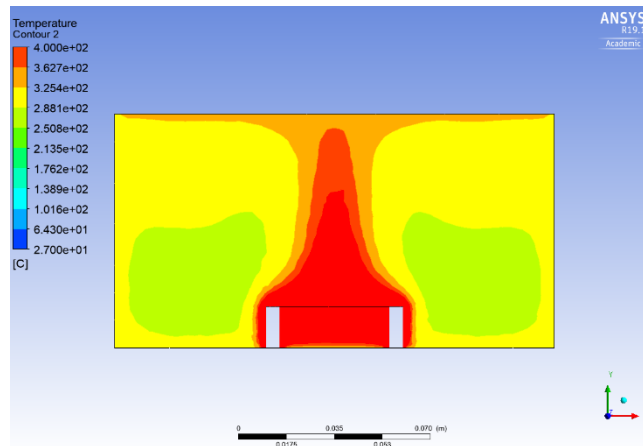


Figura 14: Distribució de temperatures de l'aire dins el forn

A la Figura 14 també es pot observar com la recirculació de l'aire es produeix als laterals, on no hi ha la resistència. En aquestes regions, l'aire es refreda i es desplaça a la part inferior degut a l'augment de densitat.

5. COMPROVACIÓ DEL FUNCIONAMENT

5.1. Posada en marxa

Abans de posar en marxa tot el sistema, l'usuari ha de conèixer una sèrie de pautes que ha de complir per tal que el projecte tingui validesa. A l'Annex G, es pot llegir el manual d'usuari i manteniment, en què es mencionen una sèrie d'accions per realitzar abans, durant i després del procés, per tal de conservar l'utilatge en bones condicions durant el major temps possible.

D'altra banda, en aquest apartat es pretén donar una visió general del funcionament de tot el conjunt i mostrar els resultats obtinguts en les proves de validació.

Per començar, cal saber que la part calefectora i la part elèctrica van unides mitjançant els cables del termoparell i els que porten corrent a la resistència. Com s'ha dit en apartats anteriors, el quadre elèctric disposa d'un magnetotèrmic com a element de seguretat, el regulador JUMO com a element de control, i el relé i l'interruptor com a elements activadors de la resistència.

Per aportar energia al quadre, només cal connectar l'endoll a la xarxa elèctrica. Un cop fet això, es pot programar el regulador sense cap perill, ja que la resistència es manté apagada si no s'activa l'interruptor. Quan s'hagi configurat el controlador, es pot activar la resistència i començar a realitzar les proves que s'hagin programat.

5.2. Proves de validació

Per tal de comprovar el correcte funcionament de l'utilatge i donar validesa al projecte, s'han realitzat una sèrie de proves mitjançant els recursos dels quals es disposa al laboratori del parc tecnològic. Els experiments consisteixen en comparar les valors de temperatura registrats pel termoparell i la càmera termogràfica a partir d'uns valors de consigna.

A la Figura 15 es mostra una imatge captada per la càmera termogràfica durant la prova que s'ha realitzat. A la imatge es pot veure clarament com la part que rep tota l'escalfor és la planxa, amb una temperatura de 71,5°C. Per altra banda, la *Fixació* no es veu afectada per l'augment de temperatura, ja que es manté pràcticament a temperatura ambient i no resulta perillós si es toca per error.

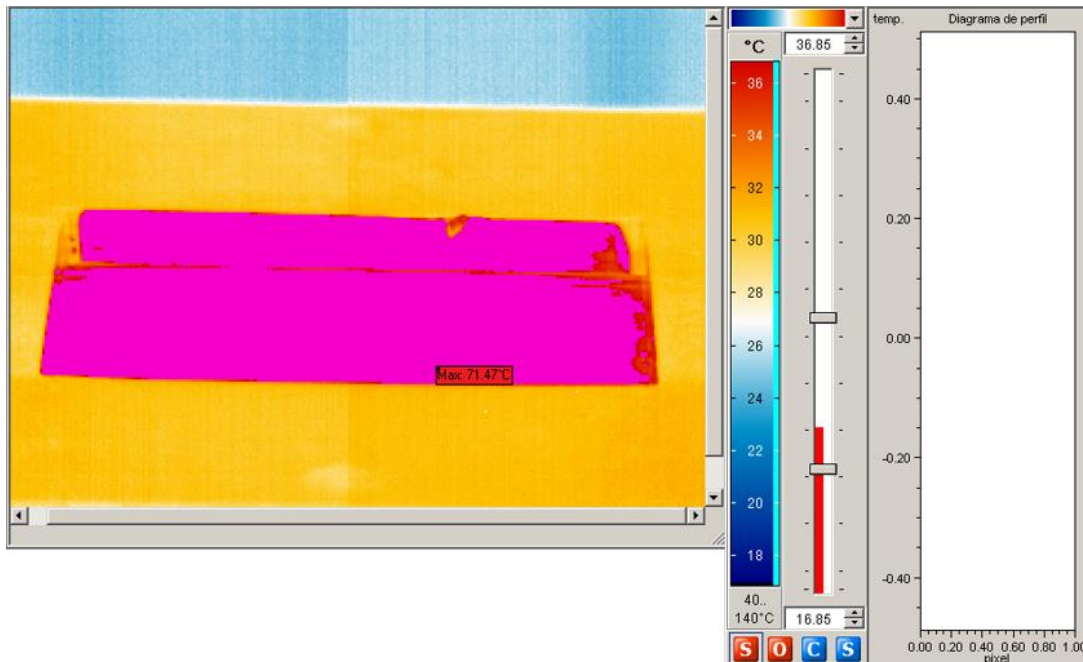


Figura 15: Imatge captada per la càmera termogràfica durant la prova

En finalitzar la prova, s’han recollit tots els valors de temperatura captats pel termoparell i la càmera termogràfica, i s’ha resumit en el quadre comparatiu de la Taula 4. Cal afegir, que la prova ha consistit en augmentar la temperatura en intervals de 50°C des de 100°C fins a 250°C, tot i així, es pot veure de forma més detallada tot el procés a l’Annex F.

Taula 4: Quadre comparatiu de temperatures

TEMPERATURA DE CONSIGNA (°C)	TERMOPARELL K (°C)	CÀMERA TERMOGRÀFICA (°C)
100	120	56
150	160	67
200	210	90
250	272	109

S’observa que hi ha una diferència considerable entre l’interior i l’exterior del forn. De fet, aquests resultats es podien arribar a imaginar, ja que el termoparell està situat molt a prop de la resistència, i rep directament l’escalfor que desprèn. En canvi, la planxa està a la part superior de l’utillatge i provoca que aquesta trigui més en escalfar-se.

6. RESUM COMPLERT DE CARACTERÍSTIQUES DE L'UTILLATGE

A continuació, es mostra un llistat dividit en dues parts que resumeix les característiques de l'utillatge. Primer es mostren les dades de la part estructural i seguidament les de la part calefactora.

6.1. Part estructural

Dimensions generals de l'estructura	290 x 290 x 250 mm
Material	Acer inoxidable 1.4301
Pes	30 kg
Posició en la maquina	Centrada i fixada amb cargols al sensor de força
Forces màximes suportables	1,5 KN

6.2. Part calefactora

Dimensions del forn	220 x 220 x 160 mm amb un forat de 120 x 120 mm
Materials aïllants	Fibra ceràmica de 50 mm de gruix
Recobriment	Planxes d'acer inoxidable de 1,2 mm
Potència del forn	800 W
Resistència	Nikronthal 80 de Øfil = 0,6 mm
Sensors	Termoparell tipus K Ø6x100 mm
Controlador	JUMO Quantrol LC100
Alimentació	230 V
Temperatura de treball	300°C
Rang de temperatures	De 300 a 600°C

6.3. Part elèctrica

Dimensions del quadre elèctric	300 x 200 x 150 mm
Tensió nominal	230 V AC
Mecanisme parada i marxa manual	Interrupctor lluminós 12 A
Dispositiu de protecció	Interrupctor magnetotèrmic 6 A
Dispositiu d'activació	Relé 230 V AC
Secció de cable	1,5 mm ²

7. RESUM DEL PRESSUPOST

El cost total de fabricació i muntatge d'un utilatge escalfador de xapes i aïllat tèrmicament per a una màquina de deformació incremental, a falta de contar l'IVA, és de MIL TRES-CENTS QUARANTA EUROS AMB VINT-I-UN CÈNTIMS.

8. CONCLUSIONS

Un cop finalitzats els processos de fabricació de totes les parts que conformen el conjunt i havent fet les proves de validació, es pot afirmar que s'ha assolit l'objectiu d'aquest projecte, que és dissenyar i fabricar un utilatge que permeti subjectar les planxes durant un procés de deformació incremental i, a més, realitzar un escalfament previ.

Així mateix, fent una breu repassada a la taula de requeriments, es pot assegurar que s'han respectat tots els requeriments de caràcter obligatori. Fins i tot, s'ha pogut realitzar alguns dels desitjables.

D'altra banda, un cop finalitzades les proves de validació, s'ha observat que es poden realitzar algunes millores. Les quals es poden aplicar si algun dia es planteja fer una versió per deformar planxes de major mida. Un dels canvis que es podrien fer, és dissenyar un utilatge més modular que permeti fer deformacions a diferents profunditats o treballar amb planxes de diferents mides. També s'ha observat que seria necessari col·locar un termoparell a prop de la planxa, per tal de tenir registres de temperatura de les dues superfícies. A més, si es volgués augmentar les mides de l'utilatge, s'hauria de buscar una resistència de majors prestacions i un material aïllant que permeti treballar a temperatures més elevades.

Finalment, s'ha observat que temperatura de la superfície exterior de la planxa difereix de la temperatura que mesura el termoparell, la qual cosa és provocada per diversos factors. Per tant, abans de poder fer proves de deformació incremental amb regularitat, és necessari documentar com es veuen afectades les diferències de temperatura en funció dels paràmetres que pugin variar en cada prova. Un d'aquests paràmetres seria el material i el gruix de la planxa i es podria arribar a solucionar programant el controlador amb una configuració diferent en cada cas.

9. RELACIÓ DELS DOCUMENTS

- DOCUMENT 1: MEMÒRIA I ANNEXOS
 - ANNEX A: PROPOSTES ALTERNATIVES
 - ANNEX B: DESCRIPCIONS TÈCNIQUES
 - ANNEX C: CÀLCULS DE LA RESISTÈNCIA ESTRUCTURAL
 - ANNEX D: CÀLCULS DIMENSIONAMENT DEL FORN I LA RESISTÈNCIA TÈRMICA
 - ANNEX E: CÀLCULS DE DIMENSIONAMENT DEL CABLE ELÈCTIRC
 - ANNEX F: SIMULACIONS I PROVES REALS
 - ANNEX G: MANUAL D'USUARI I MANTENIMENT
- DOCUMENT 2: PLÀNOLS
- DOCUMENT 3: PLEC DE CONDICIONS
- DOCUMENT 4: ESTAT D'AMIDAMENTS
- DOCUMENT 5: PRESSUPOST

10. BIBLIOGRAFIA

A continuació es mostren totes les fonts bibliogràfiques que s'han consultat per la realització del projecte.

AMBROGIO G., FILICE L., MANCO G.L. Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31. CIRP Annals - Manufacturing Technology. Vol. 57. Issue 1. p. 257 – 260. 2008.

BAGUDANCH I, Incremental Sheet Forming Applied to the Manufacturing of Biocompatible Polymer Protheses. Tesi doctoral. Enginyeria mecànica. Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona. Setembre del 2017.

CAO Z., WANG F., WAN Q., ZHANG Z., JIN L., DONG J. Microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy. Material and Design. Vol. 67. p. 64 – 7. 2015.

CONTE R., GAGLIARDI F., RUSSO P., AMBROGIO G. Incremental Sheet Forming on a Thermoplastic Material with Glassy State at Room Temperature. 2017.

DUFLOU J.R., CALLEBAUT B., VERBERT J., DE BEARDEMAEKER H. Improved SPIF performance through dynamic local heating. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 48. Issue 5. p. 543 – 549. 2008.

FAN G., GAO L., HUSSAIN G. ZHAOLI WU. Electric hot incremental forming: a novel technique. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 48. Issue 15. p. 1688 – 1692. 2008.

INCROPERA, FRANK P., DEWITT, DAVID P., BERGMAN, THEODORE L., LAVINE, ADRIENNE S. Principles of Heat and Mass Transfer: International Student Version 7th Edition. Editorial Wiley. Hoboken, NJ. 2013.

IRESTAL, Característiques tècniques i de correspondència aproximada de qualitats de l'acer inoxidable entre normes recuperat el 2 de Juny del 2018 a <http://www.irestal.com/services/technical-tables>

KANTHAL, Kanthal Handbook, Heating Alloys for Electric Household Appliances. Hallstahammar. 2003.

KANTHAL, Metallic Heating Elements recuperat el 7 de Juliol del 2018 a <https://www.kanthal.com/en/products/furnace-products-and-heating-systems/electric-heating-elements/metallic-heating-elements/>

KANTHAL, Technical Data for Kantahal Technical Ceramics recuperate el 10 de Juliol del 2018 a <https://www.kanthal.com/en/products/furnace-products-and-heating-systems/technical-ceramics/main-features-of-technical-ceramics/>

KISTLER, Dinamómetro multicomponente de hasta 10KN recuperat el 30 de Maig del 2018 a <https://www.kistler.com/es/producto/type-9257b/>

PARK J., KIM J., PARK N., KIM Y. Study of forming limit for rotational incremental sheet forming of magnesium alloy sheet. Metallurgical and material transactions. Vol 41. p. 97 – 105. 2010.

TEIDE REFRACTORY SOLUTIONS, Fibra ceràmica recuperat el 7 de Juliol del 2018 <http://www.teiderefrefractories.com/es/FI-familias-calidades-ficha/113/fibra-ceramica>

ZHANG Q., GUO H., XIAO F., GAO L, BONDAREV A.B., HAN W. Influence of anisotropy of the magnesium alloy AZ31 sheets on warm negative incremental forming. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 209. Issues 15 - 16. p. 5514 – 5520. 2009.

ANNEX A: PROPOSTES ALTERNATIVES

A.1. Sistemes aplicables al disseny

En aquest annex es pretén mostrar de forma resumida el recorregut que s'ha seguit per arribar a una solució definitiva. Començant per seleccionar part de la informació recopilada en un quadre resum, fruit d'un petit estudi de mercat realitzat prèviament; passant per la tria d'un mètode d'escalfament definitiu; i acabant amb diferents dissenys conceptuals que han servit de punt de partida per arribar a la solució final.

A l'apartat de les solucions existents, la Taula 2 resumeix diferents dissenys extrets de la bibliografia consultada. D'aquesta taula se seleccionen tres sistemes viables per l'aplicació, les quals són: *Unit a sistema de subjecció*, *Cambra d'escalfament* i *Cambra aïllada tèrmicament*. Aquests tres mètodes d'escalfament de xapa han estat el punt de partida del desenvolupament de nous dissenys per tal d'arribar a la solució final.

Per començar, fixant el punt de vista en el mètode d'escalfament, els tres sistemes seleccionats es diferencien en dos grups. A la Figura 16 es veu com un mètode seria utilitzant una manta calefactors per escalfar la planxa i una cambra d'aigua a la part inferior per refrigerar i fer de pantalla tèrmica; mentre que els altres dos utilitzen resistències tèrmiques per produir calor, tal i com s'observa a les Figures 17 i 18.

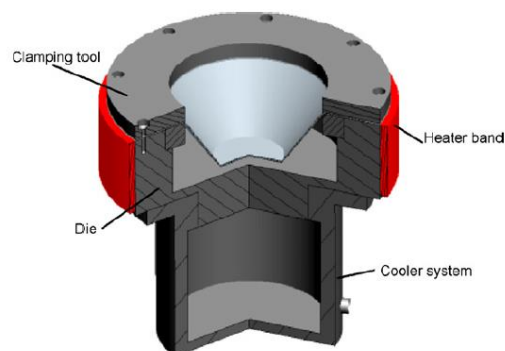


Figura 16: Unit a sistema de subjecció

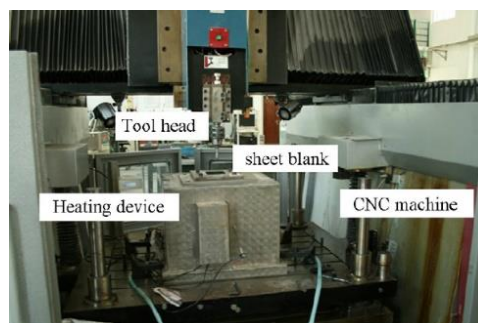


Figura 17: Cambra d'escalfament

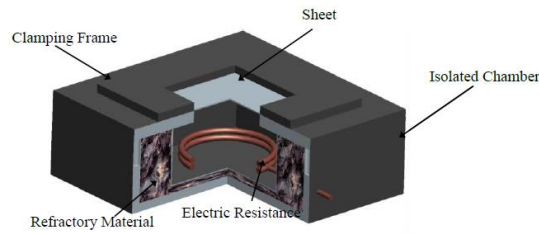


Figura 18: Cambra aïllada tèrmicament

Un cop estudiats els dos sistemes, s'opta per l'escalfament mitjançant una resistència calefactorsa, ja que és el mètode més eficient pel que fa a les pèrdues de calor. És a dir, la calor es produeix dins una cambra aïllada tèrmicament, en què la forma més fàcil de sortir és per conducció a través de la planxa que ha d'escalfar. D'altra banda, amb la mata calefactorsa és complicat fer que tota la calor vagi a la planxa, ja que no hi ha cap element que impedeixi les pèrdues per convecció amb l'ambient.

A.2. Solucions alternatives

Un cop decidit el mètode d'escalfament de les planxes, s'inicia el procés de desenvolupament del disseny, en el qual es realitzen alguns esbossos a mà alçada per tal de visualitzar si les idees són físicament i econòmicament viables. En aquest apartat es mostren dos dissenys de diferent geometria, un dels quals s'ha acabat de desenvolupar fins arribar al disseny final.

A la Figura 19 es pot observar un croquis basat en el concepte circular que segueix el sistema *Unit a sistema de subjecció*, però seguint amb la idea d'escalfar les planxes mitjançant una resistència tèrmica.

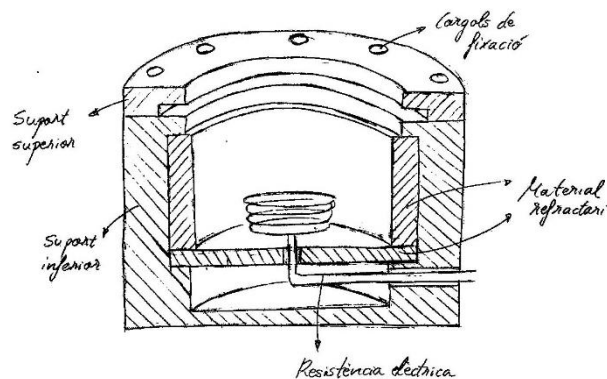


Figura 19: Concepte de geometria circular

El cos d'aquesta primera idea està formada per dues peces: el suport inferior, que conté tot el material aïllant i la resistència en el seu interior; i el suport superior que manté la planxa fixa i va unit l'inferior mitjançant cargols.

D'altra banda, hi ha el concepte quadrat, tal i com es pot veure a la Figura 20. Aquest croquis està basat en la mateixa idea que el sistema *Cambra d'escalfament* i *Cambra aïllada tèrmicament*.

Es tracta d'una estructura formada per un suport superior i un suport inferior, units per quatre barres fixades amb cargols a la cantonada de cadascun. Conté un tercer suport que es fixa a la part superior i aguanta la planxa que s'ha de deformar. Finalment, tota l'estructura queda recoberta amb plaques metàl·liques que protegeixen la resistència.

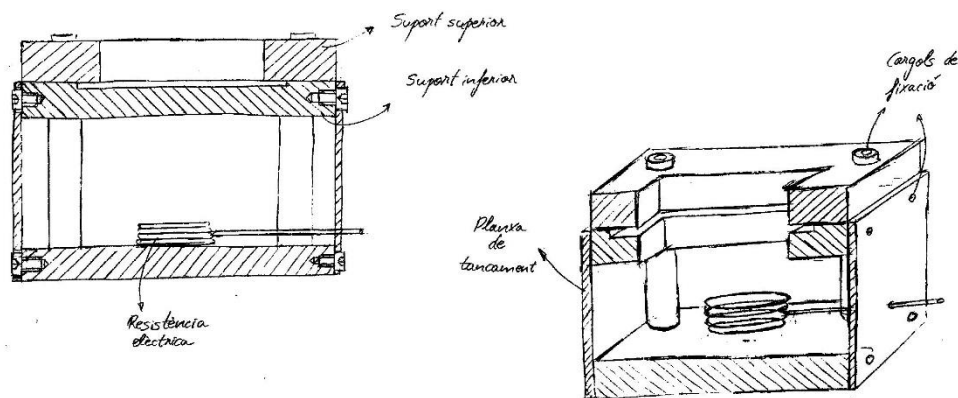


Figura 20: Concepte de geometria quadrada

Un cop estudiats els dos esbossos i plantejant de forma breu la fabricació i el muntatge, es decideix que el concepte quadrat és el més viable, ja que està format per peces més fàcils i econòmiques d'obtenir. A més, partint d'aquest concepte es pot desenvolupar un utilitatge més modular, en que es diferenciïn les parts estructurals i les parts d'aportació de calor, amb la qual cosa el muntatge i col·locació en màquina sigui més fàcil i ràpid.

ANNEX B: DESCRIPCIONS TÈCNIQUES

B.1. Part estructural

La part estructural de l'utillatge està feta amb planxes i barres d'acer inoxidable EN 1.4301, del qual es mostren les propietats mecàniques i físiques a la Taula 5. Els cargols i femelles utilitzades per les unions són d'acer inoxidable A2, nomenclatura que representa la qualitat del producte segons la norma ISO 3506-4, però equival al mateix tipus d'acer que les planxes.

Taula 5: Propietats mecàniques i físiques de l'acer inoxidable AISI-304

PROPIETATS MECÀNIQUES		
	VALORS	UNITATS
LÍMIT ELÀSTIC (S_y)	195	MPa
RESISTÈNCIA (S_{ut})	700	MPa
MÒDUL DE YOUNG (E)	$1,93 \cdot 10^5$	MPa
PROPIETATS FÍSQUES		
DENSITAT	7,9	g/cm ³
CALOR ESPECÍFIC A 20°C	500	J/kg·K
CONDUCTIVITAT TÈRMICA A 100°C	16	W/m·K

B.2. Part calefactora

Dins l'apartat de la part calefactora hi ha diferents elements que hi intervenen, dels quals s'anomenen les dades tècniques en diferents taules. Pel que fa al recobriment exterior del forn, es potprofitar la taula anterior, ja que també és d'acer inoxidable.

B.2.1. Elements aïllants

Les peces utilitzades com a material aïllant, són unes plaques de fibra ceràmica que segons la norma EN 1094-1 es classifiquen com a bases de fibres ceràmiques silico-aluminoses, dins el grup de panells refractaris. El nom comercial de les plaques utilitzades en aquesta aplicació és VF-1200/N i les propietats físiques es mostren a la Taula 6.

Taula 6: Propietats físiques de les plaques aïllants de fibra ceràmica

PROPIETATS FÍSQUES		
	VALOR	UNITATS
TEMPERATURA DE CLASSIFICACIÓ	1260	°C
DENSITAT	0,31	g/cm ³
CONDUCTIVITAT TÈRMICA		
400°C	0,08	W/m·K
600°C	0,11	W/m·K
800°C	0,15	W/m·K
1000°C	0,2	W/m·K

Dins aquest grup es pot incloure la placa de suport de la resistència tèrmica. Tot i que en aquesta aplicació només s'utilitza com a suport, també es considera un element d'aïllament tèrmic ja que té les propietats. El material utilitzat consta d'una placa amb un contingut del 42% d'alúmina premsada (A42P). Per ser més exactes, conté el 47,2% de SiO₂, el 43% de Al₂O₃ i la resta d'altres compostos en menor proporció com Fe₂O₃, MgO, TiO o CaO. A la Taula 7 es mostren algunes de les propietats físiques d'aquest material.

Taula 7: Propietats físiques del suport de la resistència

PROPIETATS FÍSQUES		
	VALOR	UNITATS
TEMPERATURA MÀX. DE TREBALL	1200	°C
DENSITAT	1,9	g/cm ³
CONDUCTIVITAT TÈRMICA		
20°C	460	W/m·K
1000°C	627	W/m·K

B.2.2. Resistència tèrmica

Les característiques de la resistència s'obtenen a partir del dimensionament que es fa posteriorment a l'annex de càlculs. Per tant, les dades de la resistència mostrades a la Taula 8 es calculen posteriorment en el càlcul del dimensionament de la resistència inclòs a l'Annex D.

Taula 8: Dades generals de la resistència tèrmica

DADES DE LA RESISTÈNCIA TÈRMICA		
	VALOR	UNITATS
POTÈNCIA	800	W
RESISTÈNCIA ELÈCTRICA (A 230 V)	66,125	Ω
\emptyset FIL	0,6	mm
\emptyset BOBINA	3,6	mm
PAS	0,42	mm
PAS RELATIU	0,708	mm
LONGITUD DE FIL	16,63	m
CAPACITAT DE CÀRREGA	3 - 4	W/cm ²

A més de les dades tècniques de la resistència, també s'ha de tenir en compte que el material té una composició química determinada. Això fa que tingui unes propietats físiques concretes.

Taula 9: Composició química de la resistència tèrmica

COMPOSICIÓ QUÍMICA DEL NIKROTHAL 80		
	Cr	Ni
PERCENTATGE NOMINAL	20 %	80 %

A la Taula 9 es poden veure els percentatges nominals dels quals està compost el Nikrothal 80. Però no acostuma a donar-se aquest cas, ja que poden incloure altres elements com el carboni, el silici, el manganès o el ferro. Llavors, aquests elements ocupen el percentatge de níquel i fan que aquest sigui menor al 80 %. Per la qual cosa, les propietats mecàniques poden variar.

Degut a les petites imprecisions de la composició química, a la Taula 10 es pot veure com es produeixen variacions bastant àmplies de les propietats mecàniques. Aquest és un problema que no produeix cap inconvenient en aquesta aplicació, ja que la resistència no ha de suportar cap força.

Taula 10: Propietats mecàniques i físiques de la resistència tèrmica

PROPIETATS MECÀNIQUES		
	VALORS	UNITATS
LÍMIT ELÀSTIC (S_y)	340 - 420	MPa
RESISTÈNCIA (S_{ut})	650 - 810	MPa
PROPIETATS FÍSQUES		
DENSITAT	8,3	g/cm ³
CALOR ESPECÍFIC A 20°C	460	J/kg·K
CALOR ESPECÍFIC A 300°C	500	J/kg·K
CONDUCTIVITAT TÈRMICA A 100°C	15	W/m·K
PUNT DE FUSIÓ	1400	°C

A part de totes les propietats físiques, mecàniques i químiques de cadascun dels elements que formen part de l'utillatge, també cal esmentar algunes dades referents al termoparell i al controlador. A continuació, la Taula 11 mostra algunes de les característiques del termoparell tipus K.

Taula 11: Dades tècniques del termoparell

DADES DEL TERMOPARELL K	
MATERIAL	Acer inoxidable
RANG DE TEMPERATURES	-40°C a 1100°C
DIÀMETRE DE SONDA	6 mm
SENSIBILITAT	42 μ V/°C

Pel que fa al controlador, tot seguit s'adjunta la fitxa tècnica amb tota la informació que es pugui necessitar en cas que en un futur es vulguin afegir noves configuracions.

Parámetros de regulador

En la tabla se muestran todos los parámetros y su significado. Según el tipo de regulador algunos parámetros carecen de significado o se omiten.

Parámetro	Campo de valores	de fábrica	Significado
Campo proporcional 1 (Pb1)	0 ... 9999 Digit	0 Digit	Tamaño del campo proporcional
Campo proporcional 2 (Pb2)	0 ... 9999 Digit	0 Digit	Con Pb = 0 la estructura del regulador no es efectiva (comportamiento como monitoreo del valor límite). En un regulador continuo debe ser Pb1 > 0.
Tiempo de acción derivada (dt)	0 ... 9999 s	80 s	Influye la parte diferencial de la señal de salida del regulador
Tiempo de restitución	0 ... 9999 s	350 s	Influye la parte integral de la señal de salida del regulador
Duración de los periodos de conmutación 1 (Cy1)	0 ... 999,9 s	20,0 s	Con salida conmutante se debe elegir el periodo de conmutación de tal forma que por una parte, el suministro de energía para el proceso sea casi continuo y, por otra, los elementos de conmutación no se vean sobrecargados.
Duración de los periodos de conmutación 2 (Cy2)	0,0 ... 999,9 s	20,0 s	
Distancia entre contactos	0,0 ... 999,9 Digit	0,0 Digit	Distancia entre los dos contactos de regulación en un regulador de tres estados
Diferencia de conmutación 1 (HyS1)	0,0 ... 999,9 Digit	1,0 Digit	Diferencia de conmutación en un regulador conmutante con un campo proporcional Pb = 0 (comportamiento como en monitoreo de valor límite)
Diferencia de conmutación 2 (HyS2)	0,0 ... 999,9 Digit	1,0 Digit	
Punto de trabajo (y0)	-100 ... +100 %	0 %	Grado de regulación en regulador P y PD (con x = w es y = y0)
Limitación del grado de regulación 1 (y1)	0 ... 100 %	100 %	Limitación máxima del grado de regulación (solo efectiva con Pb > 0)
Limitación del grado de regulación 2 (y2)	-100 ... +100 %	-100 %	Limitación mínima del grado de regulación (solo efectiva con Pb > 0)

Datos Técnicos

Entrada termopar

Denominación	Norma	Campo de medición ^a	Precisión de medición ^b	Influencia temperatura ambiente
Fe-CuNi „L“		-150 ... +900 °C	≤ 0,4 %	≤ 100 ppm/K
Fe-CuNi „J“	EN 60584	-200 ... +1200 °C	≤ 0,4 %	≤ 100 ppm/K
Cu-CuNi „T“	EN 60584	-200 ... +400 °C	≤ 0,4 %	≤ 100 ppm/K
NiCr-Ni „K“	EN 60584	-200 ... +1372 °C	≤ 0,4 %	≤ 100 ppm/K
NiCr-CuNi „E“	EN 60584	-200 ... +1000 °C	≤ 0,4 %	≤ 100 ppm/K
NiCrSi-NiSi „N“	EN 60584	-100 ... +1300 °C	≤ 0,4 %	≤ 100 ppm/K
Pt10Rh-Pt „S“	EN 60584	-40 ... +1768 °C	≤ 0,4 %	≤ 100 ppm/K
Pt13Rh-Pt „R“	EN 60584	-40 ... +1768 °C	≤ 0,4 %	≤ 100 ppm/K

Punto de comparación: interno KTY

^a Los datos se refieren a una temperatura ambiente de 20°C

^b Incl. la precisión de medición del punto interno de comparación.
La precisión se refiere al campo de medición.

Entrada termoresistencia

Denominación, tipo de conexión	Campo de medición	Precisión de medición ^a	Influencia temperatura ambiente
Pt100 DIN EN 60751 conexión a 2 hilos conexión a 3 hilos	-200 ... +650 °C	≤ 0,4 % ≤ 0,4 %	≤ 50 ppm/K
Pt1000 DIN EN 60751 conexión a 2 hilos conexión a 3 hilos	-200 ... +650 °C	≤ 0,4 % ≤ 0,4 %	≤ 50 ppm/K

Denominación, tipo de conexión	Campo de medición	Precisión de medición ^a	Influencia temperatura ambiente
KTY, R ₂₅ = 1000 Ω conexión a 2 hilos	-50 ... +150 °C	≤ 1,0 %	≤ 50 ppm/K
KTY, R ₂₅ = 2000 Ω conexión a 2 hilos	-50 ... +80 °C	≤ 1,0 %	≤ 50 ppm/K
Cu-50 conexión a 3 hilos	-50 ... +200 °C	≤ 1,0 %	≤ 50 ppm/K

Resistencia hilo de sensor: max. 30Ω en cada hilo en conexión a 3 hilos

Corriente de medición: Pt100 ca. 1 mA; Pt1000 y KTY aprox. 100 μA

Compensación de línea: no necesaria en conexión a 3 hilos. En conexión a 2 hilos se puede realizar una compensación de línea mediante una corrección del valor real.

^a Las precisiones se refieren al campo de medición.

Entrada señales normalizadas

Campo de medición	Precisión de medición ^a	Influencia temperatura ambiente
Tensión 0 ... 10 V Resistencia de entrada > 850 kΩ	≤ 0,4 %	≤ 150 ppm/K
Corriente 0(4) ... 20 mA Caída de tensión > 2,2 V	≤ 0,4 %	≤ 100 ppm/K

^a Las precisiones se refieren al alcance máximo del campo de medición

Entrada binaria

Entrada para contacto libre de potencial	abierto= inactivo; cerrado = activo
--	--

Monitorización del circuito de medición

En caso de error las salidas adoptan estados previamente definidos (configurable)

Transmisor de valores medidos	Exceso o defecto del campo de medición	Cortocircuito sensor/conductor	Rotura sensor/conductor
Termopar	*	-	*
Termo resistencia	*	*	*
Tensión 0 ... 10V	-	-	-
Corriente 4 ... 20 mA	*	*	*
Corriente 0 ... 20 mA	-	-	-

* = se reconoce - = no se reconoce

Salidas

Relee (cierre) Potencia conmutación Duración vida contacto	max. 3 A a 230 V AC de carga resistiva 150.000 conmutaciones a carga nominal 350.000 conmutaciones a 1 A 310.000 conmutaciones a 1 A y $\cos\varphi > 0,7$
Salida lógica	0/14V / 20mA max.
Tensión (opción) Señal de salida Resistencia de carga Precisión	0 ... 10V > 600 Ω < 0,5 %
Corriente (opción) Señales de salida Resistencia de carga Precisión	0 ... 20 mA / 4 ... 20 mA < 450 Ω < 0,5 %

Regulador

Tipo de regulador	Regulador de dos estados, tres estados, continuo
Estructuras de regulador	P/PI/PD/PID
Tiempo de exploración	250 ms
Convertidor A/D	Resolución 16 bit

Temporizador

Precisión de paso	0,8 % ± 10 ppm/K ± 250 ms
-------------------	---------------------------

Datos eléctricos

Suministro de corriente (interruptor de la fuente de alimentación)	AC 110 ... 240V +10/-15 %, 48 ... 63Hz AC/DC 20 ... 30V, 48 ... 63Hz
Seguridad eléctrica	según DIN EN 61010, parte 1; categoría de sobretensión III, nivel de contaminación 2
Consumo de potencia	max. 14 VA
Conexión eléctrica Sección de cable Par de apriete	Por la parte trasera a través de bornes roscados con virola de cable en forma de tubo, terminal abierto o terminal de cable monopolar hilo fino 0,25 ... 1,5 mm ² 0,5 Nm
Compatibilidad electromagnética Emisión de interferencias Resistencia a interferencias	según DIN EN 61326-1 Clase A - solo para uso industrial - Requisitos industriales
Interfaz de setup	Enchufe USB, tipo mini-B 5 polos

Requisitos para virolas y terminales de cable

Virolas de cable	con forma de tubo, sin casquillo de plástico según DIN 46228 parte 1, con casquillo de plástico según DIN 46228 parte 4
Terminales	terminal abierto de engarce a presión, según medidas de DIN 46237 para terminales cerrados de engarce a presión
Terminal de cable monopolar	según DIN 46231
En aplicaciones UL	Utilización de terminales o virolas de cable según UL 486A-B (UL listed or recognized)

Carcasa y condiciones de entorno

Tipo de carcasa	Carcasa de plástico para montaje en cuadro de mando según DIN IEC 61554 (utilización en interiores)
Medidas (frontal)	LC100: 48 mm x 48 mm; LC200: 48 mm x 96 mm (formato alto); LC300: 96 mm x 96 mm
Peso (equipamiento completo)	LC100: aprox. 150 g; LC200: aprox. 200 g; LC300: aprox. 300 g
Tipo de protección	según DIN EN 60529, parte frontal IP 65, parte trasera IP 20
Posición de uso	cualquiera
Recorte en cuadro de mando	LC100: 45 mm x 45 mm; LC200: 45 mm x 92 mm; LC300: 92 mm x 92 mm
Distancia mínima horizontal/vertical	LC100: 11 mm / 30 mm (85 mm con cable USB); LC200/LC300: 22 mm / 30 mm (85 mm con cable USB)
Profundidad de montaje	LC100: max. 95 mm; LC200/LC300: max. 80 mm
Campo de temperatura ambiente / de almacenamiento	-5 ... +55 °C / -40 ... +70 °C
Resistencia climática	Humedad rel. < 90% como media anual sin rocío
Altura de montaje	max. 2000 m sobre NN

Interfaz

Tipo de interfaz	RS485
Protocolo	Modbus RTU
Ratio de baudios	9600, 19200
Formato de datos	8 bits de datos, sin bit de paridad, 1 bit de parada
Dirección del aparato	0 ... 254
Numero de participantes	max. 32

Display de 7 segmentos

Altura de cifras LC100, LC200 LC300	Indicación superior: 10 mm; indicación inferior: 7 mm Indicación superior: 20 mm; indicación inferior: 13 mm
Color	Indicación superior: rojo; indicación inferior: verde
Posiciones	4 (incl. decimales)
Decimales	0, 1, 2 (configurable)
Rango de indicación	-1999 ... 9999

Autorizaciones/certificaciones

Marca de verificación	Entidad acreditatoria	Certificado/numero de certificación	Base inspección	Válido para
c UL us	Underwriters Laboratories	E201387	UL 61010-1, CAN/CSA C22.2 No. 61010-1	todas las versiones

B.3. Part elèctrica

Pel que fa a la part elèctrica, tots els elements que en formen part són de compra i per tant, disposen de fitxes tècniques amb diferents característiques. En aquest apartat es fa un resum de les característiques tècniques de cada element, per tal de fer referència únicament a les més rellevants per aquesta aplicació.

Tot i ser l'element que menys s'ha de manipular, és interessant saber quines característiques té l'armari utilitzat per fer el quadre elèctric, ja que si en un futur es volen fer modificacions o millores caldrà saber les limitacions d'aquest. A la Taula 12 es poden veure les dades tècniques més importants de conèixer a l'hora de plantejar algun canvi.

Taula 12: Dades tècniques de l'armari

DADES DE L'ARMARI

MATERIAL	Planxa d'acer galvanitzat d'1,2 mm de gruix
DIMENSIONS GENERALS	300 x 200 x150 mm
PES	3,95 kg
CÀRREGA MÀXIMA ADMISSIBLE	150 kg
GRAU DE PROTECCIÓ	IP66
RANG DE TEMPERATURA AMBIENT	-25°C a 40°C
TENSIÓ MÀXIMA DE TREBALL	1000 V AC

També cal destacar la informació referent als dispositius elèctrics, ja que és important conèixer els límits d'amperatge de cara a la protecció del circuit i dels propis elements. A continuació, es mostren les Taules 13, 14 i 15 amb les propietats tècniques tant de l'interruptor magnetotèrmic com del relé i la seva base, respectivament.

Taula 13: Característiques de l'interruptor magnetotèrmic

CARACTERÍSTIQUES DEL MAGNETOTÈRMIC

INTENSITAT NOMINAL	6 A
NOMBRE DE POLS	2
TIPUS DE XARXA	AC
TIPUS DE CORBA	C
FREQÜÈNCIA DE XARXA	50/60 Hz
GRAU DE PROTECCIÓ	IP20
RANG DE TEMPERATURA AMBIENT	-25°C a 60°C
TENSIÓ DE TREBALL	230/400 V AC
CATEGORIA DE SOBRETEMSIÓ	III
DURABILITAT MECÀNICA	20000 cicles
DURABILITAT ELÈCTRICA	10000 cicles

Taula 14: Característiques tècniques del relé

CARACTERÍSTIQUES DEL RELÉ	
TENSIÓ NOMINAL	230 V AC
FREQÜÈNCIA DE XARXA	50/60 Hz
INTENSITAT D'ENTRADA	3 mA a 50 Hz i 2,5 mA a 60 Hz
RANG DE TEMPERATURA AMBIENT	-40°C a 85°C
TEMPS DE REACCIÓ	3 - 12 ms
RESISTÈNCIA DE LA BOBINA	32500 Ω \pm 15% (a 20°C)
TIPUS DE CONTACTES	2 contactes commutats
DURABILITAT MECÀNICA	1·10 ⁷ cicles
DURABILITAT ELÈCTRICA	1·10 ⁵ cicles

Taula 15: Característiques de la base del relé

CARACTERÍSTIQUES DE LA BASE DEL RELÉ	
TENSIÓ NOMINAL	300 V AC/DC
INTENSITAT NOMINAL	12 A
RANG DE TEMPERATURA AMBIENT	-25°C a 85°C

A banda d'aquests dispositius que, en certa manera, treballen de forma automàtica, també hi ha l'interruptor del forn que treballa de forma manual per l'acció de l'usuari que faci funcionar l'utilitatge. Aquest tipus d'interruptor també té uns límits de treball, mostrats a la Taula 16, que s'han de respectar.

Taula 16: Característiques de l'interruptor

CARACTERÍSTIQUES DE L'INTERRUPTOR	
TENSIÓ NOMINAL	220 - 240 V AC
INTENSITAT DE TREBALL	12 A
INTENSITAT TÈRMICA	16 A
FUSIBLE DE PROTECCIÓ	20 A
NOMBRE DE POLS	1

ANNEX C: CÀLCULS DE RESISTÈNCIA ESTRUCTURAL

C.1. Dades inicials

Per demostrar que la part estructural de l'utilatge aguantarà les forces aplicades durant el procés de deformació, s'han fet els càlculs dels coeficients de seguretat per falla estàtica i per falla a fatiga de la *Base inferior de l'estructura*.

Per fer els càlculs s'ha suposat que el material de l'estructura és EN 1.4301, amb un límit elàstic de 195 MPa i una resistència de 700 MPa.

Tal i com es pot veure a la Figura 21, a la realitat hi ha una força aplicada que va canviant de posició sobre la planxa que s'està deformant. En casos molt extrems aquesta força pot arribar a 1,5 kN, per tant, s'ha fet el càlcul suposant aquest valor.

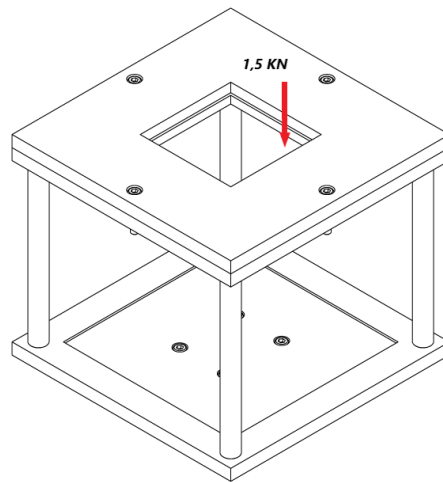


Figura 21: Estructura amb una força aplicada de 1,5 kN

A partir d'aquesta informació, es pot entendre que quan la força estigui molt propera a un dels *Pilars de suport*, aquesta reaccionarà directament contra la *Base inferior de l'estructura* i es produirà un moment flector respecte els dos eixos horitzontals. Per tant, es pot suposar que la meitat de la força produirà moment respecte un eix i l'altre meitat de la força respecte l'altre eix.

Com s'ha dit anteriorment, la peça que acaba rebent tots els esforços és la *Base inferior de l'estructura* a través dels *Pilars de suport*. Si s'observa l'alçat i el perfil del conjunt estructural, es pot observar que la distància dels *Pilars de suport* fins al punt de recolzament amb la taula dinamomètrica no és simètrica. La qual cosa fa que respecte un dels dos dels eixos horitzontals de la *Base inferior de l'estructura* es produeixi un moment flector més gran que en l'altre. A les

Figures 22, 23 i 24 es poden veure les diferents distàncies entre l'alçat, el perfil i la planta amb els eixos que hi intervenen.

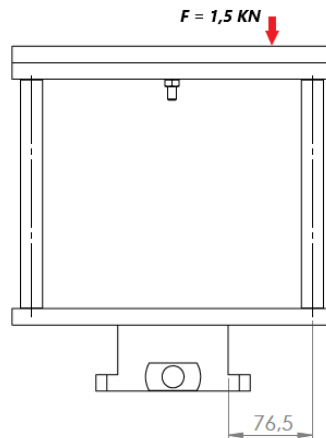


Figura 22: Alçat del conjunt amb la cota del pilar al punt de recolzament

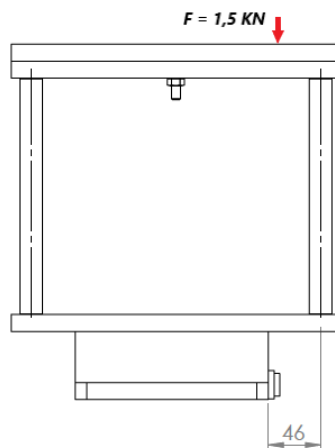


Figura 23: Perfil del conjunt amb la cota del pilar al punt de recolzament

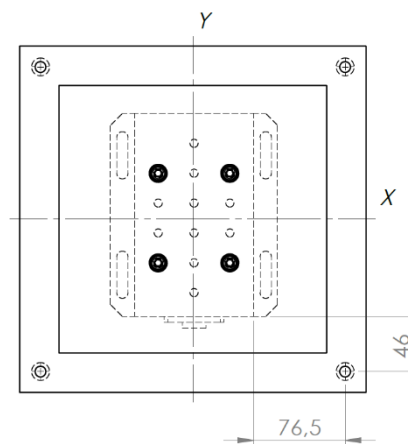


Figura 24: Planta del conjunt amb els eixos de coordenades

Com que la cota més gran és la de 76,5 mm, una força aplicada a aquesta distància provocarà un moment flector superior, respecte la de 46 mm. Per tant, per fer el càlcul de tensions, s'ha agafat una secció equivalent rectangular de 46 mm d'amplada i 12,5 mm d'alçada, ja que és un valor que produeix una inèrcia geomètrica més baixa i és el cas més desfavorable. A la Figura 25 es pot veure un vista de detall de la secció més desfavorable.

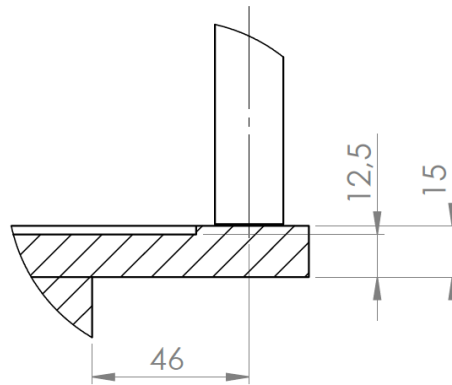


Figura 25: Vista de detall real de la secció considerada

A la Taula 17 es poden consultar un resum de les dades corresponents al material, la geometria i la força aplicada a la peça.

Taula 17: Conjunt de dades de l'aplicació

DADES	VALORS	UNITATS
Sut	700	MPa
Sy	195	MPa
Alçada	12,5	mm
Amplada	46	mm
Distància entre forats flector	76,5	mm
Força	1,5	KN

C.2. Càlculs realitzats

C.2.1. Falla estàtica

Com s'ha fit anteriorment, hi ha una força de 1,5 KN generada pel punxó que no canvia ni de direcció ni de sentit, però sí que va variant la seva posició. Per tant, els esforços es repartiran de diferent forma entre els diversos *Pilars de suport*, la qual cosa farà que a la *Base inferior de l'estructura* es produeixi fatiga. A la Figura 26, s'observa la força aplicada en un dels punts d'unió de la *Base inferior de l'estructura*.

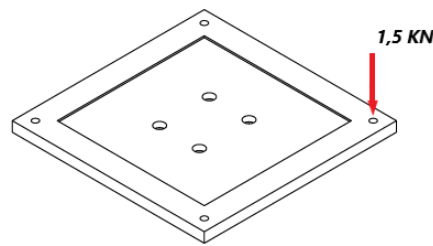


Figura 26: Força aplicada sobre la base inferior de l'estructura

Pel que fa als esforços generats a la secció més desfavorable de la peça, a continuació es mostren les equacions de la força tallant (V) i el moment flector (M). Aquestes equacions es complementen amb la Figura 27, la qual mostra el sentit en el qual es produeixen els esforços. Cal recordar que se suposa que la força es reparteix entre els dos costats i, per tant, es considera la meitat per fer el càlcul.

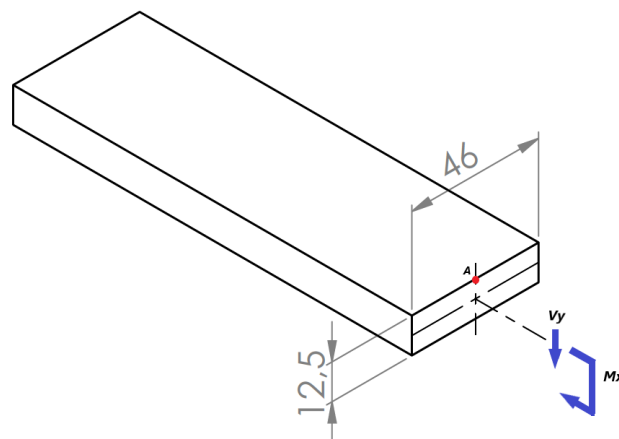


Figura 27: Secció considerada

$$V = \frac{F}{2} = \frac{1,5 \text{ KN}}{2} = 0,75 \text{ KN}$$

$$M = \frac{F}{2} \cdot d = \frac{1,5}{2} \cdot 76,5 = 57,375 \text{ KNmm}$$

A continuació, es mostra el càlcul de les inèrcies i les tensions degudes als moments flector. S'escull el punt A per fer els càlculs, ja que és el punt on la tensió deguda al tallant és nul·la i el moment flector és màxim.

$$y (\text{centre de masses}) = \frac{12,5}{2} = 6,25 \text{ mm}$$

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{3} = \frac{46 \cdot 12,5^3}{3} = 29947,916 \text{ mm}^4$$

$$\sigma(Mx) = \frac{Mx \cdot y}{I_x} = \frac{57375 \cdot 6,25}{29947,916} = 11,97 \text{ MPa}$$

Com que el càlcul es realitza en el primer punt de contacte de amb la taula dinamomètrica, els forats dels cargols no hi intervenen. Per tant, no s'ha de tenir en compte la concentració de tensions deguda als forats.

Finalment, es calcula el coeficient de seguretat a partir de la tensió de Von Misses. Com que es traca d'un cas amb estat de tensions biaxial, se seguirà el següent procediment:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{11,97^2 + 3 \cdot 0^2} = 11,97 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{195}{11,97} = 16,29$$

Segons els càlculs realitzats, es pot observar que l'estructura aguantarà sense cap problema en el cas estàtic, tenint un coeficient de seguretat de 16,29.

C.2.2. Falla a fatiga

Com s'ha dit anteriorment, el punxó va girant i sempre hi ha un moment en què una part de l'estructura no rep la totalitat de la força i es podria negligir. Per tant, es fa la suposició que en la secció escollida la força puntual varia de 0 a 0,75 KN.

Utilitzant les mateixes fórmules que a la part de falla estàtica, es fa el càlcul de tensions degudes al moment flector per una força de 0 i 0,75 KN. A més, es realitza el càlcul de les tensions mitjanes i alternes.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

A continuació es mostra la Taula 18, on hi apareixen les tensions màximes, mínimes, mitjanes i alternes degudes al flector.

Taula 18: Tensions degudes al moment flector

TENSIONS (MPa)	MÍNIMA	MÀXIMA	MITJANA	ALTERNA
$\sigma(\text{Mx})$	0	11,97	5,985	5,985

En no haver-hi tensions combinades ni concentració de tensions, el càlcul se simplifica molt. És a dir, només cal aplicar Von Misses als valors trobats anteriorment.

$$\sigma a' = \sqrt{\sigma a^2 + 3 \cdot \tau a^2} = \sqrt{5,985^2 + 3 \cdot 0^2} = 5,985 \text{ MPa}$$

$$\sigma m' = \sqrt{\sigma m^2 + 3 \cdot \tau m^2} = \sqrt{5,985^2 + 3 \cdot 0^2} = 5,985 \text{ MPa}$$

Per poder trobar el coeficient de seguretat a fatiga, abans s'ha de calcular la resistència a fatiga, la qual depèn de diversos factors que ses van explicant tot seguit.

$$Se = Se(pr) \cdot Ka \cdot Kb \cdot Kc \cdot Kd \cdot Ke$$

$Se(pr)$ és la resistència de prova, la qual depèn del material que s'hagi assajat i en algun cas de la resistència a tracció. Pel cas que s'està estudiant, el material és acer i per trobar la resistència de prova s'ha de tenir en compte la resistència a tracció.

$$Se(pr) \approx 0,5 \cdot Sut \quad \text{si} \quad Sut \leq 1400 \text{ MPa}$$

$$Se(pr) \approx 700 \text{ MPa} \quad \text{si} \quad Sut \geq 1400 \text{ MPa}$$

Per tant, el cas que s'està tractant tindrà la següent resistència de prova:

$$Se(pr) = 0,5 \cdot Sut = 0,5 \cdot 700 = 350 \text{ MPa}; \quad Sut(700 \text{ MPa}) \leq 1400 \text{ MPa}$$

Pel que fa al factor de superfície Ka , és valor que depèn de la resistència i de l'acabat superficial de la peça. A la Taula 19, es poden observar les diferents opcions:

Taula 19: Paràmetres del factor de superfície

ACABAT SUPERFICIAL	A (MPa)	B
Rectificat	1,58	-0,086
Mecanitzat o estirat en fred	4,45	-0,265
Estirat en calent	56,1	-0,719
Forja	271	-0,995

Com que tot el conjunt està format per peces a mida, aquestes se'ls ha hagut de fer alguna operació de fresa. Per tant, s'escullen els paràmetres corresponents a un acabat superficial mecanitzat.

$$Ka = a \cdot Sut^b = 4,45 \cdot 700^{-0,265} = 0,7841$$

El factor Kb és el factor de dimensions o probabilitat i depèn del diàmetre de la peça. Però si no és circular es calcula un diàmetre equivalent.

$$d_{eq} = 0,808 \cdot \sqrt{h \cdot b} = 0,808 \cdot \sqrt{12,5 \cdot 46} = 19,375$$

$$Kb = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,107} \quad \text{si } 2,79 < d < 51$$

$$Kb = 0,859 - 0,000837 \cdot d \quad \text{si } 51 < d$$

$$Kb = \left(\frac{19,375}{7,62}\right)^{-0,107} = 0,905$$

El factor de càrrega Kc no acostuma a aplicar-se, ja que normalment val 1 i no varia el valor de la resistència a fatiga. Però en càrregues axials pot ser 0,85 o 0,923. En aquest cas no es tindrà en compte, ja que no hi ha càrregues axials.

També hi ha el factor Kd que fa variar la resistència per l'acció de la temperatura. Fins a 250°C aquest factor val 1, però a mesura que va augmentant la temperatura s'ha d'aplicar una fórmula que relaciona les resistències a tracció en funció de la temperatura de treball i la temperatura ambient (20°C). Per aquesta aplicació, s'arriben a temperatures properes a 300°C, però la zona de l'utilatge que s'està estudiant si trencarà, treballarà a temperatura ambient.

Finalment, hi ha el factor Ke, que és un factor d'efectes diversos. Només s'aplica en casos molt específics, però també es pot suposar com la inversa de la concentració de tensions ($Ke=1/Kf$) i aplicar-ho a la fórmula de la resistència a fatiga. Com que en aquest cas no es té en compte la concentració de tensions, el valor de Ke es considera 1.

Per tant, si es recullen tots els factors i s'introdueixen a la fórmula de la resistència, quedaria de la següent forma:

$$Se = Se(pr) \cdot Ka \cdot Kb \cdot Kc \cdot Kd \cdot Ke = 350 \cdot 0,7841 \cdot 0,905 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 248,35 \text{ MPa}$$

Amb totes les dades justificades, ara ja es pot calcular el factor de seguretat per fatiga:

$$n = \frac{1}{\frac{\sigma a'}{S_e} + \frac{\sigma m'}{S_{ut}}} = \frac{1}{\frac{5,985}{248,35} + \frac{5,985}{700}} = 30,62$$

Es pot observar que degut als cicles que pateix, la peça no es trencarà, però sempre s'ha de fer la comprovació estàtica. Per fer aquesta comprovació s'ha de calcular la tensió de Von Mises a partir de les tensions degudes al flector i al torsor màxim. Com que en aquest cas, coincideix amb els valors del cas estàtic calculat anteriorment, es pot afirmar que no trencarà.

El fet que surtin uns coeficients de seguretat tan alts és perquè l'espai on es produeixen els esforços és molt reduït. Amb la qual cosa, els moments flectors no són gaire grans en comparació amb el límit elàstic i la resistència del material.

D'altra banda, si s'hagués plantejat un model en què hi apareguessin moments flectors i torsors, haurien sortit resultats molt irreal. Ja que s'hauria hagut de considerar tot l'ample de la base per poder fer creure que hi ha un torsor.

ANNEX D: CÀLCULS DE DIMENSIONAMENT DEL FORN I LA RESISTÈNCIA TÈRMICA

D.1. Dades inicials

En aquest annex s'explica de forma detallada com es dimensiona el petit forn que s'encarrega d'escalfar les planxes abans de ser deformades. És a dir, es calcula la potència calorífica necessària a partir de la temperatura que s'ha d'assolir i les dimensions de les parets.

Un cop trobada la potència necessària per arribar a la temperatura desitjada, es busca la resistència bobinada que caldria a partir d'unes pautes que estableix un fabricant d'aquest tipus de resistències. Per aquesta aplicació s'utilitza una resistència de fil bobinat de la marca Kanthal.

A la Taula 20 es poden veure les dades dimensionals i tèrmiques corresponents als dos materials principals que formen el forn. Com a dades addicionals s'ha d'afegir que l'interior del forn ha d'arribar a 300°C i l'exterior es manté a una temperatura de 25°C

Taula 20: Dades dimensionals i tèrmiques dels materials del forn

	RECOBRIMENT EXTERIOR D'ACER	RECOBRIMENT INTERIOR D'AÏLLANT
Llargada (mm)	222,4	220
Alçada (mm)	162,4	160
Gruix (mm)	1,2	50
Conductivitat tèrmica (W/K·m)	16	0,15

En una part del càlcul s'ha de tenir en compte la conducció de la calor per convecció. Per tal d'establir com un factor de seguretat, s'escull el coeficient de convecció més gran per l'aire que és 25.

També s'estudien les pèrdues de calor a través de la planxa que s'escalfa i que posteriorment s'haurà de deformar. Per fer el càlcul, s'utilitza l'aliatge de magnesi AZ-31 que té una conductivitat tèrmica de 96 W/K·m i un gruix de 5 mm.

D.2. Dimensionaments

D.2.1. Dimensionament del forn

Per fer el dimensionament del forn, es fa com si es tractés d'un forn convencional per fer tractaments tèrmics. La diferència és que aquest té una obertura superior que només està tapada per la planxa que s'ha de deformar, amb la qual cosa es generen més pèrdues de calor que s'han de tenir en compte.

El primer càlcul que s'ha de fer és el de les àrees útils a través de les quals hi haurà pèrdues de calor per conducció. Com que es tracta d'un cub, es calcula l'àrea de les parets laterals, superior

i inferior de les planxes d'acer i de material aïllant. A més també es calcula l'àrea útil de la planxa d'aliatge de magnesi AZ-31 que es vol deformar i l'àrea interior del forn, on es produeix transmissió de calor per convecció.

$$A. \text{ aïllant} = (220 \cdot 160 \cdot 4) + (220^2 \cdot 2) = 237600 \text{ mm}^2 = 0,2376 \text{ m}^2$$

$$A. \text{ acer} = (222,4 \cdot 162,4 \cdot 4) + (222,4^2 \cdot 2) = 243394,56 \text{ mm}^2 = 0,24339456 \text{ m}^2$$

$$A. \text{ magnesi} = (120^2) = 14400 \text{ mm}^2 = 0,0144 \text{ m}^2$$

$$A. \text{ interior (convecció)} = (120 \cdot 60 \cdot 4) + (120^2 \cdot 2) = 57600 \text{ mm}^2 = 0,0576 \text{ m}^2$$

Un cop es tenen totes les àrees, es calculen les resistències tèrmiques de conducció per l'acer i l'aïllant, i de convecció tan a l'interior com a l'exterior. Per fer-ho, s'utilitzen les següents fórmules:

$$R. \text{ conducció} = \frac{e}{k \cdot A}$$

On e [m] és el gruix de les parets, k [W/K·m] és el coeficient de conductivitat del material, i A [m²] és l'àrea útil de la paret.

$$R. \text{ convecció} = \frac{1}{A \cdot h}$$

On A [m²] torna a ser l'àrea útil de la paret i h [W/K·m²] és el coeficient de convecció de l'aire.

$$R. \text{ conducció aïllant} = R1 = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{0,15 \cdot 0,2376} = 1,4029 \text{ K/W}$$

$$R. \text{ conducció acer} = R2 = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 0,24339} = 3,08142 \cdot 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$R. \text{ convecció interior} = R3 = \frac{1}{0,0576 \cdot 25} = 0,6944 \text{ K/W}$$

$$R. \text{ convecció exterior} = R4 = \frac{1}{0,24339 \cdot 25} = 0,164342 \text{ K/W}$$

$$R. \text{ total} = R1 + R2 + R3 + R4 = 2,262013 \text{ K/W}$$

Un cop es tenen totes les resistències tèrmiques calculades, es fa la suma per obtenir el valor total de resistència, amb el qual es pot saber el flux de calor que travessa les parets del forn. Es calcula aplicant la fórmula següent:

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{total}} = \frac{(300 - 25)}{2,262013} = 121,573 \text{ W}$$

El resultat obtingut de flux de calor seria l'equivalent a la potència necessària si s'estigués tractant el cas d'un forn convencional de tractaments tèrmics, però en aquesta aplicació s'estudia un forn amb un forat a la part superior on s'hi situa una planxa que posteriorment s'haurà de deformar. Per tant, s'han de tenir en compte unes pèrdues de calor a través de la planxa.

Per fer-ho, se segueix el mateix procediment que pel càlcul del flux de calor. És a dir, buscant les resistències tèrmiques per conducció i convecció de la planxa, i obtenint el valor de pèrdues a partir de la suma total de resistències.

$$R_{conducció\ planxa} = R5 = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{96 \cdot 0,0144} = 3,6169 \cdot 10^{-3} \text{ K/W}$$

$$R_{convecció\ planxa} = R6 = \frac{2 \cdot 1}{0,0144 \cdot 25} = 5,5555 \text{ K/W}$$

La resistència a convecció es multiplica per dos perquè es considera el mateix valor a dins i a fora, ja que l'àrea de la planxa no varia.

$$R_{total\ planxa} = R5 + R6 = 5,55917 \text{ K/W}$$

$$Q_{pèrdues} = \frac{\Delta T}{R_{total\ planxa}} = \frac{(300 - 25)}{5,55917} = 49,4678 \text{ W}$$

Finalment, per obtenir la potència mínima que li caldria al forn només cal sumar el flux de calor que travessa les parets i les pèrdues degudes a la planxa que es vol escalfar.

$$Potència = Q + Q_{pèrdues} = 121,573 + 49,4678 = 171,0409 \text{ W}$$

Aquesta valor és el que necessitaria el forn per arribar als 300°C, però amb una resistència que donés aquesta potència caldria bastant de temps per assolir la temperatura de consigna. A més, paral·lelament al desenvolupament d'aquest projecte, s'ha plantejat la possibilitat que en un

futur es vulguin fer proves amb elements més grans com serien les pròtesis de cranis, amb la qual cosa es necessitaria un forn més gran. Fent els càlculs amb les dimensions corresponents, s'obtidria una potència al voltant dels 400 W.

Per tant, tenint en compte la problemàtica del temps necessari per arribar a la consigna i la possibilitat d'aprofitar la resistència en un forn més gran, es decideix fer un forn amb una potència de 800 W.

D.2.2. Dimensionament de la resistència tèrmica

Anteriorment, s'ha comentat que per fer el dimensionament de la resistència s'utilitzaria el manual tècnic que el fabricant de resistències Kanthal posa a la disposició dels clients, perquè cadascú pugui triar la resistència que més li convé.

Per començar, cal saber quina resistència elèctrica ha de tenir. Per això, només cal aplicar les fórmules de la llei d'Ohm.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{800}{230} = 3,478 \text{ A}$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{230}{3,478} = 66,125 \Omega$$

A continuació, s'aniran explicant el passos que se segueixen a partir del manual tècnic per tal de trobar: \emptyset fil, \emptyset bobina, pas i longitud de la resistència. Cal dir, que el tipus de fil que s'utilitza per fer la bobina és un aliatge de crom i níquel que s'anomena Nikrothal 80, el qual té les característiques que es mostren a la Figura 28. També es poden veure de forma més resumida a l'Annex B.

KANTHAL AND NIKROTHAL BASIC DATA

	KANTHAL APM™	KANTHAL®			NIKROTHAL®				
		A-1	AF	D	80	70	60	40	
Max continuous operating temp. °C	1425	1400	1300	1300	1200	1250	1150	1100	
Nominal composition, %	Cr	22	22	22	22	20	30	15	20
	Al	5.8	5.8	5.3	4.8	-	-	-	-
	Fe	balance	balance	balance	balance	-	5%	balance	balance
	Ni	-	-	-	-	balance	balance	60	35
Resistivity at 20°C, Ωmm ² m ⁻¹	1.45	1.45	1.39	1.35	1.09	1.18	1.11	1.04	
Density, g/cm ³	7.10	7.10	7.15	7.25	8.3	8.1	8.2	7.9	
Coefficient of thermal expansion, K ⁻¹	20-750°C	14 × 10 ⁻⁶	14 × 10 ⁻⁶	14 × 10 ⁻⁶	14 × 10 ⁻⁶	16 × 10 ⁻⁶	16 × 10 ⁻⁶	16 × 10 ⁻⁶	18 × 10 ⁻⁶
	20-1000°C	15 × 10 ⁻⁶	15 × 10 ⁻⁶	15 × 10 ⁻⁶	15 × 10 ⁻⁶	17 × 10 ⁻⁶	17 × 10 ⁻⁶	17 × 10 ⁻⁶	19 × 10 ⁻⁶
Thermal conductivity at 20°C, Wm ⁻¹ K ⁻¹	13	13	13	13	15	13	13	13	
Specific heat capacity at 20°C, KJkg ⁻¹ K ⁻¹	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.50	
Melting point, °C	1500	1500	1500	1500	1400	1380	1390	1390	
Mechanical properties (approx.)*									
Tensile strength, N mm ⁻²	680	680	680	650	810	820	730	675	
Yield point, N mm ⁻²	470	475	475	450	420	430	370	340	
Hardness, Hv	230	230	230	230	180	185	180	180	
Elongation at rupture, %	20	18	18	18	30	30	35	35	
Tensile strength at 900°C, N mm ⁻²	40	34	37	34	100	120	100	120	
Creep strength at 800°C	11	6	8	6	15	15	15	20	
	at 1000°C	3.4	1	1.5	1	4	4	4	4
Magnetic properties	magnetic (curie point 600°C)				non	non	slightly	non	
Emissivity, fully oxidized condition	0.70	0.70	0.70	0.70	0.88	0.88	0.88	0.88	

* The values given apply for wire sizes of 4 mm diameter for the Kanthal alloys and of 1 mm for the Nikrothal alloys

Figura 28: Taula de característiques del Nikrothal 80

Per poder escollir el diàmetre de fil, abans s'ha de tenir un rati que demana el fabricant. Aquest rati es calcula a partir de la relació entre l'àrea d'escalfament del conductor, A_c [cm²], i la resistència a temperatura ambient, $R_{20^\circ C}$ [Ω]. Però com que aquestes dades normalment no es tenen, es posa a disposició una fórmula que ho aproxima de la següent forma:

$$\frac{A_c}{R_{20^\circ C}} = \frac{I^2 \cdot Ct}{p} = \frac{3,478^2 \cdot 1,03}{3} = 4,153 \text{ cm}^2/\Omega \text{ a } 20^\circ C$$

On I [A] és la intensitat que s'ha trobat anteriorment, Ct és una constant que depèn de la temperatura a la qual hagi de treballar la resistència i p [W/cm²] és la càrrega superficial de la resistència. A la Figura 29 es pot veure que la càrrega superficial de la resistència pel tipus de muntatge escollit varia entre 3 i 4 W/cm² i a la Figura 30 es mostra que el valor Ct a una temperatura de 300°C és de 1,03.

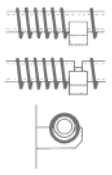
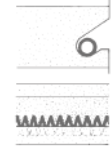
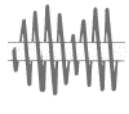

Element systems	WIRE ELEMENTS			
	Spiral	Spiral	Porcupine	Rod over bend
Supports	Ceramic tubes	Grooves	Ceramic tubes	Metallic rods
				
Material	Sillimanite	Chamotte grade 28	Sillimanite	Kanthal APM™
Max. furnace temperature, °C	1300	1250	800	1300
Max. wall loading at 1000°C furnace temperature, kW/m²	40	35	-	50
Max. surface load at 1000°C furnace temperature, W/cm²	3-4	3-4	-	5-6
Wire diameter, d, mm	2.0-6,5	2.0-5.0	1.0-6.5	≥ 5.0
Strip thickness, t, mm	-	-	-	-
Strip width, w, mm	-	-	-	-
Outer coil diameter, D, mm	12-14 d	5-6 d	-	-
Max. loop length at 1000°C furnace temperature, mm	-	-	-	250
Min. pitch at max. loop length, mm	3d	2d	3d	40

Figura 29: Dades de la resistència en funció del tipus de muntatge

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
C _T	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07

Figura 30: Constant de temperatura

Un cop trobada la relació entre l'àrea d'escalfament i la resistència a 20°C (4,153 cm²/Ω a 20°C), a la taula representada a la Figura 31 es dedueix que el diàmetre del fil necessari ha de ser 0,60 mm. Amb aquesta taula també s'obtenen altres paràmetres, amb les quals es poden seguir fent la resta de càlculs.

Dia- meter mm	Resistance at 20 °C Ω/m	cm²/Ω ⁽¹⁾ at 20 °C	Weight g/m	Surface area cm²/m	Cross sectional area mm²
1.3	0.821	49.7	11.0	40.8	1.33
1.2	0.964	39.1	9.39	37.7	1.13
1.0	1.39	22.6	6.52	31.4	0.785
0.95	1.54	19.4	5.88	29.8	0.709
0.90	1.71	16.5	5.28	28.3	0.636
0.85	1.92	13.9	4.71	26.7	0.567
0.80	2.17	11.6	4.17	25.1	0.503
0.75	2.47	9.55	3.67	23.6	0.442
0.70	2.83	7.76	3.19	22.0	0.385
0.65	3.28	6.22	2.75	20.4	0.332
0.60	3.86	4.89	2.35	18.8	0.283
0.55	4.59	3.77	1.97	17.3	0.238
0.50	5.55	2.83	1.63	15.7	0.196
0.45	6.85	2.06	1.32	14.1	0.159
0.40	8.67	1.45	1.04	12.6	0.126

Figura 31: Taula d'obtenció del diàmetre de fil

Una altra dada que cal saber és la longitud del fil. Per calcular-la, només s'ha de fer la relació entre la resistència elèctrica que s'ha trobat al principi i la resistència a la temperatura de treball.

$$R_T = Ct \cdot R_{20^\circ C} = 1,03 \cdot 3,86 = 3,9758 \Omega/m$$

$$L = \frac{R}{R_T} = \frac{66,125}{3,9758} = 16,63 \text{ m}$$

Segons les operacions realitzades, la longitud del cable hauria de ser d'uns 16,63 m.

Per poder saber en quins canals s'ha de muntar la resistència, abans s'hauria de saber el diàmetre de la bobina. És a dir, el diàmetre exterior que ha de tenir la resistència un cop s'hagi bobinat el fil. Per buscar-lo, s'ha de complir amb una relació entre el diàmetre de la bobina i el del fil, en funció de la temperatura de treball del forn. A continuació es mostren dues condicions de les resistències dels forns industrials, de les quals se n'ha de complir una.

$$\frac{\varnothing_{bobina}}{\varnothing_{fil}} = 6 \quad \text{si } T < 1000^\circ C$$

$$\frac{\varnothing_{bobina}}{\varnothing_{fil}} = 5 \quad \text{si } T > 1000^\circ C$$

Com que la temperatura màxima de treball d'aquest forn és 300°C, s'utilitzarà la primera condició. Aplicant aquesta fórmula, s'obté un diàmetre exterior de bobina de 3,6 mm.

$$\varnothing_{bobina} = 6 \cdot \varnothing_{fil} = 6 \cdot 0,6 = 3,6 \text{ mm}$$

Finalment, els dos termes que faltarien per completar les dades de la resistència són: el pas i el pas relatiu. Tal i com es diu a la Figura 23, el pas de la bobina muntada en una canal ha de ser el doble del diàmetre del fil. Per tant, tenint en compte els paràmetres calculats fins ara, el pas i el pas relatiu serien els següents:

$$s \text{ (pas)} = 2 \cdot d = 2 \cdot 0,6 = 1,2 \text{ mm}$$

$$r \text{ (pas relatiu)} = \frac{s}{d} = \frac{1,2}{0,6} = 2$$

Per concloure, es podria fer la comprovació de la càrrega superficial (p). És a dir, en el càlcul del rati que s'ha fet anteriorment per poder trobar el diàmetre de fil, s'ha utilitzat un valor aproximat extret d'una taula de dades que dona el fabricant. L'operació que es realitza a continuació serveix per comprovar si el valor escollit s'acosta a la realitat.

$$p = \frac{P}{A_{C/m} \cdot L} = \frac{800}{18,85 \cdot 16,63} = 2,55 \text{ W/cm}^2$$

$$A_{C/m}(\text{superfície per metre}) = \pi \cdot d \cdot 10 = \pi \cdot 0,6 \cdot 10 = 18,85 \text{ cm}^2/m$$

Si s'observen les operacions anteriors, es pot veure que la càrrega superficial tabulada va de 3 a 4 W/cm^2 . Per tant, amb un valor 2,55 W/cm^2 es pot dir que les operacions s'han realitzat correctament, ja que no s'allunya gaire del valor teòric escollit per fer els càlculs (3 W/cm^2).

Cal afegir que tots els paràmetres trobats són dades teòriques. Per tant, és possible que quan s'hagi de comprar la resistència, alguns dels valors calculats canviïn, ja que els fabricants i distribuïdors no sempre tenen estoc del que es necessita o, simplement, no és un valor estàndard i no es fabrica. Tot i així, no és una qüestió que hagi de produir preocupació, ja que des del principi s'ha dit que la resistència està sobredimensionada i podrà realitzar la seva funció sense cap problema.

ANNEX E: CÀLCULS DE DIMENSIONAMENT DEL CABLE ELÈCTRIC

E.1. Dades inicials

Per poder fer un quadre de comandament elèctric segur pels elements actuadors i per les persones que el manipulen, s'ha hagut de fer un previ dimensionament del cablejat elèctric i els elements de seguretat que hi ha incorporats.

Pels càlculs realitzats, s'ha considerat la potència escollida per la resistència tèrmica que és de 800 W i que tot el conjunt treballarà amb la tensió de xarxa de 230 V.

E.2. Dimensionament del cable i els dispositius de seguretat

Per trobar la intensitat que pot passar a través de la resistència quan aquesta treballi a càrrega màxima, s'ha aplicat la fórmula de la potència elèctrica de la Llei d'Ohm.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{800 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 3,478 \text{ A}$$

Tenint en compte que la potència de 800 W és la màxima a la que pot arribar la resistència, s'obté una intensitat nominal de 3,478 A. A partir d'aquest resultat se segueix el dimensionament considerant la següent condició.

$$I \leq I_n \leq I_z$$

On la intensitat de càlcul (I) ha de ser inferior o igual a la intensitat del dispositiu de protecció (I_n) i alhora, aquesta ha de ser inferior o igual a la màxima que pot suportar el cable (I_z).

Per tant, a continuació s'ha d'escollir un interruptor automàtic magnetotèrmic comercial amb una intensitat superior a la calculada. El dispositiu de protecció amb una intensitat més baixa, però per sobre de la calculada, i que es pot trobar al mercat és de 6 A.

Finalment, només caldria escollir la secció del cable elèctric a partir de la intensitat màxima que aquest pugui suportar. Per seguir una metodologia acceptada, s'utilitza la taula de les *Intensitats admissibles per conductors de Coure a l'aire de 40°C* que apareix al *Reglament Elèctric de Baixa Tensió* (REBT). El tipus de muntatge més semblant al que es fa és l'E, ja que s'utilitzarà un cable multiconductor a l'aire lliure, concretament dos cables de PVC. Per tant, segons la Figura 32 es pot veure com la intensitat mínima que ha de suportar el cable per ser superior a la de protecció és de 18 A. Amb la qual cosa, la secció dels conductors hauria de ser de 1,5 mm².

A		Conductores aislados en tubos empotrados en paredes aislantes		3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR							
A2		Cables multiconductores en tubos empotrados en paredes aislantes	3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR								
B		Conductores aislados en tubos ²⁾ en montaje superficial o empotrados en obra				3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR					
B2		Cables multiconductores en tubos ²⁾ en montaje superficial o empotrados en obra		3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR							
C		Cables multiconductores directamente sobre la pared ¹⁾				3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR					
E		Cables multiconductores al aire libre ²⁾ . Distancia a la pared no inferior a 0.3D ³⁾					3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR					
F		Cables unipolares en contacto mutuo ⁴⁾ . Distancia a la pared no inferior a D ⁵⁾					3x PVC			3x XLPE o EPR ¹⁾					
G		Cables unipolares separados mínimo D ⁵⁾								3x PVC ¹⁾		3x XLPE o EPR			
			mm ²	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Cobre			1,5	11	11,5	13	13,5	15	16	-	18	21	24	-	
			2,5	15	16	17,5	18,5	21	22	-	25	29	33	-	-
			4	20	21	23	24	27	30	-	34	38	45	-	-
			6	25	27	30	32	36	37	-	44	49	57	-	-
			10	34	37	40	44	50	52	-	60	68	76	-	-
			16	45	49	54	59	66	70	-	80	91	105	-	-
			25	59	64	70	77	84	88	96	106	116	123	166	-
			35		77	86	96	104	110	119	131	144	154	206	-
			50		94	103	117	125	133	145	159	175	188	250	-
			70				149	160	171	188	202	224	244	321	-
			95				180	194	207	230	245	271	296	391	-
			120				208	225	240	267	284	314	348	455	-
			150				236	260	278	310	338	363	404	525	-
185				268	297	317	354	386	415	464	601	-			
240				315	350	374	419	455	490	552	711	-			
300				360	404	423	484	524	565	640	821	-			

Figura 32: Intensitats admissibles per conductors de coure a 40°C

ANNEX F: SIMULACIONS I PROVES REALS

F.1. Simulacions

Per tal de poder determinar el comportament de l'aportació de calor a l'interior del nou utillatge, s'han realitzat algunes simulacions mitjançant el programa ANSYS 19.1 (Versió d'estudiant). L'objectiu principal d'aquestes proves és observar la distribució de temperatures dins l'utillatge. També serveix per comprovar que amb els resultats del dimensionament i les dades de les quals es parteixen, es podran assolir els objectius de temperatura desitjada, encara que els valors obtinguts no siguin exactes a la realitat.

Per fer-ho, s'ha partit de les dades dels materials que s'utilitzaran en cada punt de l'utillatge, com el calor específic, la conductivitat tèrmica i la densitat. Els materials, en concret, són l'AZ-31 per la planxa a deformar i el silicat càlcic per les parets i terra de l'utillatge. A la resistència també se li han introduït les dades corresponents al Nikrothal 80 (80% Ni – 20 % Cr).

F.1.1. Geometria

Per fer les simulacions s'han considerat dues peces: el cos de l'utillatge i la resistència calefactora. S'han unit aquestes dues peces i, per fer-ho més senzill, s'ha considerat que l'interior de l'utillatge està ple d'aire i l'exterior és sòlid.

Cal afegir que les dimensions del cos no són les que s'utilitzaran a la realitat, sinó que és més gran per poder observar millor els resultats de distribució de l'aire. També s'ha de dir que la forma de la resistència no és la correcta, ja que en realitat és una bobina que ressegueix tota la superfície de la base, però per fer una simulació més senzilla s'ha partit d'una geometria tubular amb un diàmetre interior, un diàmetre exterior i una alçada concretes. A la Figura 33 es poden veure les dues peces unides, formant una única geometria.

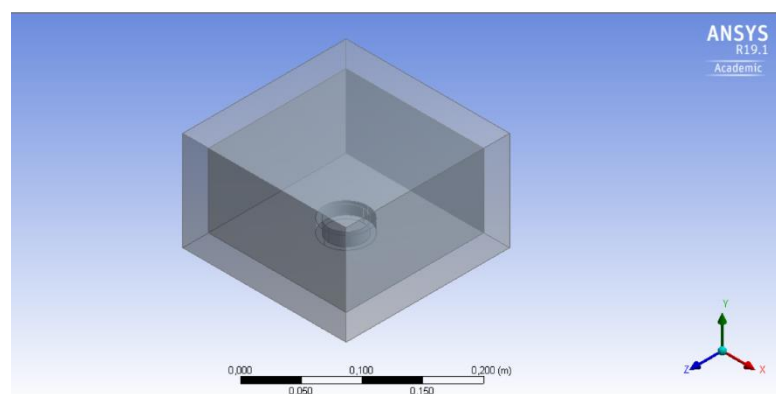


Figura 33: Geometria de partida

F.1.2. Mallat

A l'hora de construir el mallat s'ha activat únicament la part de la geometria formada per aire, és a dir, l'interior de l'utiltatge. També se li ha ordenat al programa que construis la malla a les superfícies que formen el cos principal i la resistència.

Finalment, s'ha creat unes seleccions que seran útils per realitzar les condicions de contorn. És a dir, a aquestes seleccions se'ls introduiran unes dades que interaccionaran amb tot el conjunt i donaran uns resultats determinats. Concretament, les seleccions que s'han creat són les següents:

- Aire_solid_top: Correspon a la planxa superior que s'ha de deformar i té les propietats de l'aliatge de mercuri d'AZ-31.
- Aire_solid_bottom: És la base de silicat càlcic que suporta la resistència calefactorsa.
- Aire_solid_laterals: Són les parets laterals de l'utiltatge que també estan formades de silicat càlcic.
- Resistència: Equival a totes les superfícies que formen la resistència calefactorsa de Nikrothal 80. A la Figura 34 s'observen les superfícies que formen la resistència.

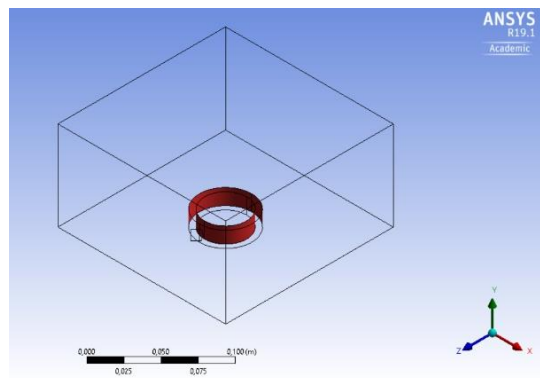


Figura 34: Superfícies de la resistència

Un cop finalitzat el procés de creació de seleccions, es forma el mallat de tot el forn a partir de la unió entre el cos i la resistència, tal i com es pot observar a la Figura 35.

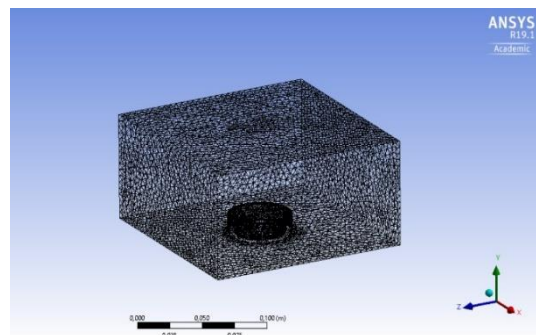


Figura 35: Mallat complert

F.1.3. Condicions de contorn

Per introduir les condicions de contorn s'han utilitzat diferents models. El més bàsic és l'equació de l'energia; després hi ha el de radiació, concretament el P1; i el model de viscositat k-epsilon.

Pels càlculs de transferència de calor s'activen el model de l'equació de l'energia i el de radiació, ja que van bastant lligats. En els quadres de diàleg de les seleccions creades anteriorment, s'hi han d'introduir dades corresponents a aquests dos models, com els coeficients de convecció i radiació, o la temperatura ambient.

Pel que fa al model de viscositat k-epsilon de dues equacions, permet determinar la longitud de turbulència i una escala de temps mitjançant dues equacions. El model que dona per defecte el programa (Standard) és efectiu en fluxos turbulents. Com que en aquesta aplicació hi ha importants diferències en la densitat de l'aire, fa que aquest vagi circulant i es pugui considerar que el flux és turbulent, per tant, el model serà efectiu. A la Figura 36 es poden veure les diferents constants utilitzades en el mode k-epsilon Standard. Cal afegir que també s'ha considerat una gravetat en l'eix de les y de -9.8 m/s^2 .

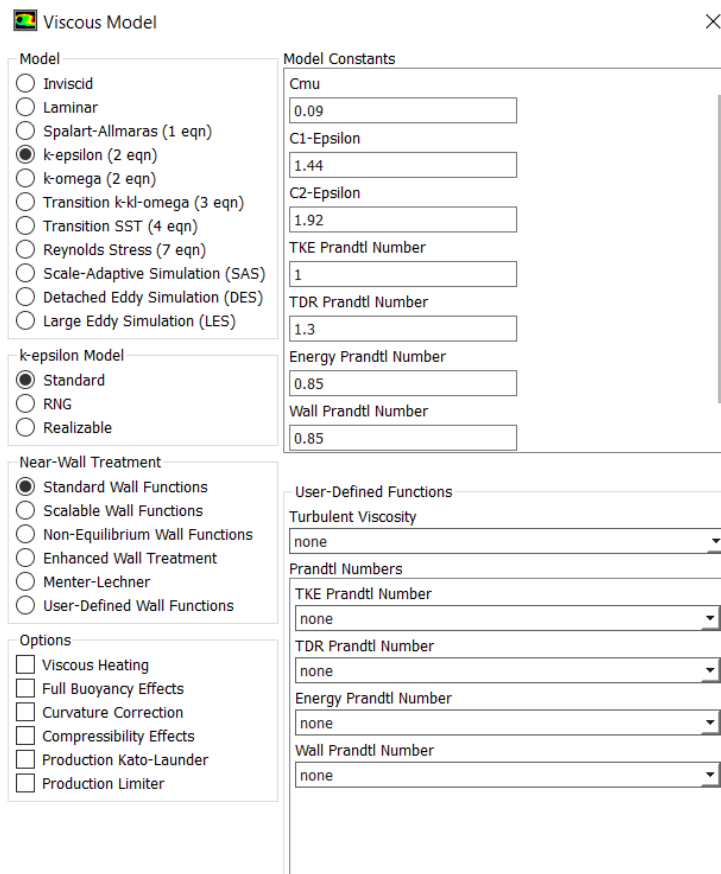


Figura 36: Constants del model k-epsilon Standard

Com s'ha dit anteriorment, s'han d'introduir les característiques que tenen totes les superfícies que intervenen en les simulacions. És a dir, donar valors a les seleccions que es creen durant el procés de mallat.

Per exemple, a les parets laterals (aire_solid laterals) se li defineix el silicat càlcic com a material, se li dona un gruix de 50 mm i se selecciona una condició tèrmica de convecció i radiació. Dins la pestanya de condicions tèrmiques, tal i com es pot veure a la Figura 37, s'imposa una temperatura de l'aire de 27°C o 300 K, i un coeficient de transferència de calor de 20 W/m²·K. Pel que fa a la base, es mantindrien les mateixes condicions i propietats. En canvi, a la planxa superior el material seria l'aliatge de magnesi AZ-31 i el gruix 5 mm.

The image shows the 'Wall' dialog box in ANSYS Fluent, specifically the 'Thermal' tab. The 'Zone Name' is 'aire_solid_laterals' and the 'Adjacent Cell Zone' is 'aire'. The 'Thermal Conditions' section has 'Mixed' selected. The parameters are: Heat Transfer Coefficient (w/m2-k) is 20, constant; Free Stream Temperature (k) is 300, constant; External Emissivity is 1, constant; External Radiation Temperature (k) is 300, constant; Internal Emissivity is 1, constant; Wall Thickness (m) is 0.05; Heat Generation Rate (w/m3) is 0, constant. There is a 'Shell Conduction' checkbox which is unchecked, with '1 Layer' and an 'Edit...' button. The 'Material Name' is 'silicat-calcic' with an 'Edit...' button. At the bottom are 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons.

Figura 37: Propietats tèrmiques de la selecció aire_solid_laterals

Per fer les simulacions s'ha suposat que les parets i la base de l'utilatge estan formades per plaques de silicat càlcic i tot el conjunt té unes dimensions interiors de 160x160x85 mm i un gruix de parets de 50 mm. S'ha de dir que són unes mides molt superiors a les suposades en el dimensionament, però com s'ha comentat al principi d'aquest annex, es pretén que les simulacions serveixin per observar com és distribueixen les temperatures a l'interior de l'utilatge. A més, amb els càlculs realitzats ja se sap que s'assolirà la temperatura de consigna, ja que la resistència s'ha sobredimensionat.

Finalment, per la resistència que ha d'escalfar la planxa se simula com un petit cilindre de Ø55/50x30 mm amb una potència de 800 W.

A continuació, a la Taula 21 es mostren les propietats tèrmiques dels materials anomenats i a la Taula 22 algunes dades de la resistència utilitzada en la simulació.

Taula 21: Dades dels materials utilitzats en la simulació

MATERIAL	DENSITAT (kg/m³)	CALOR ESPECÍFIC, Cp (J/kg·K)	CONDUCTIVITAT TÈRMICA (W/m·K)
AZ31	1770	1001	96
SILICAT CÀLCIC	270	840	0.072

Taula 22: Dades de la resistència en la simulació

DADES DE LA RESISTÈNCIA	VALOR	UNITATS
POTÈNCIA	800	W
Ø EXTERIOR	55	mm
Ø INTERIOR	50	mm
ALÇADA (h)	30	mm

Seguidament, es mostren els càlculs per trobar el valor de capacitat de càrrega superficial de la resistència, la qual s'ha d'introduir a la selecció resistència del programa. Per fer-ho, primer es calcula tota la superfície de la resistència i després es fa la relació entre la potència i aquesta àrea. D'aquesta manera se sap la quantitat de calor que es desprèn per centímetre quadrat.

$$A = \frac{\pi \cdot (\varnothing_{ext.}^2 - \varnothing_{int.}^2)}{4} + \pi \cdot h \cdot (\varnothing_{ext.} + \varnothing_{int.}) = \frac{\pi \cdot (55^2 - 50^2)}{4} + \pi \cdot 30 \cdot (55 + 50) = 10308.346 \text{ mm}^2 = 103.083 \text{ cm}^2$$

$$Q = \frac{P}{A} = \frac{800 \text{ W}}{103.083 \text{ cm}^2} = 7.76 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Un cop trobat el valor de càrrega superficial de la resistència, s'introdueix a la finestra de les respectives condicions de contorn, tal i com es pot veure a la Figura 38.

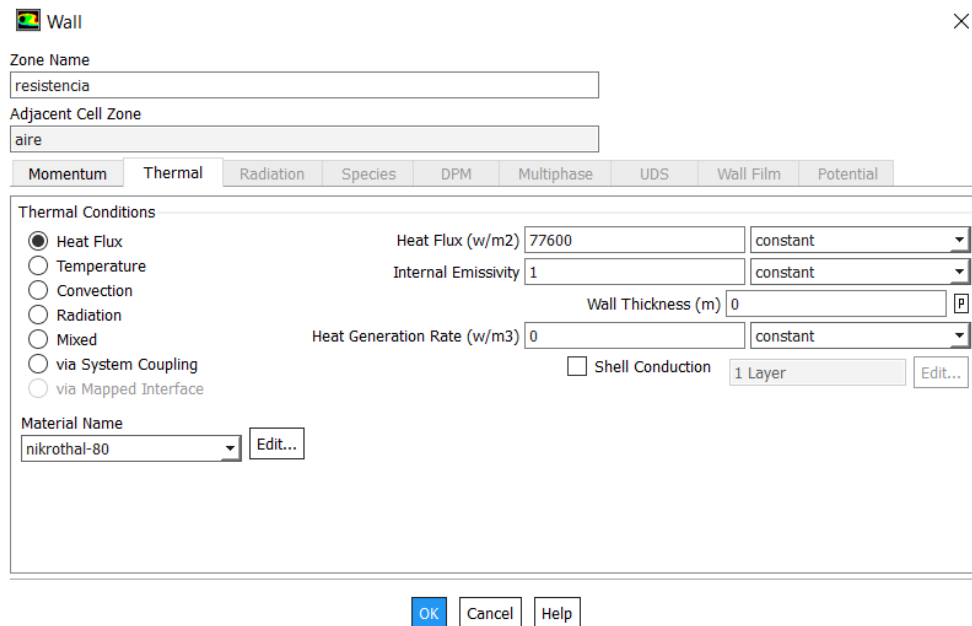


Figura 38: Condicions de contorn de la resistència

Com es pot observar, el valor calculat s'introdueix a la casella flux de calor amb les unitats corresponents, dins la selecció de resistència. També se li assigna el material Nikrothal 80.

F.1.4. Resultats

Un cop introduïts tots els valors anteriors al programa i deixant-ho calcular, s'obtenen els següents resultats. Per poder-los analitzar de forma més fàcil, s'ha creat un pla vertical que travessa l'utilatge per la meitat. D'aquesta manera, es poden observar diferents valors de temperatura en aquesta superfície.

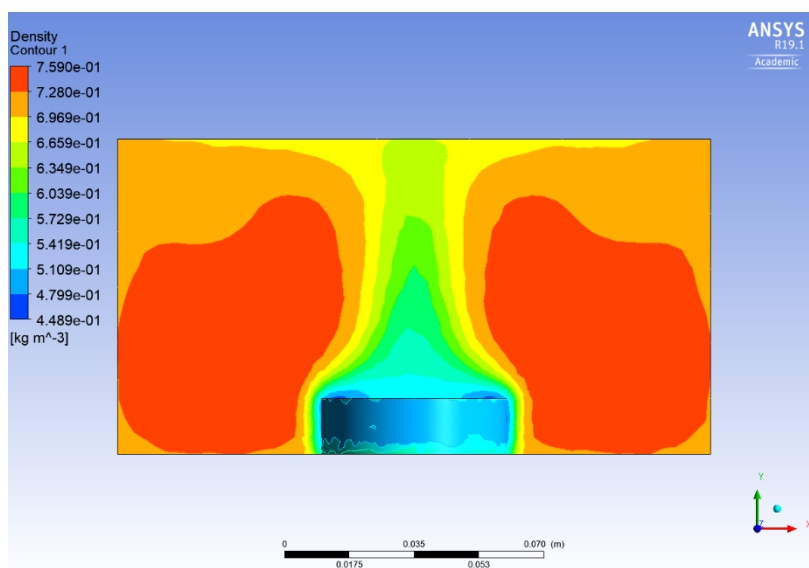


Figura 39: Distribució de densitats dins el forn

La Figura 39 mostra com varia la densitat de l'aire al llarg de tota l'alçada del forn. Complementant aquesta imatge amb la següent, es pot observar que l'augment de la temperatura està relacionat amb la reducció de la densitat de l'aire.

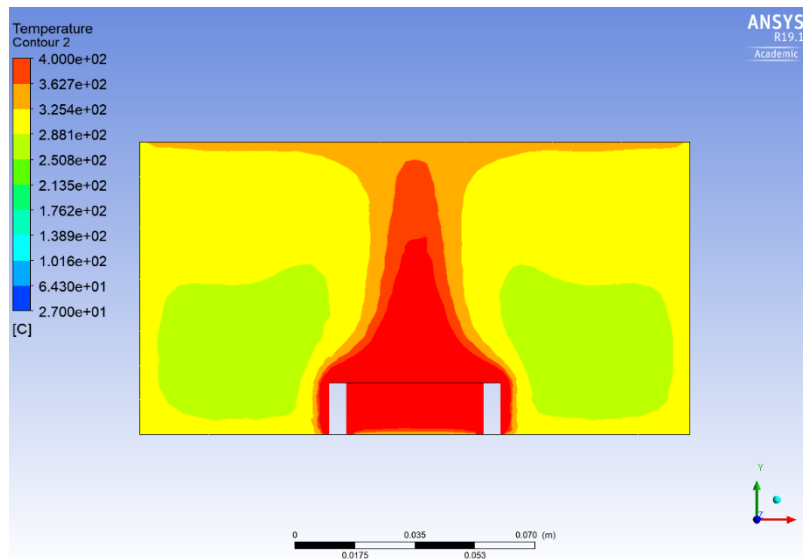


Figura 40: Distribució de temperatures dins el forn

A la Figura 40 es pot veure com la temperatura de l'aire a l'interior del forn arriba als 300°C. No obstant, la temperatura que més interessa és la de la superfície exterior de la planxa, que amb la simulació feta no es pot saber amb exactitud. Tot i així, es pot suposar que la temperatura de la superfície serà la desitjada, ja que les planxes són molt primes i la calor les podrà travessar fàcilment per conducció tèrmica.

D'altra banda, s'ha de considerar que el tipus de resistència utilitzada per fer la simulació no és la que es fa servir habitualment en aquest tipus d'aplicacions, ja que no són tan eficients com per arribar a temperatures tan elevades en poc temps. Per tant, amb la resistència escollida a l'Annex D, es pot afirmar que en els experiments reals no hi hauria d'haver cap inconvenient per assolir la temperatura de consigna.

F.2. Proves reals

Per tal de deixar l'utilatge a punt pels usuaris finals, s'ha decidit realitzar algunes proves reals al laboratori del parc tecnològic amb els recursos de quals disposen. D'aquesta manera també es pretén donar validesa al projecte. Aquestes proves consisteixen en donar diferents temperatures de consigna al controlador i observar els valors registrats pel termoparell a l'interior del forn i per la càmera termogràfica a l'exterior de la superfície de la planxa.

Un cop fetes les proves de verificació, dependrà del propi client l'ús que en vulgui donar. És a dir, independentment de les proves de comprovació que es realitzin i els ajustatges que hagi calgut fer, cadascú s'ha d'encarregar de programar el controlador perquè realitzi les funcions que desitgi, o simplement indicar la temperatura a la qual ha de finalitzar l'escalfament.

F.2.1. Comprovacions i muntatge

Abans de començar, s'ha realitzat un petit assaig per comprovar que s'han fet bé les connexions del quadre elèctric i la configuració del controlador de temperatura. Aquesta prova ha consistit en programar el controlador de temperatura perquè s'arribi a un valor de 40°C i després s'aturi la resistència.

A la Figura 41 es pot comprovar perfectament com la resistència canvia de color degut a l'augment de temperatura. A més, el resultat d'aquesta petita prova és satisfactori, ja que el relé es desactiva quan s'arriba als 40°C.

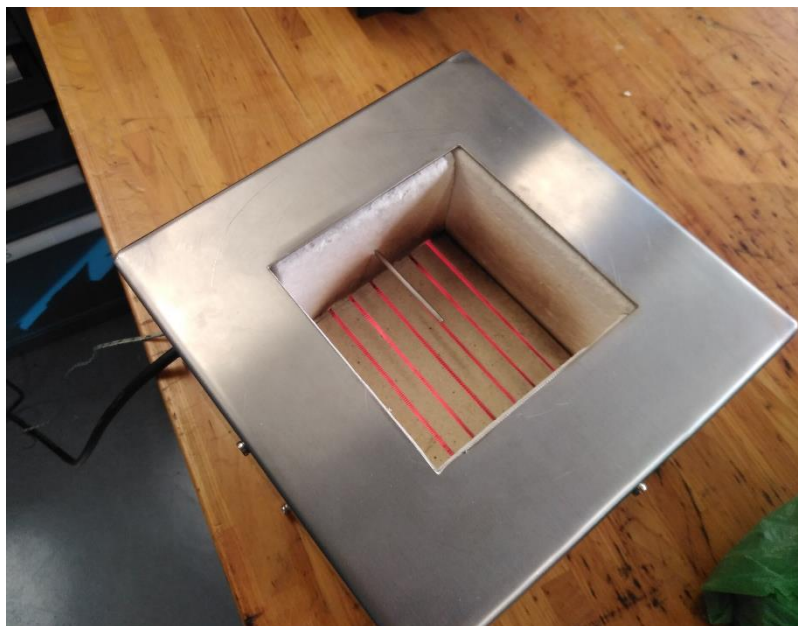


Figura 41: Forn en funcionament

Un cop feta aquesta comprovació, s'ha procedit a fer el muntatge de tot l'utillatge. El qual consisteix en col·locar les peces de la part estructural al voltant de la part calefactora. A la Figura 42, es pot veure el forn situat dins la caixa de la *Base inferior de l'estructura*, l'extensió del forn just a sobre d'aquesta i els *Pilars de suport* aguantant la *Base superior de l'estructura*, la qual també té una caixa que manté l'extensió centrada. Cal afegir que els *Pilars de suport* s'aguanten a les bases mitjançant cargols.



Figura 42: Part estructural subjectant la part calefactors

Un cop centrada la part calefactors dins la part estructural, cal col·locar la planxa que s'ha d'escalfar per la prova en el seu allotjament. Concretament, s'ha utilitzat una planxa d'acer inoxidable EN 1.4301 que s'ha situat a la caixa de la *Fixació*.

Per acabar el muntatge, es col·loca la *Fixació* a sobre la *Base superior de l'estructura* i es fixa amb cargols i femelles. A la Figura 43 es pot veure l'utilatge complet amb la planxa d'acer inoxidable fixada.



Figura 43: Utilatge complet amb la planxa fixada

F.2.2. Resultats de les proves

Com s'ha dit anteriorment, s'ha realitzat un experiment amb l'objectiu de comprovar si s'ha fet un bon dimensionament de l'aïllament i si la resistència treballa correctament. A més, aquest test ha servit per observar la diferència de temperatures entre l'interior del forn i la superfície exterior de la planxa.

La prova que s'ha realitzat consisteix en establir diverses consignes de temperatura al regulador i comparar els valors enregistrats pel termoparell i la càmera termogràfica. S'ha començat amb 100°C s'ha anat incrementant la temperatura en 50°C fins arribar als 250°C.

A la Figura 44 es mostra la primera imatge captada per la càmera termogràfica, en què es pot observar clarament com la planxa rep tota l'escalfor generada per la resistència. També es pot veure una escala de colors que indica la temperatura de les superfícies. En aquest cas, la temperatura de la planxa és d'uns 50°C, la primera etapa de la prova.

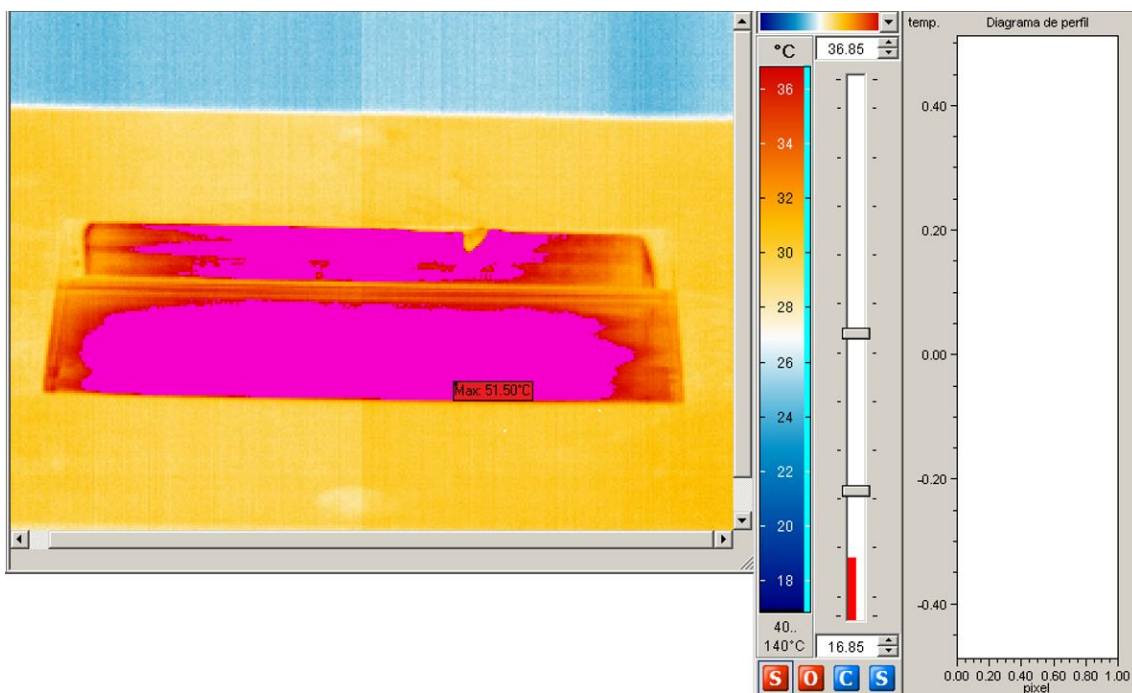


Figura 44: Imatge captada per la càmera termogràfica en moments inicials de la prova

A la següent etapa s'incrementa la temperatura 50°C. A la Figura 45 només s'aconsegueix apreciar que hi ha un augment de temperatura gràcies a l'indicador que apareix al centre de la planxa. També es pot veure com gairebé tota la superfície té el mateix color, per tant la calor queda ben repartida.

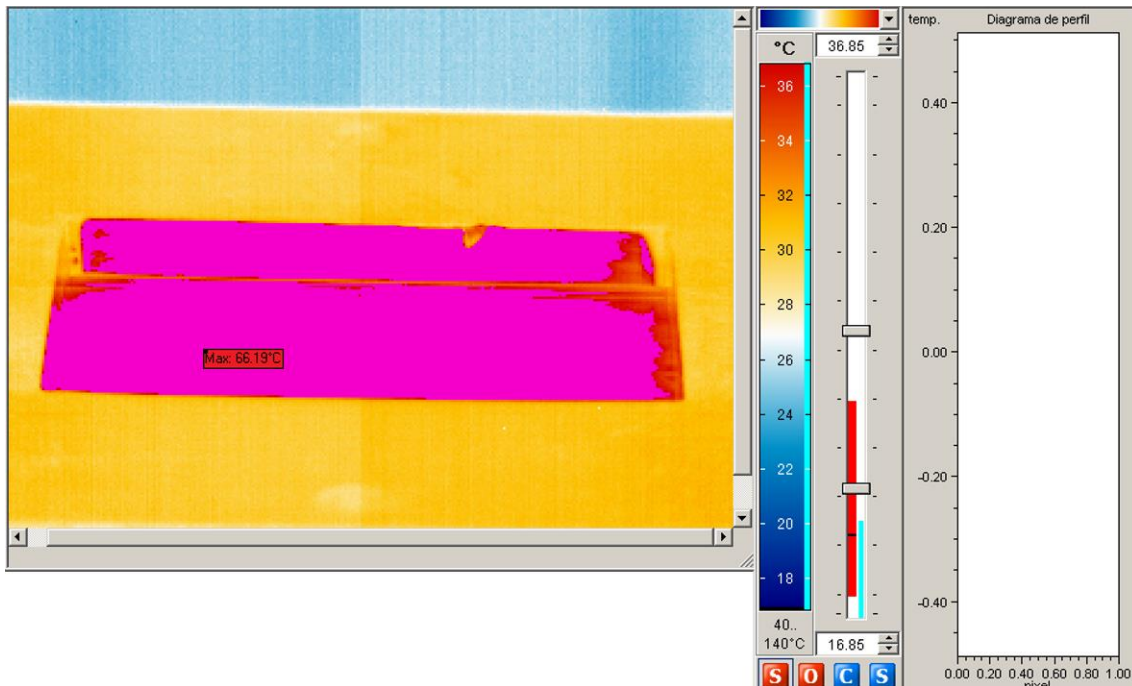


Figura 45: Imatge captada quan la resistència està a 150°C

Finalment, quan la resistència assoleix els 250°C, es pot veure a la Figura 46 com tota la regió que ocupa la planxa està a una temperatura molt elevada i repartida de manera uniforme. També s'observa com la *Fixació* s'escalfa, però no es pot considerar una situació extremadament perillosa ja que no s'arriba als 34°C.

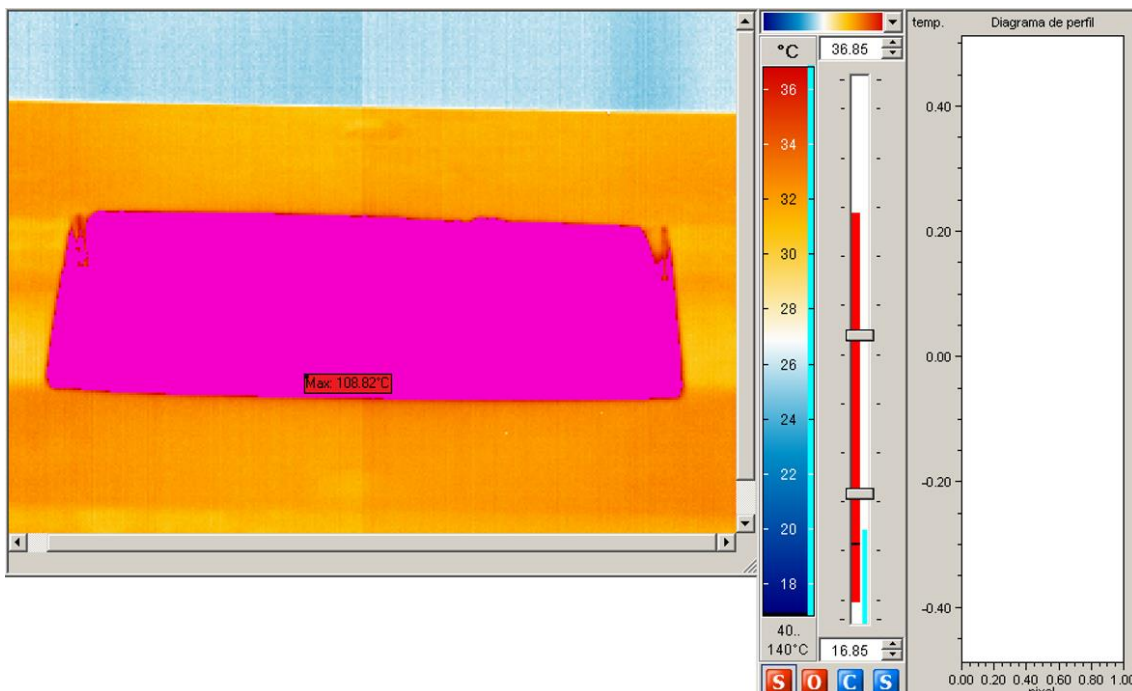


Figura 46: Imatge en l'última etapa de l'experiment

Per concloure, a la Taula 23 es mostra un quadre resum comparant els dos registres obtinguts, a partir d'una temperatura de consigna determinada.

Taula 23: Quadre comparatiu de temperatures

TEMPERATURA DE CONSIGNA (°C)	TERMOPARELL K (°C)	CÀMERA TERMOGRÀFICA (°C)
100	120	56
150	160	67
200	210	90
250	272	109

S'observa clarament que la diferència de temperatura entre l'interior del forn i l'exterior de la planxa és notable. En part, són uns resultats que ja s'esperaven, ja que el termoparell està situat a una distància molt propera a la resistència, i rep directament l'escalfor que desprèn; en canvi, la planxa està separada a una distància considerable, la qual cosa provoca un alentiment en el temps d'escalfament.

Aquests i altres factors com poden ser el tipus d'aïllant utilitzat en el complement de l'extensió del forn, la potència de la resistència, el material de la planxa que s'està assajant o el gruix, poden afectar de forma indirecta en aquestes diferències de diferències de temperatura. Per tant, abans de poder fer experiments de deformació incremental amb aportació de calor de forma regular, seria necessari documentar com es veu afectada la diferència de temperatura en funció de paràmetres que puguin variar en cada prova, com pot ser el tipus de material i el gruix de la planxa. La qual cosa es podria solucionar programant el controlador amb els requisits que es demanin en cada cas.

ANNEX G: MANUAL D'USUARI I MANTENIMENT

G.1. Manual d'usuari

Aquest annex, de forma similar al plec de condicions, mostra un conjunt de requisits que ha de seguir l'usuari perquè el projecte final tingui validesa. A més, s'afegeixen consells de manteniment perquè l'utilatge pugui durar més temps.

A continuació, s'anomenen una sèrie de passos que l'usuari ha de seguir abans, durant i després de cada prova d'escalfament-deformació.

- Primer, es munta tot el conjunt segons els passos que se segueixen en el plec de condicions. Abans de posar l'última peça que completa el muntatge del conjunt, s'ha de col·locar la planxa que es vol deformar en el seu centratge. Un cop s'ha fet això, es posa la fixació al damunt i es cargola a la base superior. Si la planxa no fos prou gruixuda i no quedés ben fixada, s'haurien de posar unes planxes complementaries que aporten més gruix i assegurin la subjecció.
- Tot seguit, es posa lubricant líquid sobre la planxa i es procedeix a iniciar la prova. No hi ha cap mesura de volum exacta pel lubricant, el suficient perquè mulli tota la planxa.
- Per encendre el forn, cal endollar el quadre elèctric a la xarxa i activar-lo amb l'interruptor. Si el controlador està programat per l'experiment en qüestió, es pot procedir a realitzar la prova.
- En el moment que s'encén el forn no es pot manipular cap component de l'utilatge fins que no s'hagi acabat la prova. És una qüestió de seguretat, ja que el forn està dissenyat perquè escalfi la planxa fins a valors propers a 300°C.
- Quan s'observi a través del controlador que s'assoleix la temperatura desitjada, s'ha d'aturar el forn i iniciar el procés de deformació.
- Quan s'hagi trencat la planxa, i per tant hagi finalitzat la prova, s'ha d'aturar el procés de deformació i s'ha de deixar refredar la planxa durant 10 minuts.
- Passats els 10 minuts, ja es pot descargolar la fixació i retirar la proveta amb molta cura de no vessar l'oli dins el forn. Cal dir que en el muntatge del forn es col·loca una planxa de mica a l'interior per evitar els inconvenients de les vessades d'oli sobre la resistència.
- Si es té la intenció de seguir fent proves, es pot col·locar una altra planxa i repetir el procés. En canvi, si es volen finalitzar els experiments, s'ha d'aturar la fresadora i deixar refredar el forn durant 30 minuts.

- Un cop passat aquest temps o el suficient per manipular l'utillatge sense perill de patir cremades, ja es pot desmuntar tot el conjunt.

En cas de tenir dificultats per programar el controlador, es poden realitzar els experiments de forma manual. És a dir, aturant el forn a través de l'interruptor quan s'observi que la planxa arriba a la temperatura desitjada, a través de la càmera termogràfica.

G.2. Manual de manteniment

A la Taula 24 es defineixen una sèrie d'accions que cal realitzar perquè l'utillatge pugui durar molt de temps i, perquè els experiments que es realitzin es puguin executar sense cap impediment tècnic. També es defineix la freqüència de les operacions de manteniment.

Taula 24: Operacions i freqüència de manteniment

OPERACIÓ	FREQÜÈNCIA	COMENTARIS
Neteja exterior	Una vegada per prova o conjunt de proves	Cada vegada que es desmunti l'utillatge, es fregarà amb un drap l'estructura i el forn per treure els esquitxos d'oli.
Lubricar	En cada prova	Cada planxa que es deformi ha d'estar lubricada abans d'iniciar l'experiment.
Revisió unions	Cada 6 mesos	Al cap d'un temps les rosques es poden malmetre de tant cargolar i descargolar, i s'ha de comprovar el seu estat.
Canvi planxa de mica	Un cop cada 3 mesos, o abans si es realitzen proves més sovint	Els esquitxos d'oli que cauen a l'interior del forn queden atrapats a la planxa de mica i s'ha de canviar cada cert temps.