Projecte de Fi de Carrera

Enginyer de Materials

Guia Interactiva de les tecnologies de soldadura per arc elèctric de metalls amb simulador de composició de soldeig d'acers

MEMÒRIA

Autor: Oscar Moya Rojo
Director: Jose Maria Cabrera Marrero
Convocatòria: Setembre 2015

ETSEIB

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

UPC

Resum

Aquest projecte es no sols una feina de projecte de recerca d'informació sobre soldeig si no que el seu objectiu es disposar d'una eina de consulta de fàcil accés per la gent interessada a realitzar alguna estructura mecanosoldada.

Per poder complir amb l'objectiu principal de ser aquesta **eina de consulta de fàcil accés**, es va decidir recollir tota l' informació en format de pàgina web amb codificació HTML5 (àmpliament conegut per qualsevol internauta) permetent la seva edició futura per qualsevol que vulgui aportar i/o completar la feina realitzada fins al moment.

Per arribar a un públic ample es va optar per presentar l' informació amb un llenguatge pla i de poca complexitat tècnica de tal manera que gent sense coneixements en processos metal·lúrgics pugui ser capaç de trobar la documentació intel·ligible. Es per això que no es un simple recull d''informació sinó que s'han hagut de fer interpretacions i simplificacions per poder remarcar el punts d'interès per un soldador novel.

L'eina (webtool) aquí presentada s'ha estructurat de la manera en que de forma natural un possible usuarianiria trobant-se amb dubtes a l'hora de fer la seva primera soldadura com poden ser:

- Paràmetres importants del procés de soldeig
- Quina seria la tecnologia adequada per l'aplicació (SMAW, GMAW, GTAW, FCAW o SAW) i quins equips es necessiten per cada una d'elles?
- Quins defectes es poden generar a les soldadures?
- Els paràmetres importants per una execució ideal de la soldadura i quina seria la composició de la unió soldada?

En qualsevol cas al llarg d'aquesta memòria s'aborden altres punts d'interès que son de difícil simplificació per poder-ho incloure a la webtool com ara simulació tèrmica transitòria i estacionaria de la soldadura per comparar amb models analítics.

Sumari

RESUM 1

SUMARI 3

1. PREFACI 5

1.1. Origen del projecte 5
1.2. Motivació 5
1.3. Requeriments previs 5

2. INTRODUCCIÓ 7

2.1. Objectius del projecte 7
2.2. Abast del projecte 7

3. PLANIFICACIÓ DE L'APLICACIÓ. 9

3.1. Requeriments de l'aplicació 9
3.2. Selecció de la plataforma de programació per l'aplicació 9
3.3. Distribució de presentació de l' informació 10
3.3.1. Capçalera fixa 10
3.3.2. Finestra de contingut 10
3.3.3. Barra de desplaçament de la finestra de contingut 11
3.3.4. Accessos directes 11
3.3.5. Botó d'autoavaluació 11

4. ELEMENTS DINÀMICS DE L'APLICACIÓ 12

4.1. Spry Widgets 12
4.1.1. Barra de menús 12
4.1.2. Acordions 13
4.2. Interacció amb l'usuari 14
4.2.1. Imatges interactives 14
4.2.2. Formularis 15
4.3. Multimèdia 17
4.3.1. Links a vídeos 17
4.3.2. Finestra de reproducció 18

5. ESTUDIS PREVIS A LA PROGRAMACIÓ 20

5.1. Temperatura del cordó 20
5.2. Velocitat de refredament 24
5.3. Modelització tèrmica per elements finits 25

5.3.1. Càlcul estacionari.....27
5.3.2. Càlcul transitori 29
5.4. Soldabilitat en funció de la tecnologia..... 32

6. PROPOSTES DE MILLORA 34
6.1. Integració simulació tèrmica 34
6.2. Integració indicador soldabilitat..... 35

CONCLUSIONS 37

AGRAÏMENTS 39

BIBLIOGRAFIA 41
Referències bibliogràfiques 41
Bibliografia complementària 41

1. Prefaci

1.1. Origen del projecte

El plantejament inicial d'aquesta eina era proporcionar a un usuari sense experiència en el mon de la soldadura una orientació sobre l'equip i els paràmetres que hauria de fer servir per aconseguir una soldadura sense defectes.

1.2. Motivació

La motivació inicial neix d'una conversa amb un company del sector de l'enginyeria quan jo treballava a una consultoria especialitzada en simulació per elements finits i quan aquest company de l'empresa que ens subcontractava aquests tipus d'estudis va començar a instaurar normes per l'execució de les estructures. Durant aquesta conversa m'explicava lo llarg que es un període de formació d'un operador nou que no té ni idea del procés metal·lúrgic que succeeix durant la soldadura.

Degut a aquestes declaracions vaig creure que seria de molta ajuda tenir accés a l' informació mostrada a l'aplicació web que ens ocupa per tal de reduir i millorar el període de formació dels nous soldadors.

1.3. Requerimentsprevis

Per poder crear una pàgina web on incloure l' informació i que fos prou atractiva com perquècaptés l'atenció dels usuaris vaig veure necessari adquirir coneixement sobre:

- HTML
- JavaScript
- Spry Widgets
- CSS
- Flexbuilder

Flexbuilder es un nou creador de pàgines web dinàmiques amb una estructura de codi molt diferent al HTML i que en aquest sentit podia limitar el perfil de gent que podria incorporar i continuar evolucionant l'aplicació web.

Per poder esser eficient a l'hora de crear l'esquelet principal de la pàgina web vaig decidir aprendre a fer servir el software "Adobe Dreamweaver CS4" que combina la possibilitat de treballar en l'entorn gràfic i simultàniament poder editar el codi.

2. Introducció

En aquesta memòria s'explica no sols el contingut i la filosofia que s'ha seguit a l'hora d'estructurar la pàgina web. També s'explicarà la metodologia alternativa que vaig plantejar per arribar a fer una predicció de la composició del cordó de soldadura i dels canvis en la Zona d'Afectació Tèrmica (ZAT).

Degut a la complexitat tècnica per incloure aquesta metodologia plantejada d'inici es va optar per abordar la problemàtica d'una forma més convencional, segura i alhora més simple d'implementar.

2.1. Objectius del projecte

Disposar d'una eina accessible via web que serveixi per guiar a l'usuari en el procés de selecció de la millor tecnologia de soldeig per assolir amb garantía d'èxit les soldadures que hagi de realitzar.

2.2. Abast del projecte

S'estudiarà i compararan els diferents comportaments de la soldadura en quant a l'eliminació de defectes segons el tipus de tecnologia (SWAT, MIG, FCAW, TIG, SAW) des del punt de vista metal·lúrgic.

També s'intentarà correlacionar el nivell de defectes en funció dels paràmetres que es poden controlar segons el tipus de tecnologia.

Es proporcionarà una eina interactiva que permeti proposar i/o orientar a l'usuari sobre els paràmetres principals del soldeig.

Finalment s'explicarà una metodologia alternativa que permet mostrar els resultats de forma gràfica, intel·ligible i inclús directament comparable amb la realitat.

La formació pràctica d'execució de soldadures no es objectiu d'aquesta aplicació ja que existeixen en el mercat equips d'alta solidificació que ja ofereixen aquesta possibilitat (Soldadura Virtual VRTEX 360).

3. Planificació de l'aplicació.

Per tal de poder decidir quina plataforma de llenguatge de programació era l'adient per la realització de l'aplicació es va fer un llistat de requeriments simples que calia complir. Aquesta llista es un síntesis de la pròpia definició de l'objectiu del projecte i que es descriuen a continuació.

3.1. Requeriments de l'aplicació

Els requeriments d'alt nivell son:

- Capacitats per incloure contingut multimèdia per fer atractiva i dinàmica l'aplicació.
- Fàcil edició i interpretació del codi font
- Compatibilitat amb diferents sistemes operatius
- Instal·lació mínima
- Possibilitat de fer-la córrer sota un servidor al cloud

Per tot això es va decidir optar per crear un portal web per afegir tot tipus de contingut: texts, imatges, vídeos, links interns o externs que permeten una navegació fluida.

3.2. Selecció de la plataforma de programació per l'aplicació

Una vegada escollida la plataforma que seria el motor de funcionament de l'aplicació (pàgina web) calia seleccionar l'entorn / eina de programació. Ja que l'eina de programació que es faci servir no afecta al resultat final la decisió es va realitzar amb criteri mes personal com:

- Accessibilitat a documentació per auto formació
- Valoració d'altres usuaris (coneguts / publicacions a Internet)
- Possibilitat d'utilització de la versió d'avaluació per períodes llargs

Finalment es va començar l'auto formació mitjançant documentació escrita en "Adobe Dreamweaver CS4" i posteriorment es va instal·lar la primera versió d'avaluació en la serva versió CS4. Al llarg del projecte s'han fet servir desde CS4, CS5, CS5.5 i la versió CS6.

3.3. Distribució de presentació de l' informació

La distribució de les capes dins de la pàgina / aplicació web es senzilla però s'ha buscat la funcionalitat de la navegació a través de tota l' informació inclosa.

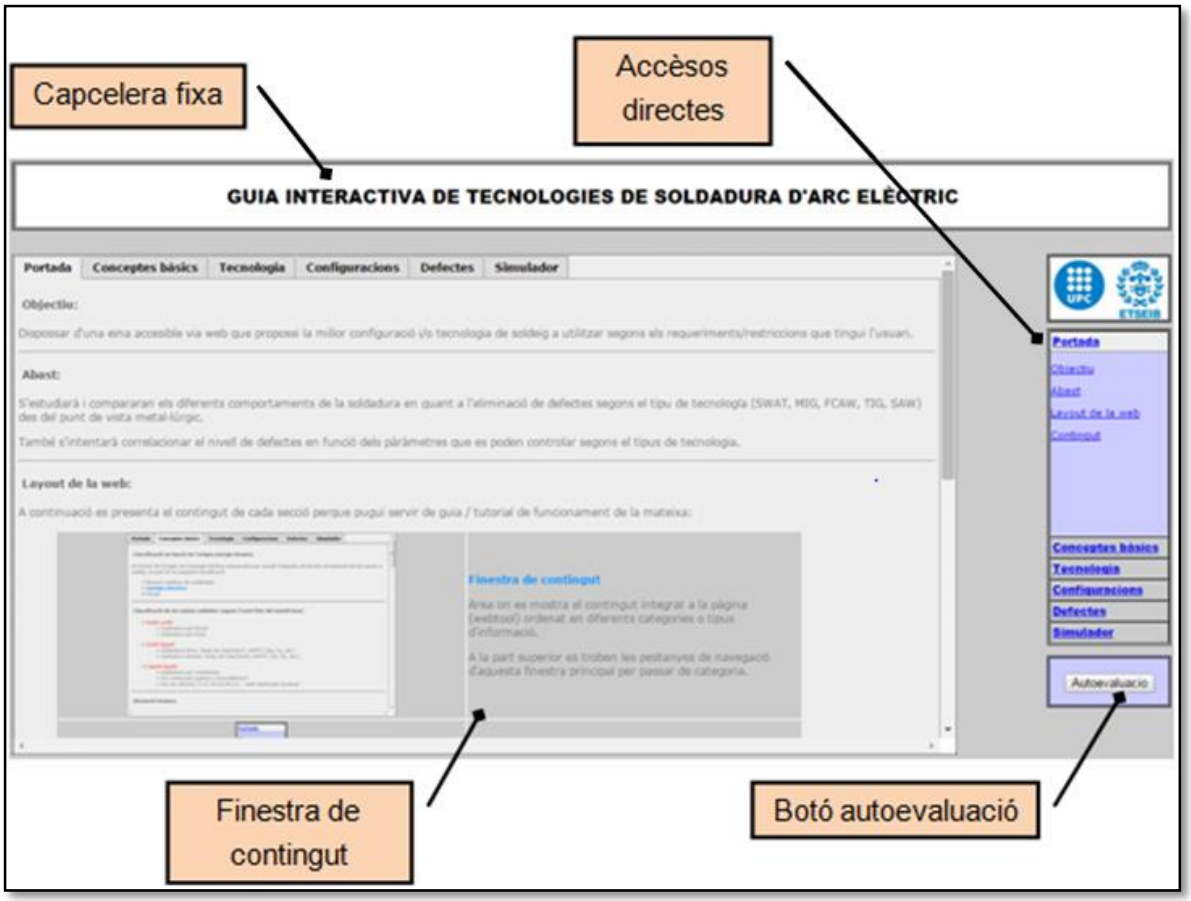

Fig. 3-1 Distribució dels elements a la finestra principal

3.3.1. Capçalera fixa

Bàsicament mostra el nom de projecte a una posició fixa de la pàgina web per tal d'identificar-la ràpidament.

3.3.2. Finestra de contingut

En aquesta part es on es mostra l' informació inclosa a l'aplicació segons el sistema de classificació descrit a continuació.

- *Portada*→ es on es mostrarà l' informació general de l'aplicació i la seva distribució.
- *Conceptes bàsics*→ apareix informació genèrica a conèixer sobre les unions soldades.

- *Tecnologia*→ Descripció de les diferents tecnologies d'arc elèctric de major us. Es realitza mantenint una mateixa estructura de seccions per poder comparar entre elles.

- *Configuracions*→ Informació descriptiva i d'execució de les soldadures (a tope, solapament, T, angle) mes comunes.

- *Defectes*→enumeració de diferents tipus de defectes que poden aparèixer durant i desprès d'una soldadura.

- *Simulador*→ serveix de guia on es poden calcular paràmetres vitals per l'execució d'una soldadura de qualitat com poden ser: temperatura de preescalfament, velocitat del cordó o previsió de la composició de la soldadura d'acers inoxidables.

Aquestes classificadors es poden veure en forma de pestanyes a la part superior d'aquesta finestra.

3.3.3. Barra de desplaçament de la finestra de contingut

A la dreta de la mateixa es pot trobar una barra de desplaçament individual de la pàgina web global que permet avançar en el contingut per quan les dimensions de la finestra global no es suficient.

3.3.4. Accessos directes

A la dreta de la finestra de contingut es troba una secció animada que permet navegar directament a diferents seccions de la documentació.

L'ús d'aquest desplegable permetrà estalviar temps durant la recerca d'un contingut ja explorar amb anterioritat. En alguns casos per raó d'espai s'ha hagut de simplificar el títol de les seccions que tenen accés directe des d'aquí.

3.3.5. Botó d'autoavaluació

A la part dreta de la pàgina s'ha incorporar un botó permanent que permet l'accés de al qüestionarid'autoavaluació d'adquisició de coneixement. Al prémer aquest botó s'obrirà una finestra nova per poder realitzar el test sense afectar al curs de la navegació del contingut de la finestra principal.

4. Elements dinàmics de l'aplicació

L' intenció de disseny es disposar de l' informació a demanda i lo millor indexada possibleperquè sigui més eficient que la lectura per part de l'usuari de pàgines i pàgines d'informació de handbooks, articles o pàgines web en general, moltes vegades d'una manera masa de detall.

Per poder mostrar l' informació recopilada a l'aplicació d'una manera fluida, atractiva i dinàmica per tal que l'usuari trobi l'experiència simple i profitosa s'ha hagut de recórrer a l'utilització de recursos actuals del llenguatge de programació HTML5. Els elements que es trobaran bàsicament son 3 que s'expliquen a continuació.

4.1. Spry Widgets

Son elements que pertanyen a una biblioteca preprogramada en JavaScript que proporciona la possibilitat de donar un estil professional a l'aplicació amb un cost de programació (customització) baix.

4.1.1. Barra de menús

A la finestra de contingut s'ha escollit aquest element ja que oferia la possibilitat de classificar i separar l'.

Fig. 4-1 Exemple finestra de contingut

Per poder habilitar l'ús d'aquest Spry s'ha de cridar prèviament la llibreria a la capçalera del cos de la pàgina principal.

```
<script type="text/javascript" src="SpryAssets/SpryTabbedPanels.js"></script>
```

També cal accedir a la fulla de formats d'aquest component.

```
<link href="SpryAssets/SpryTabbedPanels.css" rel="stylesheet" type="text/css" />
```

Finalment la classificació de les pestanyes es fa de la següent forma.

```
<div id="TabbedPanels1" class="TabbedPanels">
  <ul class="TabbedPanelsTabGroup">
    <li class="TabbedPanelsTab" tabindex="0">Portada</li>
    <li class="TabbedPanelsTab" tabindex="1">Conceptes bàsics</li>
    <li class="TabbedPanelsTab" tabindex="2">Tecnologia</li>
    <li class="TabbedPanelsTab" tabindex="3">Configuracions</li>
    <li class="TabbedPanelsTab" tabindex="4">Defectes</li>
    <li class="TabbedPanelsTab" tabindex="5">Simulador</li>
  </ul>
```

A partir d'aquest punt es on s'incorporaria l' que apareix a cada secció.

4.1.2. Acordions

Poden tenir una disposició horitzonal o vertical per poder-se adaptar al disseny de la pàgina web i incorpora una animació del canvi entre seccions que dona la sensació del moviment d'un acordió (d'aquí el seu nom).

De manera anàloga a la barra de menús, per poder habilitar el seu us cal cridar la llibreria.

```
<script type="text/javascript" src="SpryAssets/SpryAccordion.js">
```

La fulla d'estils, com en el cas anterior, també s'incorpora automàticament al cridar-ho des dels menús del Adobe Dreamweaver. En tot cas es pot incloure el link de forma manual a la capçalera del cos de la pàgina.

```
<link href="SpryAssets/SpryAccordion.css" rel="stylesheet" type="text/css" />
```

En aquest cas la definició de les pestanyes i el contingut de les mateixes es fa de forma continua.

```
  <div id="Accordion1" class="Accordion" tabindex="0">
    <div class="AccordionPanel">
      <div class="AccordionPanelTab"><a href="#" onclick="TabbedPanels1.showPanel(0);
return false;">Portada</a></div>
      <div class="AccordionPanelContent">
        <p><a href="#objectiu">Objectiu</a></p>
        <p><a href="#abast">Abast</a></p>
        <p><a href="#descweb">Layout de la web</a></p>
        <p><a href="#contin">Contingut</a></p>
      </div>
    </div>
```

4.2. Interacció amb l'usuari

En alguns casos es requereix de l'acció de l'usuari per diferents motius com poden ser:

- Posar focus a l' que es mostra
- Simplificar el contingut de la pàgina
- Selecció o introducció d'informació

Els recursos que s'han utilitzat a l'aplicació en concentren majorment a l'etiqueta "Simulador" però també hi han elements repartits a diferents imatges preparades per interacciones amb elles.

4.2.1. Imatges interactives

A imatges concretes on es interessant mostrar informació a mida que es vagi passant el cursor per sobre s'han incorporat regions del tipus "Mapa" amb l'eina que es mostra a continuació remarcat en color vermell:

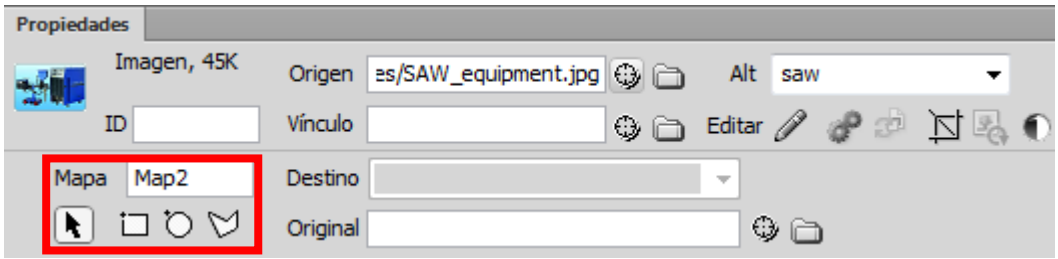

Fig. 4-2 Eina de definició area interactiva a imatges

Aquesta eina permet la creació i control d'un contorn amb al que se li poden assignar: events, links, títol a mostrar o crides a funcions en JavaScript programades a la pàgina web que contingui aquesta imatge.

Fig. 4-3 Exemple visualització de títol a imatge interactiva

L'opció escollida, com es pot veure a l'exemple, es mostrar un títol "font d'alimentació" al senyalar aquesta part de l'equipament amb el cursor.

4.2.2. Formularis

Els formularis son una regió que pot agrupar diferents recursos que permeten que l'usuari seleccioni, escrigui l' que s'envia al servidor per fer la validació i/o càlculs amb aquestes dades.

De tota la gama de recursos disponibles s'ha optat per fer servir:

Descripció	Exemple
Llistes de selecció	Seleccio Material Custom
Camps d'entrada de text lliure	Diametre electrode [mm]
Checkbox de validació	Zona d'Afectació Tèrmica

Taula 4-1 Elements de formulari utilitzats

El codi HTML per cada un d'ells es mostra a continuació.

4.2.2.1. Llistes de selecció

```
<label for="Material">Seleccio Material</label>
<select name="Material" size="1" id="Material" onchange="changeMaterial()">
  <option value="AISI 1010">AISI 1010</option>
  <option value="AISI 1020">AISI 1020</option>
  <option value="AISI 1030">AISI 1030</option>
```

Es poden afegir tantes opcions com siguin necessàries i finalment s'ha de tancar la definició de l'objecte de la següent manera.

```
  <option value="Custom" selected="selected">Custom</option>
</select>
```

A primera línea s'ha vinculat un event [**onchange="changeMaterial()"**] que crida la funció declarada a la pàgina d'Scripts que actualitzarà els valors dels camps de text que indiquen la composició del material escollit.

4.2.2.2. Camps d'entrada de text lliure

El codi comú a tots els camps de text de l'aplicació consta d'una capçalera i la definició de la longitud de camp permesa.

```
<label for="diametre">Diametre electrode </label><input align="center"
name="diametre" type="text" id="diametre" size="5" maxlength="4" />
[mm] </td>
```

- [**size="5"**] defineix la llargada visual del camp.
- [**maxlength="4"]** serà el número màxim de caràcters que es poden escriure.

4.2.2.3. Checkbox de validació

Es l'element escollit per la confecció del qüestionari d'autoavaluació i amb la sintaxis que es veu a continuació permet:

```
        <input type="radio" name="Resp1" value="0" id="Resp1_1"
onclick="setVal(document.activeElement.selectedIndex,document.activeElement.value)
sabled" />
      Zona d'Alteració Tèrmica</label>
```

- Al definir el [**type ="radio"]** al navegador web es veurà un checkbox rodó.
- La propietat [**value="0"]** permet assignar-li un valor numèric que es pot recuperar i s'utilitza per càlcul de la nota final.

- L'event [**onclick="setVal(...)"**] crida la funció setVal enviant-li el valor del objecte seleccionat actualitzant la nota acumulada del test.

4.3. Multimèdia

Els navegadors web permeten de la reproducció de molts tipus d'elements multimèdia però sols s'han incorporat vídeos ja que l'aplicació es de caràcterinformatiu i no pas comercial.

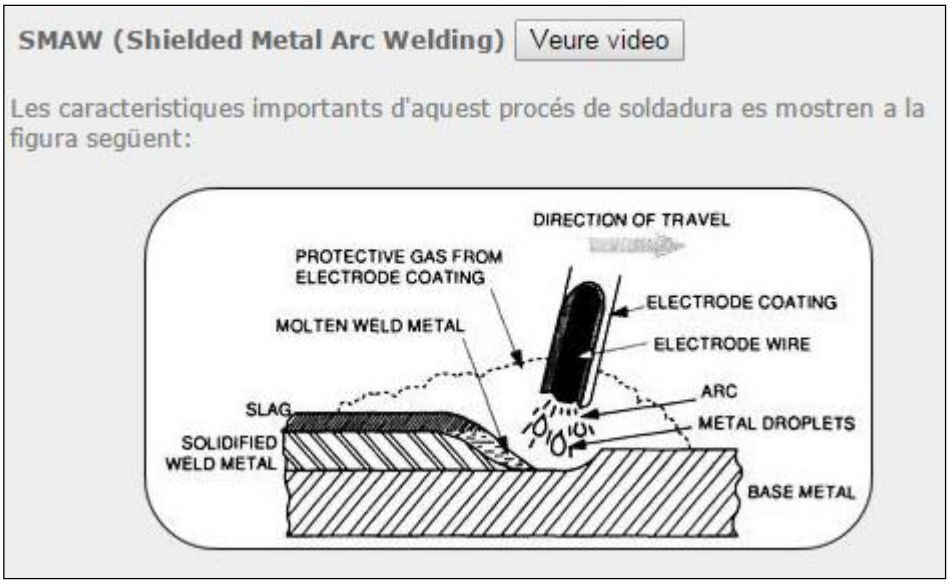

Fig. 4-4 Exemple incorporació link a contingut multimèdia

Tots els vídeos s'han incorporat directament a la carpeta de l'aplicació "Vídeos" que penja de l'arrel on es troba instal·lada l'aplicació per tal d'assegurar el bon funcionament inclús en sistemes sense accés a Internet.

4.3.1. Links a vídeos

Els vídeos escollits intenten explicar o fer més fàcil i ràpid la comprensió del contingut explicat a la secció de "Tecnologia" i el seu link es troba a la dreta de l'enunciat de cada una d'elles.

El codi utilitzat es el corresponent al del tipus "botó" quedant segons es mostra a continuació (corresponent a l'exemple escollit).

```
        <p class="TabbedPanelsContent">SMAW (Shielded Metal Arc Welding) <input
name="SMAW" type="button"
onClick="window.open('Videos/SMAW.html','_new','width=550,height=400,toolbar=no')
" value="Veure video" /></p>
```

4.3.2. Finestra de reproducció

Per evitar que l'usuari perdi de vista en quina part de l'aplicació es troba al apretar sobre el link el vídeo apareixerà en una finestra nova.

La mida d'aquest finestra nova es declara en el mateix botó que dona accés al vídeo, com es pot veure a l'exemple de l'apartat 4.3.1.

Fig. 4-5 Finestra de reproduccióvídeo d'exemple

Com es pot apreciar, aquesta finestra de reproducció no mostra la barra de navegació però si que incorpora els controls bàsics de reproducció del vídeo. El detall dels controls de reproducció canviaran en funció del reproductor que estigui instal·lat a cada ordinador.

Per cada vídeo incorporat a l'aplicació s'ha creat un pàgina HTML amb el contingut personalitzat per cada vídeo, així s'elimina la necessitat de crear una funció parametritzada en JavaScript que podria ralentitzar la crida del vídeo.

El codi de cada una d'aquestes pàgines de reproducciómultimèdia queda de la següent manera:

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
<meta http-equiv="Content-Type" content="text/html; charset=utf-8" />
<title>SMAW</title></head>

<body>
  <div align="center">
    <embed src="SMAW.mp4" width="500" height="350"></embed>
  </div>
</body>
</html>
```

Tots els vídeos s'han reescalat per tenir la mateixa midadurant la reproducció a una mida de [**width="500"**] x [**height="350"**].

5. Estudis previs a la programació

L'objectiu inicial d'aquest projecte era poder predir els canvis de fase i les transformacions cristallines que succeeixen al mateix cordó de soldadura com a la ZAT però degut a la complexitat tècnica per poder incorporar simulacions i/o models matemàtics que permetessin l'estudi d'una forma parametritzada i també al fet que ja hi havia projectes previs tractant el tema es va decidir re definir l'objectiu i abast del projecte fins lo que es presenta en aquesta memòria.

A continuació s'explicaran les principals línees d'estudi iniciades ja que es creu d'interès per proposar-ne d'algunes per futures incorporacions a l'aplicació.

5.1. Temperatura del cordó

La temperatura del cordó i els voltants es el resultat del balanç d'energia que succeeix all llarg de tot el procés. En aquest balanç intervenen o afecten diverses característiques tals com:

- Potència de la font d'entrada → Voltatge x current.
- Velocitat d'avanç del cordó → Temps total del cicle tèrmic.
- Natura del material → Capacitat específica del material (Cp).
- Dimensions de les peces → Gruix, amplada
- Condicions de l'entorn → Temperatura, humitat relativa, ventilació (convecció forçada o natural).
- Orientació / configuració de les peces a soldar → diferent coeficient de convecció.

Molts d'aquest paràmetres estan interelacionat entre ells i no es poden variar de forma independent sense afectar a la qualitat de la soldadura ja que, per exemple, per poder fondre el material suficient per tenir la penetració adequada a una certa velocitat d'avanç caldria disposar de l'energia d'entrada justa.

Per simplificar l'estudi d'aquest tipus de problemes transitoris (degut al moviment del punt d'aportació de calor) es una pràctica comú fer un canvi de coordenades mòbil [1] a la punta del cordó de soldadura. D'aquesta manera el balanç d'energia es torna estacionari.

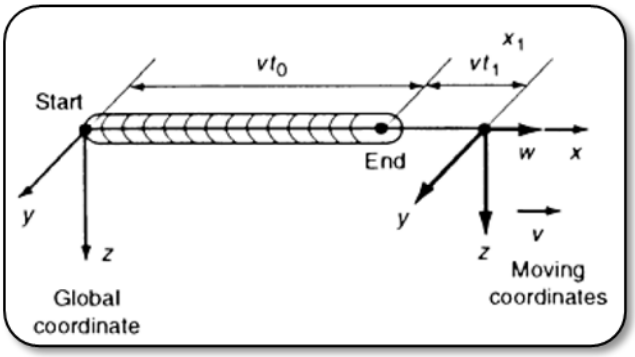

Fig.5-1 Canvi de coordenades mòbil

El professor **Chih-Ling Tsai** va estudiar la distribució de temperatures al voltant de l'origen de coordenades fent servir una distribució Gaussiana desplaçada (Fig. 5-3) i que convertint-la de l'espai temporal a l'espaia'l queda en la forma de la (Eq. 5-1) on es mostra el fluxe de calor al voltant de l'origen de coordenades mòbil.

$$\dot{q}(r,w) = \dot{q}_0 \exp\left(-Cr^2 - \frac{\beta v}{2k} w\right) \qquad \text{(Eq. 5-1)}$$

On ***β***es una constant de pes, ***κ*** es la difusivitat tèrmica del material, ***C*** es una constat de forma, ***q*** es el fluxe de tèrmic, ***v*** es la velocitat d'avanç i ***r*** la coordenada radial.

El perfil de temperatures en el pla ***xy***el quantifica segon l'expressió (Eq. 5-2).

$$\frac{1}{\theta_p - \theta_0} = \left(\frac{\dfrac{e\rho C_p \pi (y^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}{2}}{\left(\dfrac{\eta EI}{v}\right)} \right) + \frac{1}{\theta_m - \theta_0} \qquad \text{(Eq. 5-2)}$$

I gràficament quedaria segons es mostra a la Fig. 5-2 corresponent a la temperatura per un estat estacionari.

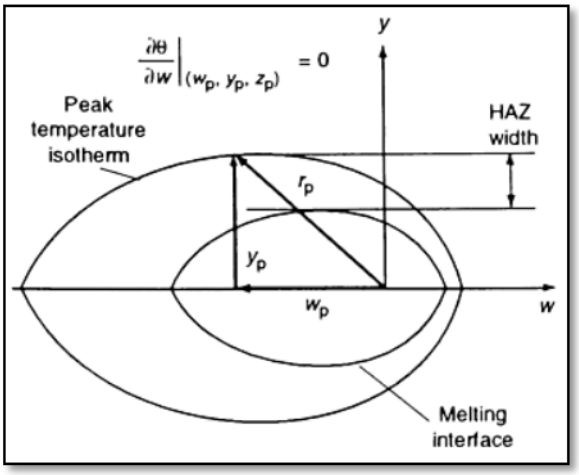

Fig. 5-2 Perfil de temperatures al voltant de l'origen de coordenades mòbil

Agafant un punt arbitrari que es troba en el camí del cordó de soldadura i que es pot veure afectat pel cicle tèrmic del mateix es veuriauna variació de temperatura segons mostra la Fig. 5-3.

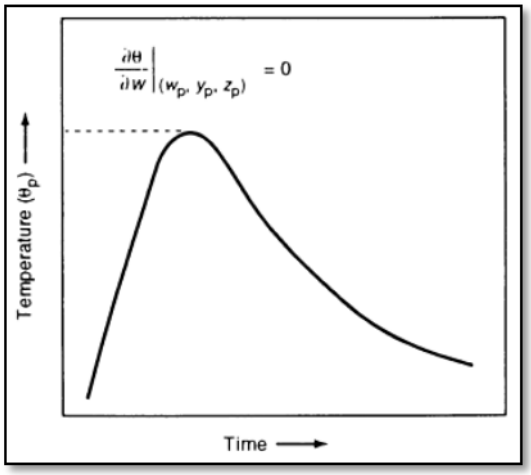

Fig. 5-3 Distribució Gaussiana desplaçada del cicle de temperatura

Per tal de poder tenir en compte altres paràmetres (orientació de la soldadura, espessor del material base, temperatura ambient,...) es va optar per fer un model de simulació per elements finits transitori que es descriurà a l'apartat 5.3. Els resultats d'aquesta simulació tot i agafant uns valors de partida (voltatge, current, temps d'aplicació,...) arbitraris presenten la mateixa forma o tendència que els mostrats prèviament i es poden veure a la Fig. 5-4.

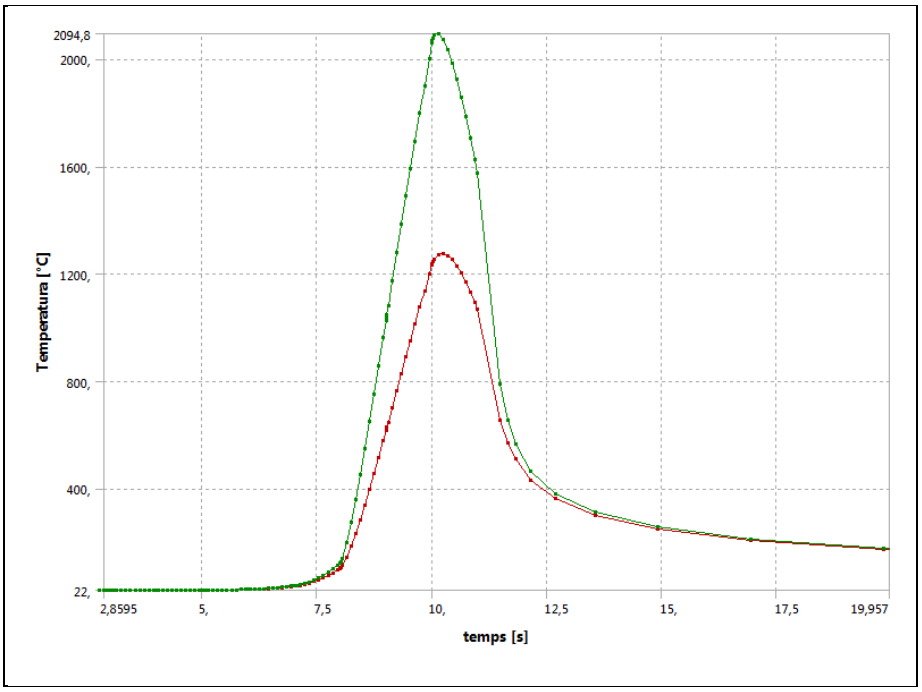

Fig. 5-4 Cicle de temperatura (model transitori)

La corba de color verd representa la temperatura en el centre del cordó i la vermella la temperatura d'un punt situat a una distancia a/2, essent "a" l'amplada del cordó.

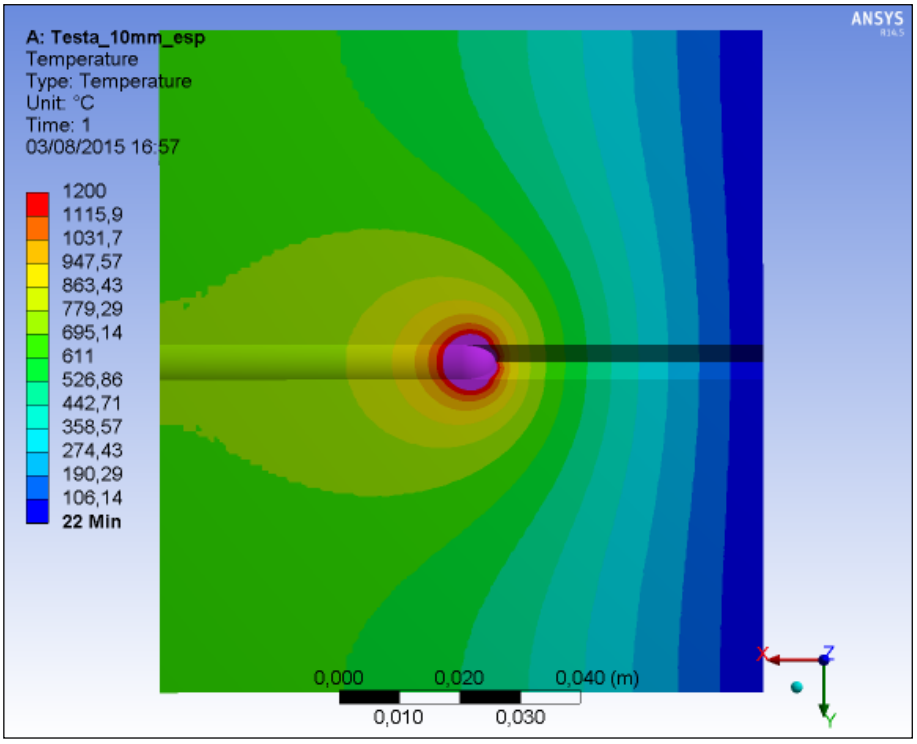

Fig. 5-5 Perfil temperatura (model estacionari)

A la Fig. 6-5 es mostra el perfil de temperatura per obtingut al voltant del punt de l'origen de coordenades situat al front d'avanç del cordó de soldadura per un instant t=cte una vegada s'ha assolit un punt de treball estacionari (en quan a fluxes de calor).

Comparant la isoterma de 695ºC amb la Fig. 5-2 es pot veure una correspondència en la forma que descriu i la cua que apareix a la banda ja soldat.

5.2. Velocitat de refredament

Durant la solidificació de qualsevol metall es defineix la microestructura principal del material i per tant en gran part les propietats finals del mateix [2], es per això que es de gran importànciaconèixer, i en la mesura de lo possible, ser capaç de predir les transformacions microestructurals [3].

Agafant un exemple de diagrama TTT (diagrama de Transformació Temp Temperatura) com el de la Fig. 5-6 es pot veure que en funció de la velocitat de refredament (constant cooling rate curves) s'obté una o altre microestructura (bainita / perlita / martensita).

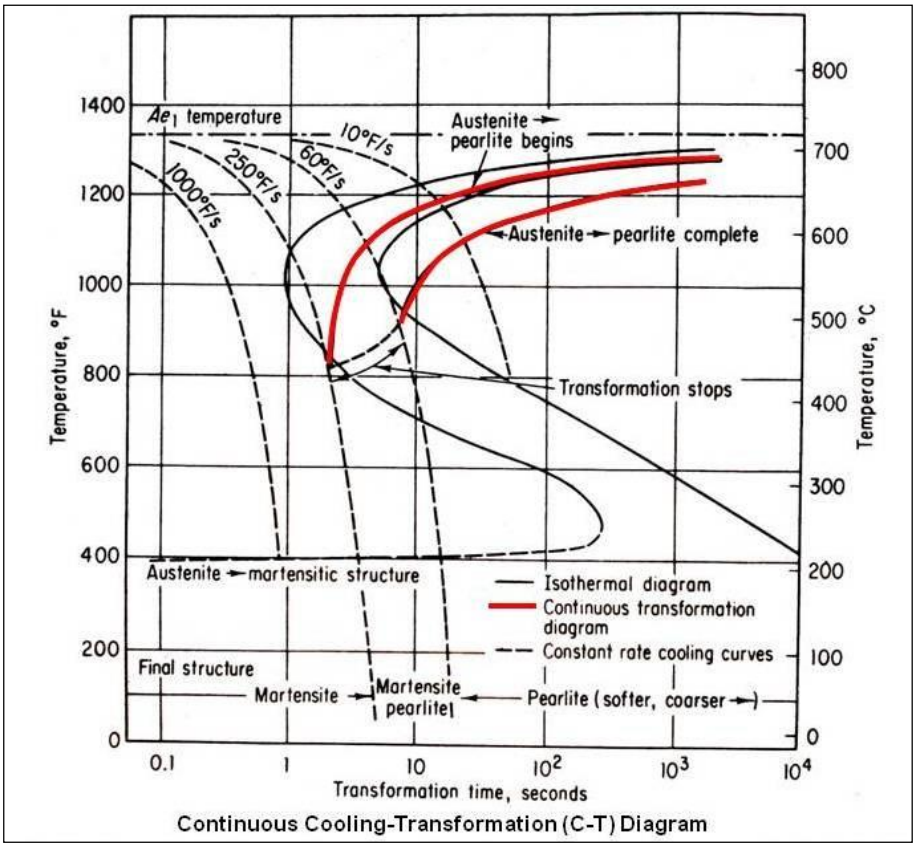

Fig. 5-6 Diagrama TTT d'acer al carboni

A partir del model analític de l'(Eq. 5-2) es poden trobar les expressions per quantificar la velocitat de refredament a la ZAT (en anglès HAZ) segons sigui placa fina (Eq. 5-3) o placa gruixuda (Eq. 5-4).

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{2\pi\lambda v(\theta_c - \theta_0)^2}{\eta EI} \qquad \text{(Eq. 5-3)}$$

$$\left.\frac{\partial\theta}{\partial t}\right|_{HAZ} = 0.35\left\{\left(\frac{\theta_c - \theta_0}{I/v}\right)^{1.7}\left[1 + \frac{2}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{H - H_o}{\alpha}\right)\right]\right\}^{0.8} \qquad \text{(Eq. 5-4)}$$

On les variables H_0 i αson factors geomètrics que depenen de la temperatura crítica (θ_c) segons mostra la Taula 5-1.

CRITICAL TEMPERATURE, θ_C		H_0		α	
°C	°F	mm	in.	mm	in.
700	1290	9.9	0.39	2.0	0.08
540	1000	14.2	0.56	4.1	0.16
300	570	19.8	0.78	9.9	0.39

(Taula 5-1)

Tenint en compte que totes aquestes equacions i paràmetres s'han validat de forma experimental i tot i tenir un gran fonament teòric es poden catalogar d'equacions empíriques i per tant s'entén que no es poden utilitzar com una llei general que apliqui a tots els processos de soldeig ja que algunes variables implicades depenen fortament de les condicions de la realització de la soldadura (temperatura ambient, orientació o nivell d'exposició del material base, medi de refredament,...).

Es per això que es planteja com alternativa a la determinació de les corbes de refredament del material al voltant del cordó de soldadura d'utilització de simulacions tèrmiques per elements finits, descrits a l'apartat següent.

5.3. Modelització tèrmica per elements finits

Per poder abordar el problema de la determinació de la ZAT i per poder predir les diferents microestructures que es troben al llarg d'una secció de peça unida per soldadura per arc elèctric es planteja a partir d'una geometria corresponent a soldadura a tope amb preparació de garganta en V.

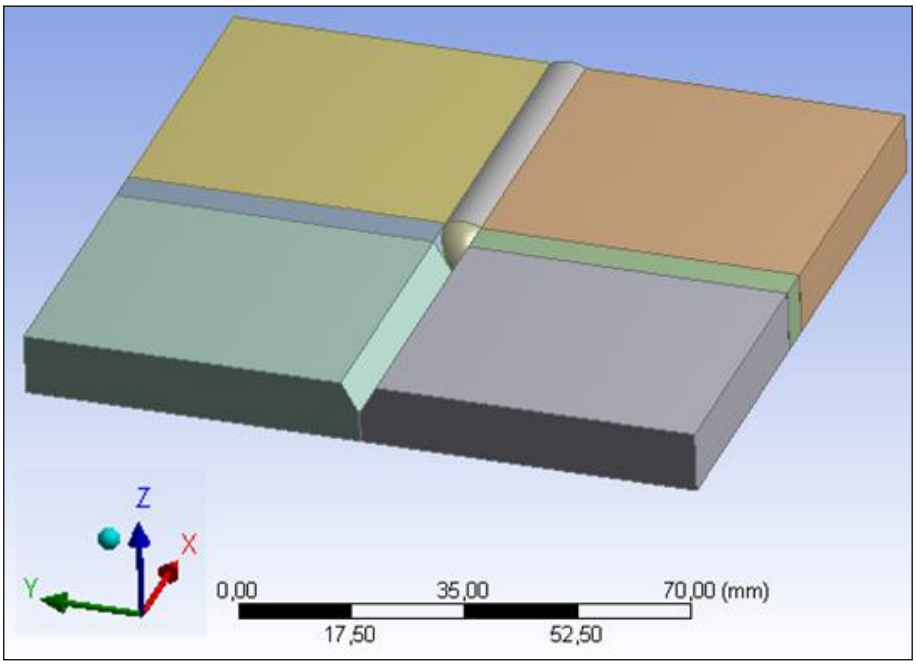

Fig. 5-7 Geometria càlcul per Elements Finits

S'afegeix el volum del material d'aportació final del cordó de soldadura i es seccionen les peces de forma que el mallat del conjunt pugui ser de gran qualitat sense generar distorsions locals degut als canvis de secció al llarg de l'eix de coordenades paral·lel al cordó de soldadura (eix X).

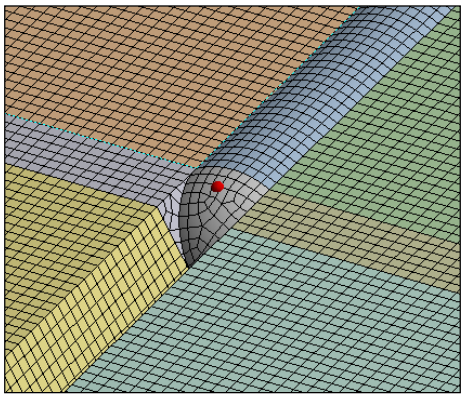

Fig. 5-8 Detall mallat

Les dimensions de la proveta d'estudi son 100 mm de llarg (eix X), 110 mm d'amplada (eix Y) i 10 mm de gruix (eix Z).

5.3.1. Càlcul estacionari

Aquest tipus de càlcul es vàlid per poder veure el mapa de temperatures al voltant el sistema de coordenades mòbil col·locat a la punta del cordó d'avanç tal com indica la Fig. 5-1.

Per aconseguir tenir el fluxe estacionari que correspondria a una velocitat d'avanç ideal que faria que la temperatura del material base allunyat del focus d'energia no es veies alterada s'apliquen les següents condicions de contorn al model.

A. Temperatura constant de 22ºC a les superfíciesdel pla YZ i de coordenades X anterior al front d'avanç del cordó (les corresponents a l'entrada de material fresc).

B. Convecció de les superfícies superiors

C. Convecció de la superfície inferior (tot i que lo més estrictament correcte hauria de ser conducció + convecció).

D. Fluxe de calor a la superfície del front d'avanç del cordó

E. Zero fluxe de calor a través de les superfícies contingudes en el pla XZ (model adiabàtic en la direcció Y al suposar material infinit en aquesta direcció).

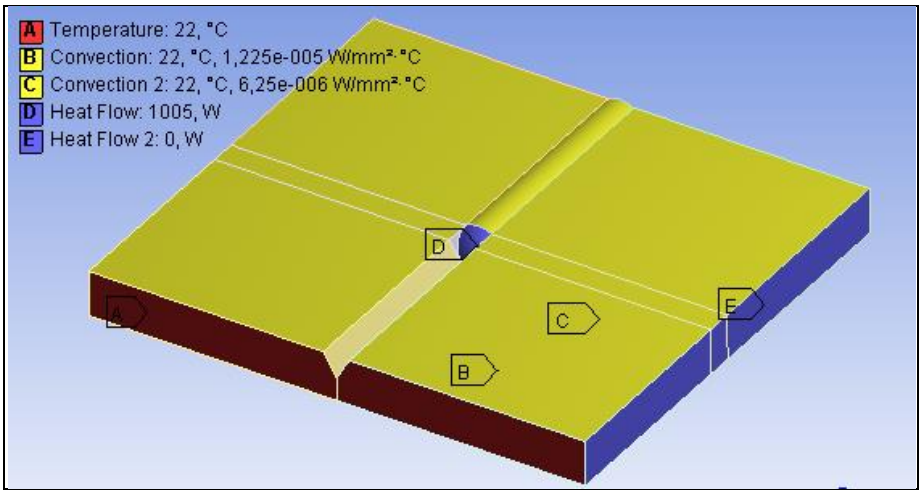

Fig. 5-9 Definició condicions de contorn

Amb aquest model es pot aconseguir el mapa de temperatures al voltant punt de fusió del cordó (origen de coordenades mòbil) i també es estudiant el perfil de temperatura al llarg d'un camí paral·lel al cordó de soldadura (Fig. 5-10) i relacionant-lo amb la velocitat d'avanç es pot trobar la corba de refredament per un punt donat del material.

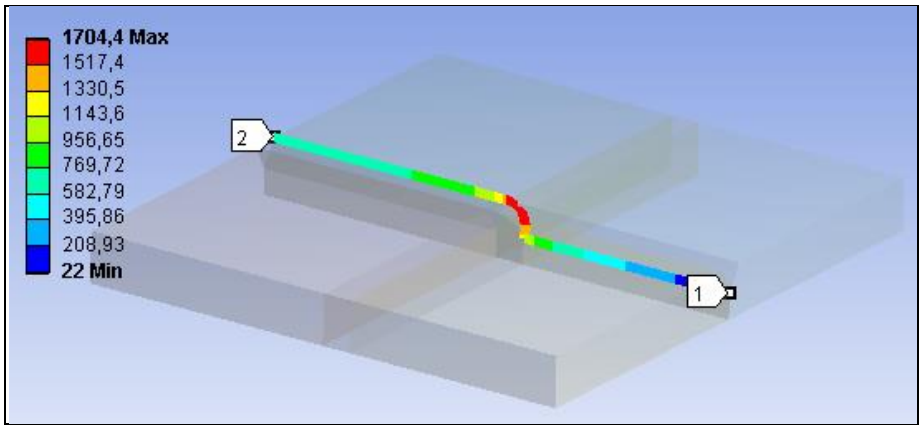

Fig. 5-10 Camí d'estudi de temperatura

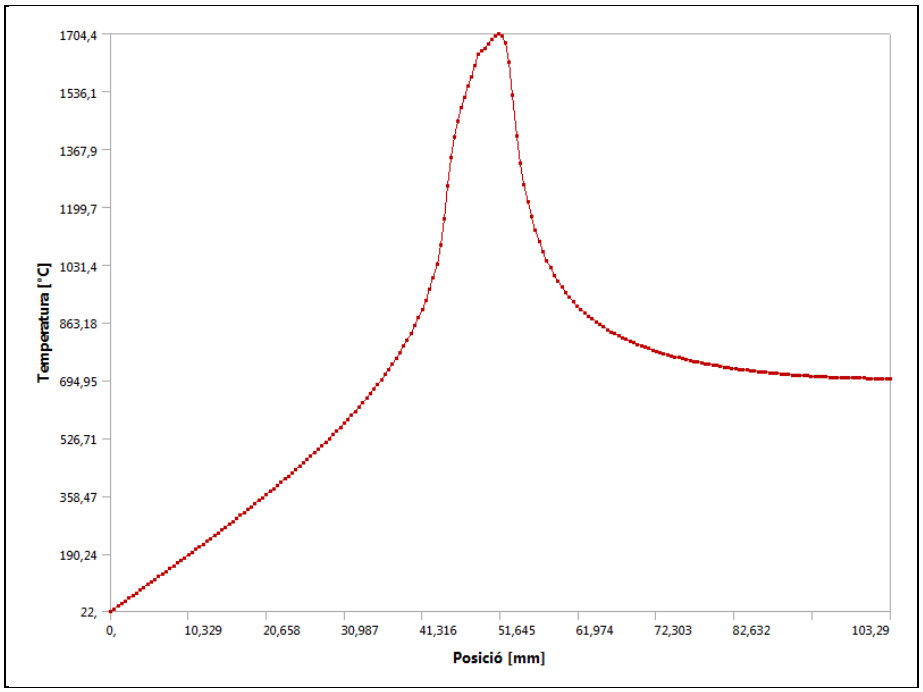

Fig. 5-11 Perfil temperatura al llarg del camí

Fent el tractament de les dades a partir de quan es comença a refredar el material i sobreposant el resultat amb el diagrama TTT es pot veure en aquest cas concret en color verd. La velocitat d'avanç ha de ser tal que satisfà les condicions de contorn (W entrada i temperatura constant de 22ºC).

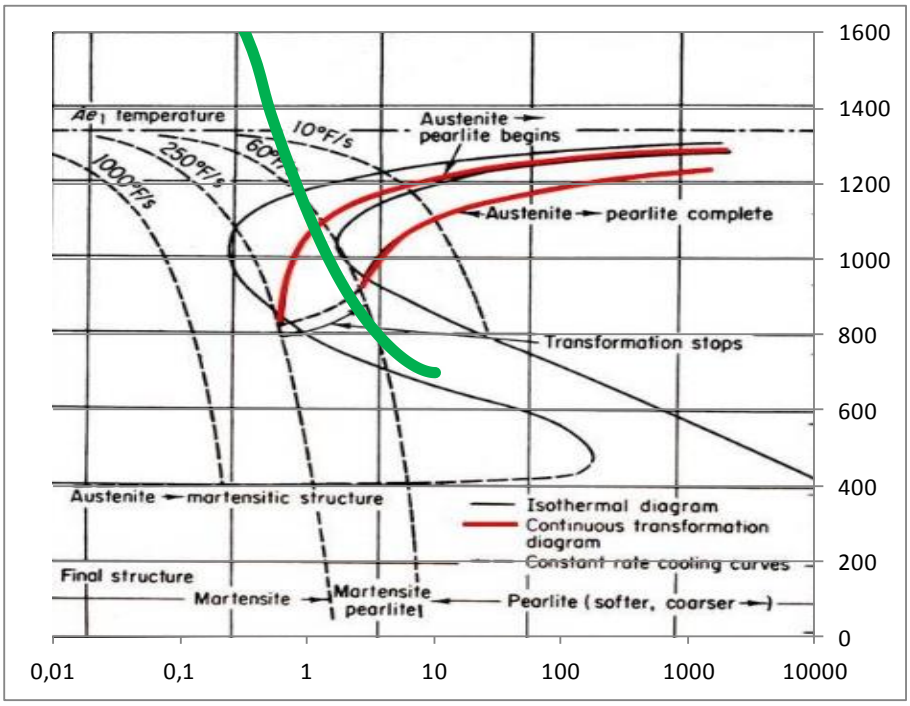

Fig. 5-12Cicle de refredament (model estacionari)

La complexitat per identificar aquesta velocitat a partir del calor específic del material fresc que entra dins del domini d'estudi fa que es plantegila necessitat d'un model transitori on es pugui controlar la variable velocitat.

5.3.2. Càlcul transitori

Per aquest càlcul s'aprofita la geometria preparada pel model estacionari però es realitza un nou mallat per poder controlar i definir noves superfícies de 5 [mm] de llargada en el cordó de soldadura.

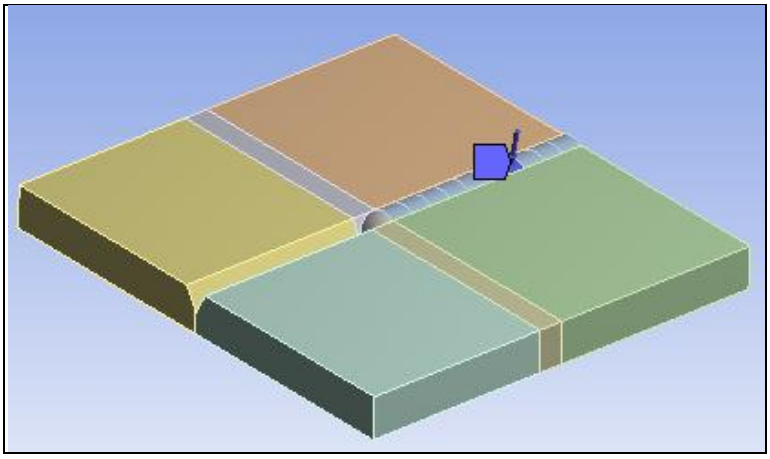

Fig. 5-13 Exemple d'aplicació del fluxe de calor local

Sobre aquestes noves superfícies delimitades s'aplica de forma seqüencial el fluxe de calor equivalent a 1500 [W] (valor arbitrari), valor que a priori sembla insuficient ja que tenint en compte el rendiment de transferènciatèrmica de η=0.80-0.90, valors típic en aquest tipus de soldadures [4], quedaria un potència elèctrica:

$$1000\ [W]/_{\eta} = 1176[W] \qquad \text{(Eq. 5-5)}$$

La potència específica per soldadures per arc elèctric es troben al voltant de 8000 [W/cm^2][5]. Tenint en compte la superfície de la subregió creada al llarg del cordó es confirma que la potència escollida d'inici es insuficient per poder assegurar la fusió total de l'espessor de material base donada la velocitat d'avanç definida en 5 [mm/s].

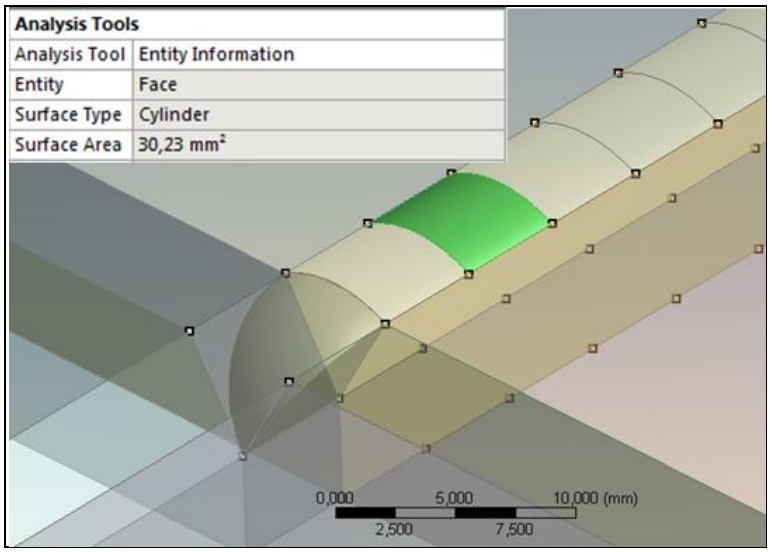

Fig. 5-14 Propietats geomètriques subregió cordó

$$8000\left[\frac{W}{cm^2}\right] * 30{,}23 * 10e^{-2}[cm^2] = 2418[W] \qquad \text{(Eq. 5-6)}$$

$$2418\ [W] * \ \eta = 2055\ [W] \qquad \text{(Eq. 5-7)}$$

L'(Eq. 5-7) indica que l'energia necessària per fondre el volum definit al model com material d'aportació hauria de ser superior al definit en primera instancia.

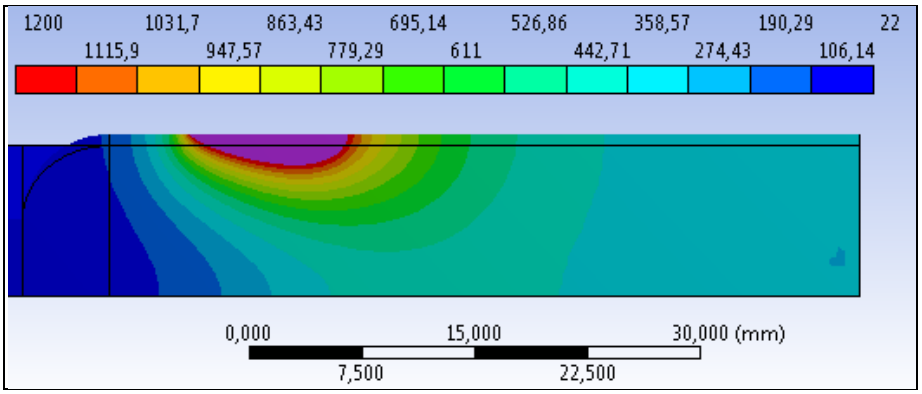

Fig. 5-15 Perfil temperatures secció cordó

Una vegada resolt el càlcul transitori es pot veure que la zona fosa quedaria a un nivell superficial però ha servit per poder confirmar les limitacions de les simplificacions i les conclusions al respecte del cicle tèrmic a la simulació estacionaria.

Comparant els resultats per un punt homòleg (Fig. 5-11) es pot veure aquesta correspondència en la forma però no en el valor de la temperatura màxima, ja que depèn fortament de la velocitat d'avanç.

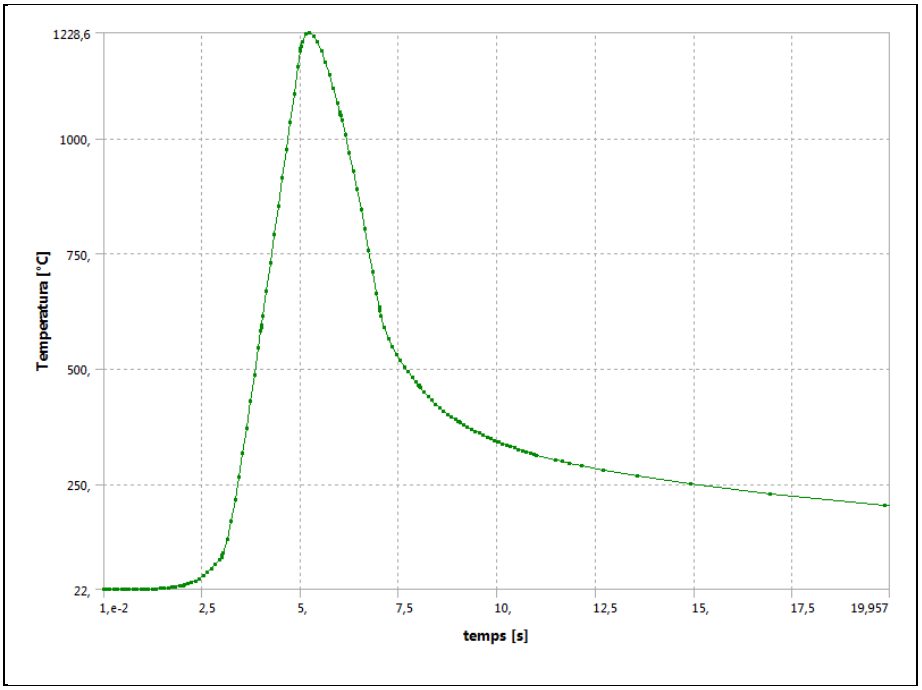

Fig. 5-16 Perfil temperatura al llarg del temps

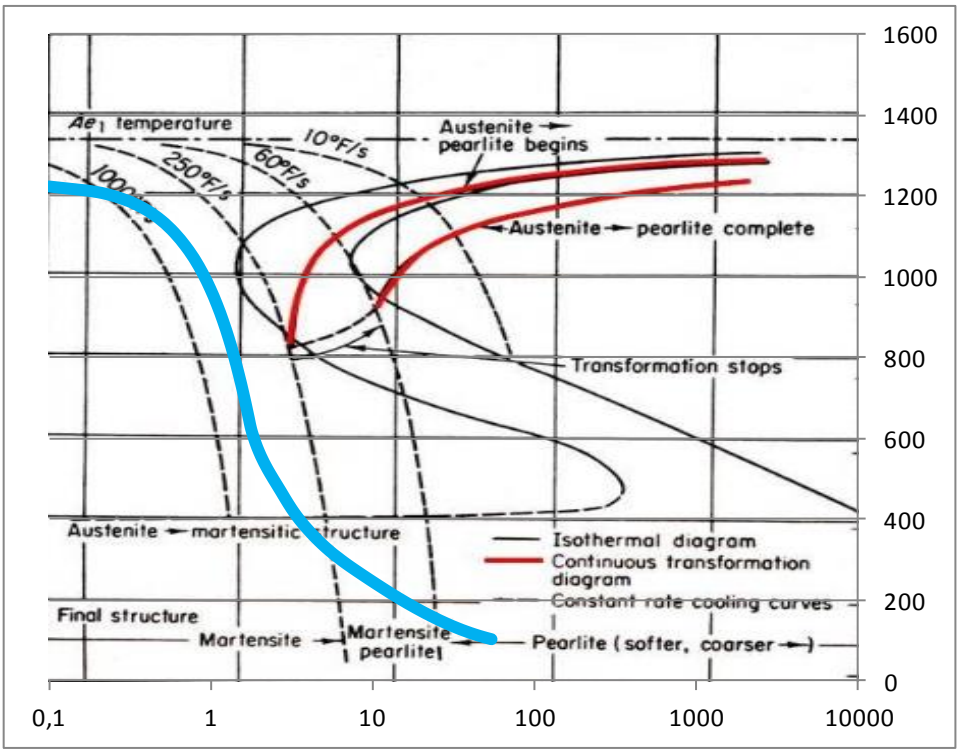

Fig. 5-17 Cicle de refredament (model transitori)

En aquest cas es s'observa que la velocitat d'avanç es molt elevada i provoca un gradient de temperatures elevat que implicaria la formació de martensita.

5.4. Soldabilitat en funció de la tecnologia

S'ha preparat un formulari Excel molt simple que partint de l'entrada de dades de l'usuari de les 2 caselles de color blau a la figura següent s'indica el nivell de soldabilitat i la tecnologia recomanada per la soldadura.

SOLDABILITAT	
1. SMAW (Shielded Metal Arc Welding)	**Tecnologia recomanada**
1. Acer St 37.2	4. GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)
Soldabilitat (1.baixa ... 5. alta)	1

Taula 5-2 Formulari soldabilitat

Segons l'exemple utilitzat a la Taula5-2, la tecnologia recomanada seria la TIG i l'índex de soldabilitat en aquest cas es baix. Escollint doncs la tecnologia recomanada es pot veure la millora de l'índex de soldabilitat, segons es mostra a la següent imatge.

SOLDABILITAT		
4. GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)	**Tecnologia recomanada**	
1. Acer St 37.2	4. GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)	
Soldabilitat (1.baixa … 5. alta)	5	

Taula 5-3 Soldabilitat recomanada

El funcionament d'aquest formulari es bastant simple de preparar amb les funcions HLOOKUP i VLOOKUP del programa Excel. Els valors de les caselles d'entrada estan vinculats a llistes predefinides en una taula anterior per tal de tenir controlats els valors que s'utilitzaran per la recerca dels valor de l'índex de soldabilitat a la següent matriu.

Soldabilitat	1. St 37.2	2. St 52.3	3. AISI 304	4. AISI 316	5. A-6061
1. SMAW	1	3	5	4	1
2. GMAW	2	2	4	3	1
3. FCAW	4	4	3	4	4
4. GTAW	5	4	1	2	2
5. SAW	1	3	1	4	5

Taula 5-4 Índex de soldabilitat

En una segona matriu s'han relacionat els valors de soldabilitat màxima que es poden aconseguir pel material en qüestió i es la que serveix per poder fer la recomanació de la millor tecnologia a fer servir.

Tecnologia	1. St 37.2	2. St 52.3	3. AISI 304	4. AISI 316	5. A-6061
4. GTAW	5	4	1	2	2
Max	5	4	5	4	5
Index	4	3	1	1	5

Taula 5-5 Índex de tecnologia

La fila "Índex" mostra el valor la fila de la tecnologia recomanada segons l'ordre de la Taula 5-4.

Per aquells materials en que es troben varies tecnologies amb el màxim d'índex de soldabilitat la proposta es fa segons un criteri de mínim equipament o habilitats necessàries per part de l'usuari ja que la Taula 5-4 s'ha ordenat seguint aquest criteri.

6. Propostes de millora

L'aplicació web presentada s'ha orientat a poder fer-la servir de material didàctic per usuaris que no requereixin d'un nivell alt previ de coneixement sobre fenòmens de segregació i transformacions microestructurals durant la solidificació i refredament dels metalls que es donen desprès d'un procés de soldeig.

Per ampliar l'abast d'utilització de l'aplicació fins a un segon nivell de coneixement seria força interessant poder integrar de forma interactiva els processos de càlcul explicats al capítol 6.

6.1. Integració simulació tèrmica

Degut a l'elevat cost de la llicencia de qualsevol software d'elements finits i la dificultat de tenir un motor de càlcul embegut a una pàgina web el plantejament d'integració seria el de crear una biblioteca de resultats per mostra en funció de la correspondència de les paràmetres de control de les soldadures:

- Material
- Espessor metall base.
- Potència elèctrica.
- Velocitat d'avanç.

Aquests paràmetres son els que l'operador d'una soldadura pot controlar i a partir de les quals es podria equiparar amb els paràmetres definits a les simulacions tèrmiques:

- Propietats físiques del mallat (conductivitat, calor específic, etc).
- Dimensions geometria d'estudi.
- Potència tèrmica (tenint en compte el rendiment típic ja comentat a seccions anteriors).
- Temps de durada dels "steps" (simulació transitòria).

L' utilitat major d'aquesta possible integració seria el fet de poder preveure la tendència de distorsió de les peces sotmeses a una soldadura. De forma qualitativa seriainteressant mostrar de forma gràfica aquest resultat de la deformada pels diferents tipus d'unió.

Per la predicció de la composició final es proposa el model presentat a l'article "Modeling thermomechanical processing of austenite" [6] en comptes del mètode mostrat al capítol 5.3.2 ja que te en compte les condicions inicials de tamany de gra per una millor estimació.

6.2. Integració indicador soldabilitat.

La possible integració es basaria en ampliar la llibreria de materials utilitzada a la fulla de càlcul Excel fins a poder tenir representats tots els materials que apareixen a l'apartat de càlcul de "Temperatura de Preescalfament" de la pestanya "Simulador" de l'aplicació web.

Una forma de fer-ho seria gravar la taula de interacció amb l'usuari en format "Single File Web Page" per poder copiar al codi generat per incorporar-ho a l'aplicació. Les funcions HLOOUP i VLOOKUP s'han de substituir per un JavaScript.

```
<tr height=20 style='mso-height-source:userset;height:15.0pt'>
 <td height=20 class=xl657956 style='height:15.0pt'>Llista Tecnologia</td>
 <td class=xl657956 style='border-left:none'>Acronim</td>
 <td class=xl157956></td>
 <td class=xl657956>Llista Material</td>
 <td class=xl657956 style='border-left:none'>Acronim</td>
 <td class=xl157956></td>
 <td class=xl667956>Soldabilitat</td>
 <td class=xl667956 style='border-left:none'>1. St 37.2</td>
 <td class=xl667956 style='border-left:none'>2. St 52.3</td>
 <td class=xl667956 style='border-left:none'>3. AISI 304</td>
 <td class=xl667956 style='border-left:none'>4. AISI 316</td>
 <td class=xl667956 style='border-left:none'>5. A-6061</td>
</tr>
```

Fig. 6-1 Exemple codi generat automàticament per MS Excel

Llista Material	Acronim
1. Acer St 37.2	1. St 37.2
2. Acer St 52.3	2. St 52.3
3. Acer Inoxidable 304	3. AISI 304
4. Acer Inoxidable 316	4. AISI 316
5. Alumini 6061	5. A-6061

Fig. 6-2 Exemple visualització del codi mostrat a la Fig. 6-1

Conclusions

S'ha aconseguit crear una aplicació web amb caràcter formatiu sobre les diferents tecnologies de soldeig per arc elèctric utilitzant llenguatge pla que ajudarà a escurçar la corba d'aprenentatge d'un potencial usuari.

El nivell de dilució es de molt difícil predicció però es necessaritenir clar les variables que l'afecten per poder fer un us complert de l'eina de predicció de la composició del cordó de soldadura. El fenomen de dilució està fortament relacionat amb la microsegregació de la composició durant la solidificació del cordó degut a la diferent composició de materials, de forma semblant a quan solidifica un metall no eutectoide i les composicions de cada fase del metall viatja al llarg de les corbes liquidus i solidus [7].

L' integració de qualsevol mètode de simulació per elements finits es força complexa però l' utilització d'aquestes eines permeten interpretar els resultats d'una manera molt gràfica i inclús trencar les limitacions que puguin tenir estudiar una soldadura realitzada en condicions no normals (soldadura a trams, subaquàtica, a varies passades, dues cares, etc).

La distorsió de la geometria d'una peça no depèn del transitori de temperatura i dels canvis microestructurals durant el refredament de la soldadura [8].

L'autoavaluació via test incorporada a l'aplicació no sembla un sistema molt robust ja que tot i que una resposta negativa si demostra una falta de coneixement sobre la qüestió una resposta positiva no necessariament indica que l'usuari hagi assolit el coneixement o simplement hagi sigut sort a l'hora d'escollir la resposta.

Agraïments

Vull exposar el meu agraïment als professors:

- **Jose Maria Cabrera Marrero**
- **Antonio Mateo Garcia**

del Departament de Ciència de Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de la ETSEIB (UPC) per mostrar interèssobre el projecte que els vaig presentar fora de les propostes seleccionades del propi departament ja que ha sigut clau per poder aprofitar el temps ja dedicat a recerca, plantejament i estudis previs que s'han explicat a la memòria, especialment a *Jose Maria Cabrera* que m'ha ajudat a redirigir l'objectiu i abast del projecte per poder donar una eina complerta en el límit de l'extinció de la titulació.

Bibliografia

A continuació es mostren algunes de les bibliografies consultades i que s'han localitzat realitzant una recerca per aclarir conceptes clau del projecte.

Referències bibliogràfiques

[1] *Welding, Brazing and Soldering,* ASM International Metals HandBook,Volume 6, p.

[2] H. K. D. H. BHADESHIA,*Reliability of Weld Microstructure and Property Calculations*, Welding Journal, p. 237-S.

[3] *Welding, Brazing and Soldering,* ASM International Metals HandBook,Volume 6, p. 32

[4] *Welding, Brazing and Soldering,* ASM International Metals HandBook, Volume 6, p. 71

[5] *Welding, Brazing and Soldering,* ASM International Metals HandBook,Volume 6, p. 17, Fig. 2

[6] J.M. Cabrera, J. Ponce, J. M. Prado*, Modeling thermomechanical processing of austenite*, Journal of Material Processing Technology 143-144 (2003) 403-409

[7] William F. Smith, *Fundamentos de la Ciencia e Ingenieria de Materiales*, McGraw-Hill, p. 459-462

[8] Anas Yaghi, Adib Becker, State of the Art Review – Weld Simulation Using Finite Element Methods, FENET-UNOTT-DLE-08, p. 19-20

Bibliografia complementària

A part d'extreure una gran quantitat d'informació d'Internet hi ha bibliografia clau consultada de la que no s'ha fet cap referència al llarg de la memòria però que es mostra a continuació.

[9] William F. Smith, *Fundamentos de la Ciencia e Ingenieria de Materiales*, McGraw-Hill, p. 459-462

[10] E. Friedman, S. S. Glickstein, *An Investigation of theThermal Response of Stationary Gas Tungsten Arc Welds*, 57th Annual Meeting held in St. Louis, May 10-14 1976

[11] M. Nouri, A. Abdollah-zadeh, F. Malek, *Effect of Welding Parameters on Dilution and Weld Bead Geometry in Cladding*, J. Mater Sci. Technol, Vol.23 No.6, 2007

[12] *Manual de Soldadura*, OERLIKON, Exsa S.A., www.exsa.com.pe