# Resum

L'objectiu d'aquest projecte és la confecció d'una base referencial per a la inspecció ultrasònica de cordons de soldadura en elements estructurals metàl·lics.

Per la correcta interpretació dels resultats és imprescindible disposar de coneixements en els camps del model de superfície industrial, tipologies i procediments de soldadura, principis bàsics dels ultrasons, i l'aplicació pràctica d'aquests en el camp de la inspecció ultrasònica de defectes. Tots aquests temes són explicats de forma clara i concisa en el present projecte.

La inspecció no destructiva per reflexió d'ones ultrasòniques per defectes utilitzada és el mètode de l'eco-pulsant. Aplicat a diverses provetes que simulen els possibles defectes de soldadura s'ha confeccionat de forma experimental la base de referència per a la inspecció ultrasònica de cordons de soldadura en elements estructurals metàl·lics. Aquesta base ha estat aplicada a la inspecció d'un cas real soldadura real i se n'ha corroborat la seva validesa.

La base referencial objecte d'aquest projecte permet una fàcil interpretació de forma visual dels resultats de la inspecció ultrasònica d'un cordó de soldadura. Facilitant a l'inspector la detecció de la presència de defectes i en cas de ser necessari identificar-ne la tipologia.

La comparació visual dels ecogrames obtinguts en la inspecció utrasònica del cordó de soldadura amb els ecogrames patró de la base de referència permet la detecció del defecte i la identificació de la tipologia d'aquest.

# Sumari

**RESUM** 1

**SUMARI** 3

**1. GLOSSARI** 7

**2. PREFACI** 9

2.1. Origen del projecte 9
2.2. Motivació 9
2.3. Requeriments previs 9

**3. INTRODUCCIÓ** 11

3.1. Objectius del projecte 11
3.2. Abast del projecte 11

**4. MODEL DE SUPERFÍCIE INDUSTRIAL** 13

4.1. Agents contaminants d'una superfície 13
4.2. Oxidació del ferro 15
4.3. Formació d'òxid superficial 16
4.4. Efecte de la temperatura 17

**5. LA SOLDADURA** 19

5.1. Introducció a la soldadura 19
5.2. Classificació dels processos de soldadura 20
5.3. Característiques microestructurals i mecàniques 23
5.4. Sistema de tensions 24
5.5. Requisits de qualitat 25
5.6. Tecnologia de soldadura aplicada al procés de fabricació de perfils de gran longitud 25
5.6.1. Tecnologia de soldadura 25
5.6.2. Principals defectes en el procés de soldadura 26

**6. BASES D'INTERPRETACIÓ DE LA INSPECCIÓ NO DESTRUCTIVA DE CORDONS DE SOLDADURA PER REFLEXIÓ D'ONES PER DEFECTES** 29

6.1. Principis bàsics 29

6.2. Els ultrasons en els tests no destructius ..... 30
6.2.1. Situació actual dels ultrasons en els tests no destructius ..... 33
6.2.2. Situació futura dels ultrasons en tests no de destructius ..... 33
6.3. Introducció a la inspecció ultrasònica ..... 34
6.4. Aparell emissor-receptor de polsos elèctrics d'alt voltatge ..... 35
6.5. Transductor piezoelèctric ..... 36
6.6. Medi acoblant ..... 38
6.7. Mètode de l'eco-pulsant ..... 40
6.7.1. Inspecció ultrasònica amb feix d'ones incident normal ..... 41
6.7.2. Inspecció ultrasònica amb feix d'ones incident en angle ..... 41
6.7.3. Aplicació del mètode de l'eco-pulsant en l'anàlisi d'unions soldades ..... 42
6.8. Principis de la inspecció de defectes i imperfeccions en unions de soldadura entre plaques d'acer que constitueixen grans perfils. ..... 43

**7. ANÀLISI ULTRASÒNIC EXPERIMENTAL ____ 47**
7.1. Especificacions tècniques dels aparells a utilitzar ..... 47
7.1.1. Detector digital de defectes PANAMETRIX EPOCH IIIB model 2400. ..... 47
7.1.2. Transductor piezoelèctric PANAMETRIX V405-SB. ..... 48
7.2. Disseny i fabricació de les provetes. ..... 48
7.2.1. Defectes simulats en cadascuna de les provetes. ..... 50
7.3. Descripció del mètode operatiu. ..... 50
7.3.1. Detecció de defectes ..... 51
7.3.2. Influència de la distància entre la superfície d'anàlisi i el defecte en la resposta obtinguda ..... 52
7.3.3. Identificació i caracterització de defectes ..... 53

**8. DISCUSSIÓ DELS RESULTATS ____ 55**
8.1. Llegenda de la presentació dels resultats ..... 55
8.2. Resultats de la detecció de defectes ..... 57
8.2.1. Provetes tipus A ..... 57
8.2.2. Provetes tipus B ..... 59
8.2.3. Provetes tipus C ..... 60
8.3. Resultats de la influència de la distància entre la superfície d'anàlisi i el defecte en la resposta obtinguda ..... 62
8.4. Resultats de la identificació i caracterització de defectes ..... 63
8.4.1. Provetes tipus A ..... 63
8.4.2. Provetes tipus B ..... 64
8.4.3. Provetes tipus C ..... 65

**9. BASE DE REFERÈNCIA PER LA DETECCIÓ I IDENTIFICACIÓ ULTRASÒNICA DE DEFECTES EN CORDONS DE SOLDADURA 67**

9.1. Detecció ultrasònica de defectes ..... 67

9.2. Identificació de defectes ..... 67

**10. ASSAIG D'UN CORDÓ DE SOLDADURA REAL UTILITZANT LA BASE DE REFERÈNCIA 69**

10.1. Descripció del mètode operat ..... 69

10.2. Discussió dels resultats de la detecció de defectes ..... 71

10.3. Discussió dels resultats de la identificació i caracterització de defectes ..... 72

10.3.1. Identificació i caracterització del defecte A ..... 73

10.3.2. Indentificació i caracterització del defecte B ..... 73

10.3.3. Identificació i caracterització del defecte C ..... 74

**CONCLUSIONS 75**

**AGRAÏMENTS 77**

**BIBLIOGRAFIA 79**

Referències bibliogràfiques ..... 79

Bibliografia complementària ..... 79

Web's consultades ..... 82

# 1. Glossari

Terminologia dels ultrasons:

*Amplitud*: Unitat per expressar l'amplitud de l'ona. S'expressa correctament en forma d'una pressió en el cas de materials líquids o en forma d'esforç compressional en el cas de materials sòlids: dinas/cm2; Pascals (Newtons/$m^2$), o bars (1 atmosfera).

*Calibració*: Procés mitjançant el qual es fixa l'exactitud i precisió d'un instrument que mesura la propagació d'ones acústiques. A vegades és possible realitzar una calibració mitjançant determinats patrons (ASTM E-317).

*Conversió modal*: Conversió d'un tipus d'ona en un altre. Per exemple, la conversió d'una ona longitudinal en una altre transversal quan la primera incideix en un sòlid sota un determinat angle; generació d'una ona de superfície en funció de l'angle d'incidència de l'ona primària.

*Decibel*: Unitat que expressa la intensitat o amplitud d'un so referida a un altre agafat com a base.

*Defecte*: Fenomen que no és desitjat però que pot ser acceptable dins d'un determinat marge de tolerància establert per a cada tipus de material. En aquest darrer cas, un defecte sol denominar-se imperfecció.

*Deriva*: Variació lenta de la lectura que proporciona un equip i que és independent del seu estímul.

*Error absolut*: La diferència entre un valor mesurat experimentalment i el valor verdader.

*Error elemental*: Incertesa en la mesura efectuada.

*Error en la mesura*: Desviació d'un valor mesurat respecte al valor verdader.

*Error fiducial*: Correntment expressat en forma de variació percentual per un determinat valor.

*Exactitud*: Expressa la proximitat d'una mesura experimental respecte al valor verdader (pres com a referència).

*Imperfecció*: Defecte acceptable sota determinats requeriments.

*Indici*: Acostuma a denominar un resultat que encara no ha estat suficientment interpretat.

*Intensitat*: Unitat de potència acústica. Es sol expressar en Watts/$m^2$ o Watts/$cm^2$.

*Interval de confiança*: Interval de probabilitat per un determinat valor.

*Mesura*: Procés que condueix a la determinació experimental d'una dada.

*Neper:* Raó entre dues amplituds expressades en logaritmes neperians. 1 Np = 8,687 dB. El terme Nepers s'usa per expressar l'atenuació d'una ona (Nepers/cm).

*Ohm acústic*: Unitat de resistència acústica. La impedància acústica es defineix com la resistència acústica d'un so longitudinal sota la pressió de 1 microbar i que genera una velocitat de volum de 1 $cm^3$/s. Aquesta unitat no s'aplica correntment als NDT.

*Ona longitudinal*: Una ona compressional en fluids. En sòlids, indica un esforç compressional dirigit en la mateixa direcció en que es propaga l'ona acústica.

*Ona transversal:* Ona material les partícules de la qual es desplacen ortogonalment a la direcció de propagació. Només els sòlids poden generar aquest tipus d'ona.

*Llindar de discriminació*: El canvi més petit d'un estímul és capaç de generar una resposta en l'equip de mesura.

*Valor verdader*: Sempre referit a un altre pres com a base.

*Zona morta*: Incapacitat d'efectuar una nova mesura després de produir-se el primer eco o una senyal de gran amplitud.

# 2. Prefaci

## 2.1. Origen del projecte

Aquest projecte forma part del projecte DESARROLLO DE UN SISTEMA ROBOTIZADO DE SOLDADURA CON CONTROL ULTRASÓNICO PARA LA DETECCIÓN EN CONTINUO DE DEFECTOS, de l'empresa Tallers Parramon, S.A. Projecte subvencionat pel Centro para el Dessarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) i pel programa PROFIT del Ministerio de Ciencia y Tecnologia.

## 2.2. Motivació

En l'actualitat el sistema robotitzat de soldadura (denominat SOLDAROBOT) està en funcionament amb l'aplicació del control ultrasònic per a la detecció de defectes a temps real de forma genèrica, sense la caracterització d'aquests. Així doncs el present projecte pretén ser una guia per la posada en marxa de forma completa d'aquest sistema, alhora que servirà de model referencial per la detecció i identificació dels defectes produïts en el procés automatitzat de soldadura.

## 2.3. Requeriments previs

Per la correcta comprensió dels continguts específics d'aquest projecte són necessaris coneixements metal·lúrgics de la soldadura i de la tècnica de detecció ultrasònica a nivell de formació d'enginyeria tècnica o superior.

# 3. Introducció

## 3.1. Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és la realització d'una base de referència per la detecció i identificació ultrasònica dels possibles defectes que es poden generar en el procés de soldadura de perfils metàl·lics estructurals.

El projecte pretén arribar a través d'un extens i complex estudi de les respostes ultrasòniques obtingudes en els diferents anàlisis, a una base de referència amb un format gràfic, simple i de fàcil interpretació de les respostes. Constituint una eina de primer ordre per la formació d'especialistes o operaris en la detecció i identificació ultrasònica dels defectes que es puguin originar en el funcionament del SOLDAROBOT.

Per arribar a crear aquesta base de referència es realitzaran anàlisis ultrasònics mitjançant el mètode de l'eco-pulsant a diverses provetes. Aquestes provetes simularan els diversos defectes que es poden originar al llarg del procés de soldadura, per tant hauran estat dissenyades específicament per aquest projecte.

## 3.2. Abast del projecte

L'abast del projecte no queda limitat tant sols a la detecció i identificació de defectes en la soldadura d'elements estructurals metàl·lics, sinó que pretén ser vàlid per la comprovació via ultrasònica de qualsevol tipus de soldadura.

Les conclusions d'aquest projecte poden ser doncs aplicades en la detecció i identificació de defectes de qualsevol unió soldada sempre i quan sigui possible l'aplicació del sistema ultrasònic de detecció de defectes.

# 4. Model de superfície industrial

En condicions normals qualsevol superfície metàl·lica es troba alterada per substàncies contaminants dipositades sobre de la mateixa accidental o voluntàriament, com grasses, olis, pintures de marcatge, residus carbonosos, etc. i fixació de molècules gasoses (vapor d'aigua, etc.). Sota de la superfície lliure, es solen trobar oclusions degudes principalment a processos de transformació i/o conformació de les peces. També es troba una capa alterada químicament causada per la difusió de gasos procedents tant de l'atmosfera com de determinats medis gasosos agressius, cap a l'interior metàl·lic i que provoca la aparició de compostos com òxids, sulfurs, etc. En resum, tota superfície metàl·lica està sotmesa al fenomen de corrosió seca produïda per l'atac per part d'un gas.

Qualsevol procés de soldadura forta posa en joc dues o més superfícies (intercares) que estaran sotmeses a nombrosos fenòmens tant de tipus estructural, físico-químic com metal·lúrgic:

| CARACTERÍSTIQUES D'UNA SUPERFÍCIE | | |
|---|---|---|
| ASPECTE | FENOMEN | CASOS ON ES PRODUEIX |
| Aspectes estructurals | Relaxació<br>Reconstrucció<br>Rugositat<br>Morfologia | Humectació<br>Capil·laritat |
| Aspectes físico-químics | Influencia de la atmosfera circumdant | Oxidació - Reducció d'òxids |
| | Reactivitat superficial | Efecte del flux (fundent-decapant)<br>Dilució i erosió química del MA<br>Difusió en estat sòlid |
| Aspectes metal·lúrgics | Fusió del metall d'aportació<br>Solidificació | |

Taula 4.1. Característiques d'una superfície.

## 4.1. Agents contaminants d'una superfície

Una superfície metàl·lica es troba afectada tant per agents contaminants d'origen extern com intern. La contaminació d'origen extern, en la part superficial és deguda a les molècules gasoses procedents de l'atmosfera que envolta la superfície. En la regió més superficial (fins a 0,0005 μm de profunditat) es troben molècules orgàniques i compostos carbonosos originats per la manipulació de la superfície. En la regió compresa entre els 0,0005 μm i els 0,001 μm de profunditat, els agents que es troben són oclusions i molècules de OH procedents de l'aigua. A una profunditat entorn als 0,01 μm hi ha una capa alterada químicament amb la presència de sulfurs, òxids i sals. A capes més profundes tenen lloc els

agents de contaminació d'origen intern, amb dues regions diferenciables, la d'estequiometria de superfície i la d'estequiometria de massa. Dins la contaminació d'origen interna els agents que l'originen es tracten de cations, metal·loides, i els fenòmens de la difusió, la segregació i la junta de gra. A la Fig. 4.1.1. apareix una esquematització gràfica dels agents contaminants explicats.

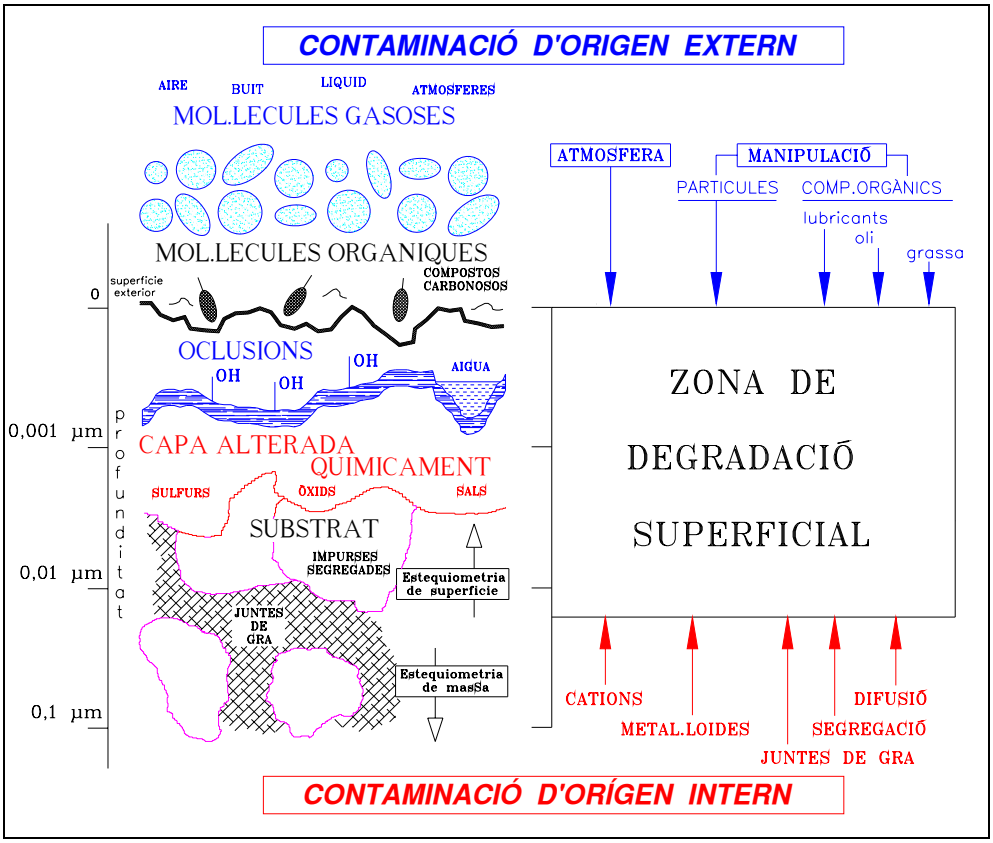



Fig. 4.1.1. Contaminació d'una superfície industrial.

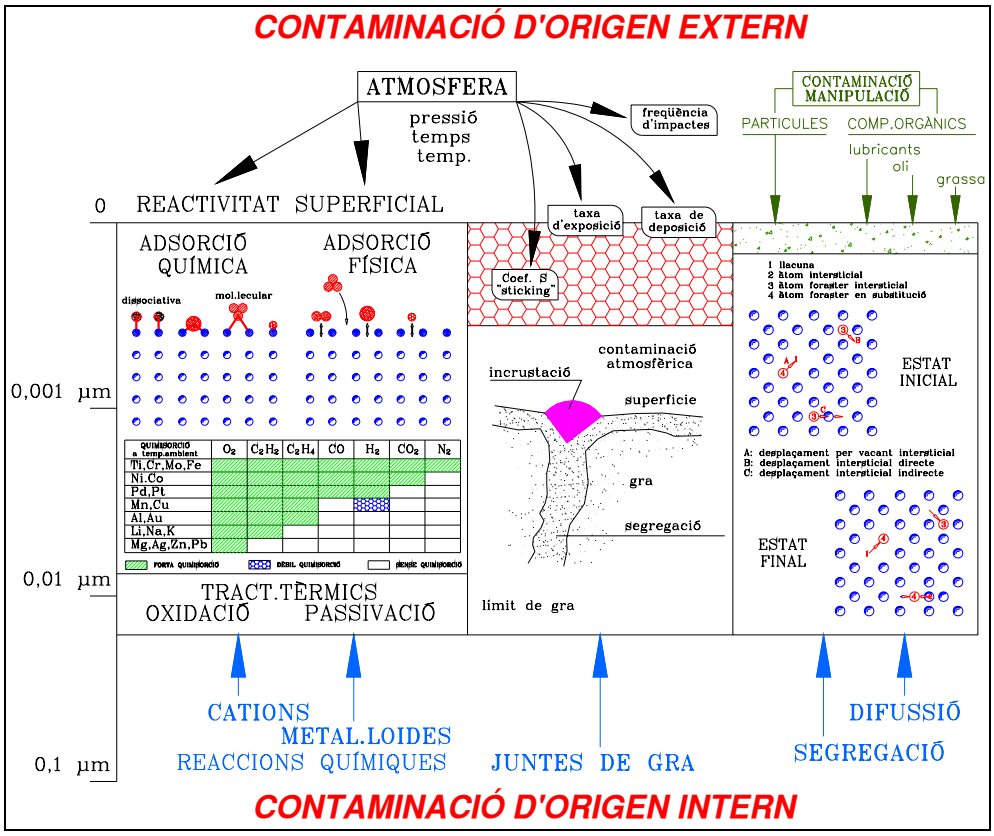



Fig. 4.1.2. Contaminació d'una superfície industrial.

## 4.2. Oxidació del ferro

El ferro posseeix dos graus d'oxidació, per els quals és susceptible de formar varis tipus d'òxids segons les condicions de temperatura i/o pressió ambientals. Les capes successives d'òxids seran paral·leles a la superfície del metall, trobant-se l'òxid més ric en oxigen en contacte amb l'atmosfera oxidant.

En la Fig. 4.2.1. es presenta un tall de la pel·lícula d'oxidació formada sobre el ferro a l'aire a 700ºC. La capa de protòxid de ferro FeO en contacte amb el ferro s'espesseix, i es troba recoberta amb una capa de magnetita $Fe_3O_4$ i d'una capa fina de sesquiòxid de ferro $Fe_2O_3$. Si la oxidació del ferro té lloc a una temperatura inferior a 570ºC, el protòxid de ferro FeO, inestable, no pot formar-se i la pel·lícula conté principalment l'òxid $Fe_3O_4$ recobert d'una fina capa de $Fe_2O_3$. El protòxid de ferro FeO format a altes temperatures es descompon parcialment durant el procés de refredament segons la reacció:

$$4 \cdot FeO \Leftrightarrow Fe_3O_4 + Fe \qquad \text{Eq. 4.2.1.}$$

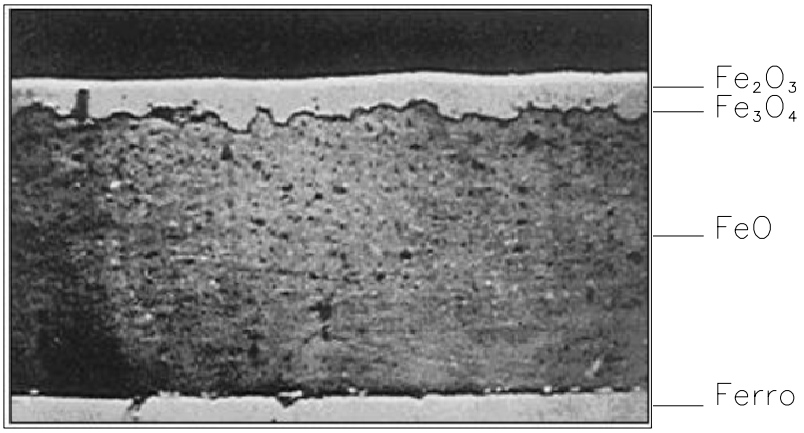



Fig. 4.2.1. Tall d'una pel·lícula d'oxidació sobre ferro a l'aire a 700 ºC. [1]

## 4.3. Formació d'òxid superficial

Qualsevol superfície metàl·lica es recobreix d'una fina capa d'òxids metàl·lics com a conseqüència d'una reacció química entre diferents elements metàl·lics que la composen i l'oxigen atmosfèric a temperatura ambient. El grau d'oxidació superficial varia en cada composició metàl·lica com a conseqüència de la naturalesa dels seus òxids (tenacitat, refractarietat, etc.).

El mecanisme que regeix aquesta reacció química és de naturalesa difusiva i té lloc mitjançant dos processos simultanis. Aquests dos processos es poden veure a la Fig. 4.3.1.

- Difusió de $Me^+$ cap a l'exterior de la capa d'òxids. Aquest anió es combina amb l'oxigen formant-se una nova molècula d'òxid, originant el creixement de la capa oxidada.

- Difusió de l'oxigen cap a l'interior de la massa metàl·lica a través de la capa d'òxids amb la conseqüent oxidació del $Me^+$.

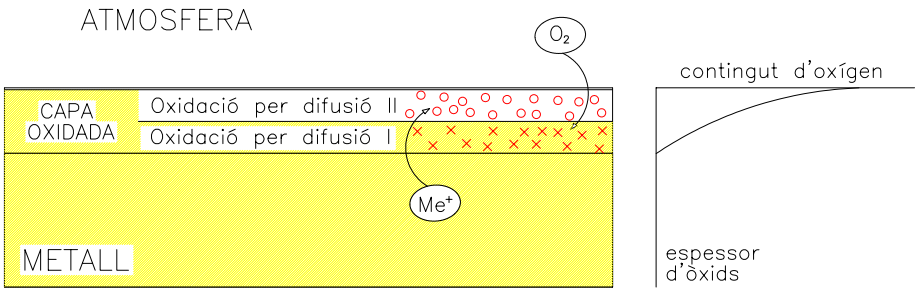



Fig. 4.3.1. Reacció química d'oxidació.

El grau de difusió de cada un dels dos processos és funció del tipus de metall base, dels seus elements d'aliatge i de la temperatura.

Per altre part, la permeabilitat de la capa oxidada és fonamental pel creixement de la mateixa. L'esmentada permeabilitat depèn bàsicament de l'estructura de la capa oxidada, de la seva coherència, del gradient de concentració d'elements d'aliatge i dels condicionants termodinàmics.

Els factors que intervenen en el procés d'oxidació són els següents:

- Puresa del metall.
- Estructura cristal·lina.
- Estat superficial.
- Temperatura i pressió del gas reactiu.

## 4.4. Efecte de la temperatura

En l'estudi realitzat en aquest projecte l'efecte de la temperatura en l'oxidació és molt important degut a que en el procés de soldadura hi ha una gran aportació energètica que implica l'aparició d'un fort gradient tèrmic a la superfície de la peça a soldar.

En els casos en que la velocitat del procés d'oxidació depèn de la difusió, d'acord amb la 1ª Llei de Fick tenim:

$$\lambda = \frac{Dx}{dt} \cong D \cdot \frac{C}{x} \qquad \text{Eq. 4.4.1}$$

D'on: x: és l'espessor de la capa d'òxid.

C: és la concentració d'oxigen a la superfície.

D: és el coeficient de difusió.

Integrant l'expressió anterior: $X^2 = K_p \cdot t$ Eq. 4.4.2

Com que el coeficient de difusió és $D = D_o \cdot e^{-Q \cdot R \cdot T}$ Eq. 4.4.3

Tenim que, $k \cong C \cdot D_o \cdot e^{-Q \cdot R \cdot T}$ Eq. 4.4.4

Per tant, les constants cinètiques $k_L$ y $k_p$ augmenten exponencialment amb la temperatura

$$k_L \cong A_L \cdot e^{-\frac{Q \cdot L}{R \cdot T}} \qquad \text{Eq. 4.4.5}$$

$$k_P \cong A_P \cdot e^{\frac{Q \cdot P}{R \cdot T}} \qquad \text{Eq. 4.4.6}$$

És a dir, la velocitat d'oxidació segueix la llei d'Arrhenius.

# 5. La soldadura

## 5.1. Introducció a la soldadura

Des d'un punt de vista genèric, la paraula soldadura engloba un gran nombre de tècniques destinades a aconseguir unions metàl·liques permanents. Aquestes unions soldades pretenen introduir una continuïtat de propietats entre les dues peces a unir. No sempre es tracta d'aconseguir una unió resistent en que la soldadura estigui capacitada per suportar o transmetre els mateixos esforços a que estan sotmeses les parts, o una fracció d'elles. En ocasions, la soldadura té fonamentalment una finalitat d'estanquitat, de conductivitat elèctrica i/o tèrmica, però inclús en aquests casos s'estableix una continuïtat parcial en el material.

La norma francesa NF C90-550 defineix genèricament la soldadura ("*soudage*") com: "*Opération consistant à réunir deux ou plusiers parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler. Le soudage s'effectue, soit par pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion peut être différent de celle des matières à assembler*." [2]

Les característiques tèrmiques del procés de soldadura condicionen tant el metall base en les proximitats de soldadura com el propi metall fos i/o aportat.

De forma genèrica, les propietats i característiques dels metalls i aliatges depenen fonamentalment de les seves propietats intrínseques i de la seva història, condicionada aquesta darrera pels processos de fabricació i tractaments tèrmics que han sofert. En una unió soldada, tant el metall base com el metall aportat, han sofert un cicle tèrmic degut a l'aportació energètica en el procés de soldadura i per la capacitat de dissipació del calor de la unió soldada. Per tant, la zona propera a la junta presentarà unes característiques microestructurals i mecàniques diferents a les inicials. A aquesta variació de les característiques i propietats intrínseques del material, es sumen les tensions generals, residuals i imposades, com a conseqüència del l'embridament produït per la junta i les tensions d'origen tèrmic. Aquestes tensions poden ser absorbides o no pel material, amb la possibilitat d'originar l'aparició de fissures o esquerdes en la zona de soldadura o d'influència de la mateixa. La magnitud d'aquestes variacions estarà en funció del tipus de procés de soldadura emprat en cada cas.

Al mateix temps, el propi procés de soldadura pot originar discontinuïtats o defectes. De discontinuïtats n'existeixen de diverses tipologies, com serien, les degudes a la variació de la composició química del metall d'aportació, per la dilució amb el metall base, pels seus diferents comportaments (dilatació, conductivitat tèrmica, etc.), per les diferents formes i

dimensions dels grans, per la seva diferent capacitat o per la possible fragilització originada per l'absorció de gasos. En quan als defectes, poden ser originats per variacions incontrolades dels paràmetres del procés de soldadura, osques, porositat, fusió o penetració incompleta, despenjaments, sobreespessors excessius, etc. La combinació d'ambdós fenòmens por originar unions soldades inutilitzables.

En front les incidències que el procés de soldadura pot originar en les característiques de la unió, és lògic que s'estableixin unes condicions i requisits mínims en el disseny i execució, i que posteriorment s'examini la junta per contrastar els resultats obtinguts amb els requisits establerts prèviament.

## 5.2. Classificació dels processos de soldadura

La designació dels processos de soldadura emprats en el present projecte serà la denominació anglosaxona, degut a que aquesta defineix exactament el procés associat a un sol vocable. En altres idiomes, això no és possible.

La classificació de les diferents tipologies de soldadura es realitza atenent a les temperatures de fusió dels diversos materials d'aportació i/o fusió dels metalls base a soldar. Així trobem el procés de soldadura classificat en tres grans grups:

a) Soldadura directa o per fusió (Welding)

b) Soldadura forta (Brazing)

c) Soldadura tova (Soldering)

A la Taula 5.2.1. es mostra el resum de les principals característiques dels diferents tipus de soldadura, on s'indica si en aquell sistema de soldadura existeix fusió o no del material metàl·lic base, si s'utilitza o no material metàl·lic d'aportació, i la temperatura a la qual es realitza la soldadura.

| DENOMINACIÓ | | Fusió Material metàl·lic base | Material metàl·lic d'aportació | Temperatura (ºC) |
|---|---|---|---|---|
| Soldadura elèctrica Soldadura autògena | Welding | SI | SI / NO | > 1.100 |
| Soldadura forta, heterogènia o groga | Brazing | NO | SI | $350 < t \leq 1100$ |
| Soldadura tova | Soldering | NO | SI | $\leq 350$ |

Taula 5.2.1. Classificació tipus de soldadura.

Dins d'aquests tres grups, la soldadura Welding és la única on existeix fusió del material metàl·lic base, i alhora es pot realitzar amb material d'aportació o no. Les altres dues classes de soldadura (Brazing i Soldering) tenen en comú que en totes elles la soldadura es realitza sense fusió del metall base i conseqüentment, sempre s'haurà d'aportar un metall o aliatge, que en funció del procés concret de soldadura, haurà de ser homogeni o heterogeni respecte al material metàl·lic base.

A continuació es defineixen detalladament els diferents tipus de soldadura:

a) La Soldadura Directa o per fusió, també anomenada Welding, és aquella que en s'ha de fondre necessàriament el material metàl·lic base en les proximitats de la junta, amb lo qual generalment la temperatura de procés serà elevada. Aquesta elevada aportació calorífica s'aconsegueix de forma ràpida mitjançant el salt d'un arc elèctric entre un elèctrode i el metall base (soldadura elèctrica). El material metàl·lic d'aportació serà o no necessari. Aquest elèctrode pot ser de W o bé del propi material metàl·lic d'aportació consumible. Per altre part, també es pot arribar a la fusió del material metàl·lic base i/o el metall d'aportació mitjançant un soplet oxiacetilènic o $H_2$-$O_2$ (soldadura autògena).

   La norma francesa NF C90-550, defineix genèricament la soldadura per fusió ("*soudage par fusion*") com: "*Soudage dans lequel la continuité est obtenue par fusion sans intervention de pression*". [1]

   Segons AWS: "*Welding is a process for joining similar metals. Welding joins metals by melting and fusing 1, the base metals being joined and 2, the filler metal applied. Welding employs pinpointed, localized heat input. Most welding involves ferrous-based metals such as steel and stainless steel. Welding covers a temperature range of 1500º F - 3000º F (800ºC - 1635ºC). Weld joints are usually stronger or as strong as the base metals being joined".* [3]

b) La Soldadura Forta (o brazing), es pot definir com el procés metal·lúrgic d'unió de dues o més peces metàl·liques similars o dissimilars, de les quals, la seva amplitud o separació de junta generalment sol ser capil·lar, mitjançant un metall o aliatge d'aportació que penetra a l'interior de la junta en estat líquid, per efecte de la capil·laritat i humectació.

   Aquest metall o aliatge, denominat material metàl·lic d'aportació haurà de complir necessàriament els següents requisits:

   - La temperatura de fusió o de sòlidus ha de ser superior a 425ºC. (La temperatura de 425ºC s'ha agafat de forma arbitrària. Altres autors la situen als 450ºC. No obstant, aquesta temperatura pot estar condicionada a que

existeixen pocs aliatges soldants amb un interval de fusió situat entre 300ºC i 450ºC).

- La temperatura de fusió o de sòlidus ha de ser inferior a la temperatura de fusió o de sòlidus del metall o metalls base a soldar, amb un marge de seguretat de 50ºC.

Al llibre Metals Handbook es cita la següent definició: "*Joining metals by flowing a thin layer, capillary thickness of non ferrous filler metal into the space between them. Bondings results from the intimate contac produced by the dissolution of a small amount of base metal in the molten filler metal, without fusion of the base metal. Sometimes the filler metal is put in place as a thin solid sheet or as a dad layer and the composite is heated as in fournace brazing. The term brazing is used where the temperature exceeds some arbitrary value, such as 800ºF; the term soldering is used for temperatures lower than the arbitrary value.*" [4]

La "American Welding Society (A.W.S.)" defineix aquesta classe de soldadura com: "*Is a group of welding processes wherein coalescence is produced by heating to suitable temperatures above 800ºF and by using a non ferrous filler metal, having a melting point below that of the base metals. The filler metal is distributed between the closely fitted surfaces of the joint by capillarity attraction*." [3]

Segons la norma francesa NF C90-550 es defineix la soldadura brazing ("brasage") com: "*Soudage des pièces métalliques à l'aide d'un métal d'apport à l'ètat liquide ayant une température de fusion inférieure à celle des pièces à réunir et mouillant le(s) métal (métaux) de base qui ne participe (nt) pas, par fusion, à la constitution du joint*." El brasage fort el defineix com: "*Brasage dans lequel un joint, en général capillaire, est obtenu avec un métal d'apport dont la température de fusion (solidus) est supérieure à 450ºC*. " [2]

Aquest procés de soldadura és denominat també amb aquests altres noms:

- Soldadura groga: sistema de soldadura de ferro amb llautó com a metall d'aportació.

- Soldadura indirecta: no existeix fusió del metall base.

- Soldadura heterogènia: permet la soldadura de metalls o aliatges de diferent composició.

c) La Soldadura Tova, denominada també soldadura d'estany, és un procés que té la mateixa definició que el procés de Soldadura Forta, amb la diferencia de que el material metàl·lic d'aportació ha de tenir una temperatura de fusió o de líquidus

inferior als 425ºC. Els aliatges usats habitualment en aquest procés són base estany o plom.

El Comité Européen de Normalisation (CEN) la defineix com: "*A metallic filler material which is used to join metallic parts and which has a melting temperature (solidus) lower than of the parts to be joined and, usually, lower than 450ºC and which wets the parent metals*". [5]

Segons la norma francesa NF C90-550, es defineix la soldadura toba "(*le soudage tendre*") com: "*Brasage à l'aide d'un métal d'apport dont la température de fusion (liquidus) est inférieure à 450ºC*." [2]

## 5.3. Característiques microestructurals i mecàniques

Una soldadura amb metall d'aportació, poc freqüentment es realitza amb un material metàl·lic idèntic al base. En general s'utilitzen materials metàl·lics d'aportació compatibles amb els materials metàl·lics base i amb unes característiques que són funció de la resistència de la junta, dels seus requeriments, del procés de soldadura, de l'equip disponible més idoni per obtenir un rendiment satisfactori, de la posició de la soldadura, etc. Una conseqüència de la diferent composició del material metàl·lic d'aportació respecte al base, és l'existència d'un factor diferenciador de partida en la continuïtat de la junta. El procés de soldadura es reflexa sensiblement a la junta en la qual queda constància de les seves peculiaritats.

El cicle tèrmic associat a l'aportació de calor i a la seva dissipació a través de la junta no tan sols és funció de la massa del material metàl·lic base que pot actuar com a embornal de calor, sinó també dels paràmetres del procés, com són la temperatura de precalentament i de soldadura. El cicle tèrmic té una influència indiscutible en les característiques microestructurals de la soldadura i també en la zona propera a la junta, denominada Zona Afectada Tèrmicament (ZAT).

L'efecte del revingut a una determinada profunditat equival a una zona tèrmicament afectada per la soldadura, fet que pot produir una certa compensació en l'aspecte microestructural. No obstant, no es compensaran les tensions residuals produïdes per la contracció de la soldadura.

La major o menor possibilitat d'aportació d'hidrogen o altres gasos a la soldadura, amb els possibles riscos inherents de fissuració o fragilització són funció del tipus de soldadura i dels materials metàl·lics que entren en joc. També els materials metàl·lics base i d'aportació tenen de per si una major o menor aptitud per a la soldadura.

Tots els aspectes mencionats anteriorment porten en si una variació de la microestructura del material, al llarg i ample de la unió, que compren la soldadura i les zones afectades tèrmicament (ZAT's). Al ser les propietats d'un material el reflex de la seva microestructura, les característiques mecàniques de la unió variaran d'un punt a un altre. No obstant, aquesta variació en les característiques mecàniques no afecta únicament al límit elàstic i a la càrrega de ruptura. L'allargament i la resiliència també varien i per tant les característiques de tenacitat i fragilitat seran diferents a les del metall base.

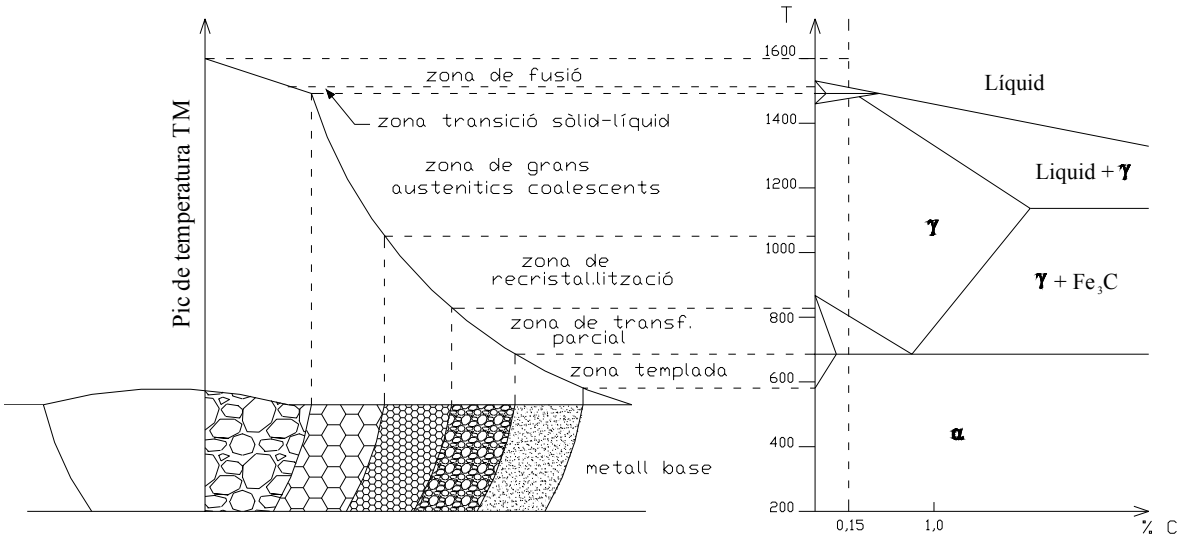



Fig. 5.3.1. Diagrama Fe-C d'equilibri.

## 5.4. Sistema de tensions

Els fenòmens de fusió i posterior solidificació que s'originen al llarg del procés de soldadura, que no són simultanis al llarg de la línia de soldadura ni en la massa de la mateixa, porten en si la generació d'una sèrie de tensions originades per les dilatacions i contraccions que han de ser, en la major part, absorbides pel propi material de la unió soldada. Si addicionalment les parts a unir no permeten un moviment macroscòpic del material, és a dir, estan fortament embridades, les tensions a la unió creixen sensiblement. A més, la junta haurà de suportar les tensions de servei de la peça.

Tant el disseny com la execució de la soldadura són de vital importància per assegurar que la unió soldada suporti les tensions internes i externes de servei sense que es produeixin fissures. Per aquest motiu les exigències de qualitat, el seu control i la inspecció de la soldadura adquireixen uns gran rellevància.

És evident, que entre tots els defectes de la soldadura, l'esquerda o fissura és la pitjor. Per una part, per que indiquen que el material en algun moment ha no ha estat capaç de suportar

els esforços a que estava sotmès, i encara que les tensions hagin estat relaxades al formar-se l'esquerda, la concentració de tensions existents en el fons de la mateixa poden provocar la seva propagació amb un nivell inferior de tensions remotes.

## 5.5. Requisits de qualitat

La responsabilitat d'una unió soldada i les incidències que poden concórrer en la mateixa, des del disseny fins al servei, requereix englobar tot el procés de realització dins d'una sistemàtica de control o garantia de qualitat. La sistemàtica de qualitat ha d'incloure la verificació de les condicions de disseny en la situació idònia dels materials per a la realització de la unió soldada i per a la funció resistent mecànica i química, en la idoneïtat de la junta a realitzar, el en procés seleccionat i els seus requeriments d'homologació. Així també, en el control previ del material a soldar, a la selecció del metall d'aportació, així com en la concreció dels requisits d'execució de la soldadura, exàmens no destructius i patrons d'acceptació.

## 5.6. Tecnologia de soldadura aplicada al procés de fabricació de perfils de gran longitud.

### 5.6.1. Tecnologia de soldadura

El present projecte estudia la tecnologia de soldadura per arc, fil continu d'aportació i atmosfera protectora MAG. El sistema MAG (Metal Active Gas) opera en condicions de protecció gasosa, de forma que en tot moment el bany de fusió i el fil metàl·lic continu d'aportació romanen protegits de l'aire per una atmosfera (mescla de gasos nobles i $CO_2$ amb o sense presència d'oxigen) canalitzada mitjançant un broquet entorn de l'esmentat fil. Es tracta d'una variant d'un sistema anterior (sistema de soldadura per arc MIG –Metal Inert Gas-) iniciat i desenvolupat als Estats Units d'Amèrica durant la dècada 1950-1960. El seu desenvolupament ha estat marcat per innovacions de tipus incremental molt estretament vinculades al Know-how dels usuaris industrials, i a les solucions de tipus ad hoc que al llarg dels últims temps s'han donat als problemes plantejats especialment per a la construcció de plataformes off-shore, bucs, estructures metàl·liques de perfil variable, pòrtics, ponts i ponts-grua.

En efecte, la soldadura MAG és un procés versàtil, podent dipositar l'aportació a gran velocitat i en totes les posicions. Aquest tipus de soldadura permet unir la major part de materials, essent compatible amb una àmplia gamma de metalls d'aportació. El procediment és molt utilitzat en espessors relativament prims i intermitjos, en fabricacions d'estructures d'acer i d'aliatges d'alumini, especialment on es requereix un gran percentatge de treball

manual. La introducció de fils tubulars és particularment idònia en els casos on es requereixen majors espessors. Cal destacar que la utilització de fils sòlids i fils tubulars permet arribar a eficiències de fins el 80-85%.

Una de les prestacions més interessants del sistema MAG resideix en la possibilitat de que el material metàl·lic d'aportació sigui transferit a l'arc mitjançant un procés generador de "grans gotes" o "*weld bead*". El control d'aquest procés depèn críticament dels següents factors:

a) Calibratge del règim de pulsació de la corrent continua que alimenta l'arc (amperatge i tensió).

b) Composició de la mescla protectora d'argó (Ar), heli (He), diòxid de carboni ($CO_2$) i oxigen ($O_2$).

c) Velocitat del recorregut (travel speed).

### 5.6.2. Principals defectes en el procés de soldadura

En el procés de soldadura MAG dels perfils estructurals metàl·lics es poden originar diferents tipus de defectes, els quals hauran de ser detectats mitjançant l'anàlisi ultrasònic a temps real del cordó de soldadura. Els principals defectes, i les possibles causes apareixen a la Taula 5.6.2.1. que està a continuació.

| DEFECTE | CAUSA |
|---|---|
| Porositat | 1. Humitat del gas.<br>2. Brutícia, òxid.<br>3. Arc de soldadura massa llarg. |
| Esquerdes en calent | 1. Peces brutes.<br>2. Cantells molt vinculants.<br>3. Soldadures amb cordó tèrmic massa elevat.<br>4. Material d'aportació impur.<br>5. Material base amb elevat contingut de carboni, sofre i altres impureses. |
| Poca penetració | 1. Corrent aparell de soldadura insuficient.<br>2. Alimentació del filferro no constant.<br>3. Cantells massa separats.<br>4. Xamfrà molt petit.<br>5. Protuberància excessiva. |
| Poca fusió | 1. Moviment brusc de la torxa.<br>2. Inductància no ideal en Short-Spray Arc.<br>3. Tensió molt baixa.<br>4. Resistència de l'òxid. |
| Talls laterals | 1. Velocitat de soldadura excessiva.<br>2. Tensió de soldadura molt alta. |
| Ruptures | 1. Tipus de fil ferro inadequat.<br>2. Mala qualitat de les peces a soldar. |

| | |
|---|---|
| Esquitxades excessives | 1. Tensió molt alta.<br>2. Inductància no ideal en Short-Spray Arc.<br>3. Caputxó brut.<br>4. Torxa massa inclinada. |
| Defectes de perfil | 1. El fil ferro sobresurt massa.<br>2. Corrent molt baixa. |

Taula 5.6.2.1. Defectes en el procés de soldadura i causes que els originen. [6]

# 6. Bases d'interpretació de la inspecció no destructiva de cordons de soldadura per reflexió d'ones per defectes

## 6.1. Principis bàsics

Tots els materials estan composats per àtoms, els quals estan sotmesos a forces degudes a moviments vibratoris que els desplacen de la seva posició d'equilibri. A nivell atòmic existeixen diferents tipologies de moviments vibratoris, no obstant, molts són irrellevants en els tests ultrasònics. L'acústica està basada en partícules que contenen diversos àtoms que es mouen a l'uníson per produir ones mecàniques. Quan un material no està sotmès a tensions o compressions més enllà del seu límit elàstic, aquestes partícules individuals creen oscil·lacions elàstiques. Quan les partícules d'un medi són desplaçades de les seves posicions d'equilibri sorgeixen forces internes restauradores (electrostàtiques). És en aquestes forces restauradores entre partícules combinades amb la inèrcia de les partícules que s'indueixen els moviments oscil·latoris del medi.

En els sòlids, les ones sonores es poden propagar principalment de quatre formes, basades en l'oscil·lació de les partícules. El so pot propagar-se com ones longitudinals, ones de caràcter mixt, ones superficials, i en materials de poc espessor, com ones laminars. Les ones longitudinals i les de caràcter mixt es tracten de les dues formes de propagació més extensament usades en els tests ultrasònics. El moviment de partícules responsable de la propagació de les ones longitudinals i les de caràcter mixt, està il·lustrat a la Fig. 6.1.1.

En les ones longitudinals, les oscil·lacions tenen lloc en la direcció longitudinal de la direcció de propagació de la ona. Aquestes ones són generalment anomenades ones compressionals o de pressió al ser originades per les forces compressionals i de dilatació. En ocasions són anomenades també ones de densitat degut a que la densitat de les seves partícules fluctua amb el moviment. Les ones de compressió poden ser generades en líquids com en el cas dels sòlids, perquè l'energia viatja a través de l'estructura atòmica mitjançant moviments de compressió i expansió.

En les ones transversals o de caràcter mixt, les partícules oscil·len en un angle correcte o transversalment a la direcció de propagació. Les ones de caràcter mixt requereixen un material acústic sòlid per una efectiva propagació, i per tant no són efectivament propagades en materials com líquids o gasosos. Aquestes ones són relativament febles comparades amb les longitudinals, de fet, són usualment generades en materials usant part d'energia procedent de les ones longitudinals.

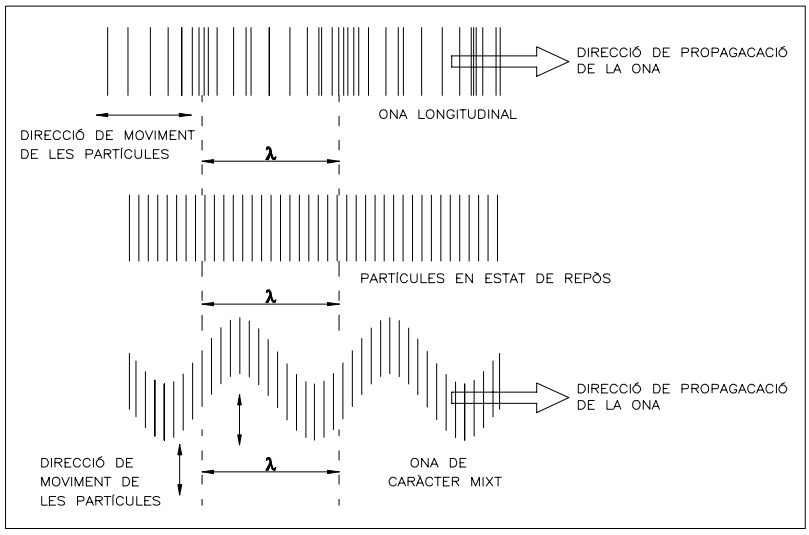



Fig. 6.1.1. Moviment de les partícules responsables de la propagació de les ones. [8]

## 6.2. Els ultrasons en els tests no destructius

Els ultrasons són ones acústiques que posseeixen una longitud d'ona (λ) molt més curta que els sons audibles per l'oïda humana. La freqüència (f) dels ultrasons s'estén per sobre del límit superior audible humà (20 kHz) fins arribar, als efectes de les seves aplicacions industrials, a la zona compresa entre 100 kHz i 50 MHz. L'anomenada microscòpia acústica requereix per la seva pròpia finalitat ultrasons de freqüència superior a 50 MHz, sobrepassant inclús 1 GHz.

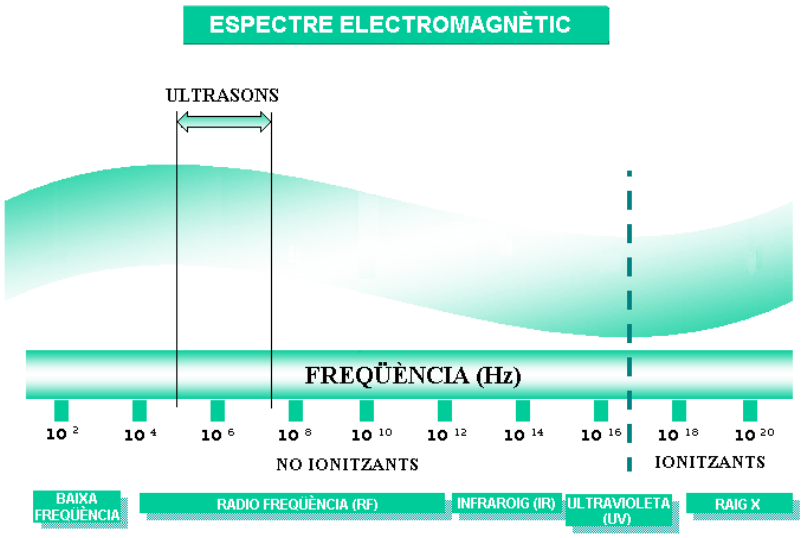



Fig. 6.2.1. Espectre electromagnètic

En un material idealment elàstic, la velocitat de propagació (c) d'una ona ultrasònica que es propagui en ell roman constant sempre i quan tant la pressió com la temperatura del material es mantinguin també constants. Les variables c, f, $\lambda$ i el temps T (període) que la ona ultrasònica requereix per completar un cicle del seu moviment harmònic es relacionen entre si a través de les fórmules de l'òptica clàssica.

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad \text{Eq. 6.2.1}$$

$$\lambda = C \cdot T \qquad \text{Eq. 6.2.2}$$

$$f = \frac{1}{T} \qquad \text{Eq. 6.2.3}$$

Sense cap mena de dubte, el fenomen de la propagació i difusió d'ones ultrasòniques en diversos materials constitueix un dels fenòmens millor estudiats al llarg dels darrers cinquanta anys. L'interès per aquest tipus de fenomen ha sorgit de molt diversos requeriments cientificotecnològics com per exemple: la inspecció no destructiva de materials i unions de soldadura (Non Destrutive Test , NDT), la verificació de microcircuits electrònics, el reconeixement de terrenys per a la construcció, exploracions geofísiques i prediccions sísmiques, i la modelització matemàtica de fenòmens associats a la propagació d'ones.

Cadascuna d'aquestes aplicacions requereix, per suposat, uns rangs operatius específics:

| APLICACIÓ | LONGITUD D'ONA | FREQÜÈNCIA | OBJECTE DESTACAT |
|---|---|---|---|
| N.D.T. | 0.1 – 100 mm | 25 kHz- 15 MHz | 1 – 10's mm |
| Electrònica | 0.05 mm | > 40MHz | 0.01 mm |
| Enginyeria civil | 10 m | 100's Hz | 1 – 10's m |
| Geofísica | 40 Km | 0.05 Hz | 1000 Km |

Taula 6.2.1. Rangs ultrasònics operatius en funció de la seva aplicació.

Cal destacar que els mètodes d'inspecció no destructiva (NDT) mitjançant ones ultrasòniques utilitzen ones acústiques longitudinals L, o bé, ones acústiques transversals T. Les primeres són ones compressionals de forma que el seu avanç provoca desplaçaments de les partícules del material en la mateixa direcció de la seva propagació. Les segones, per el contrari, desplacen les partícules del material en la direcció ortogonal a la direcció de la seva propagació. Com és ben conegut, és molt poc freqüent que existeixin ones que siguin purament L o T, a la pràctica, es troben ones de caràcter mixt [L+T].

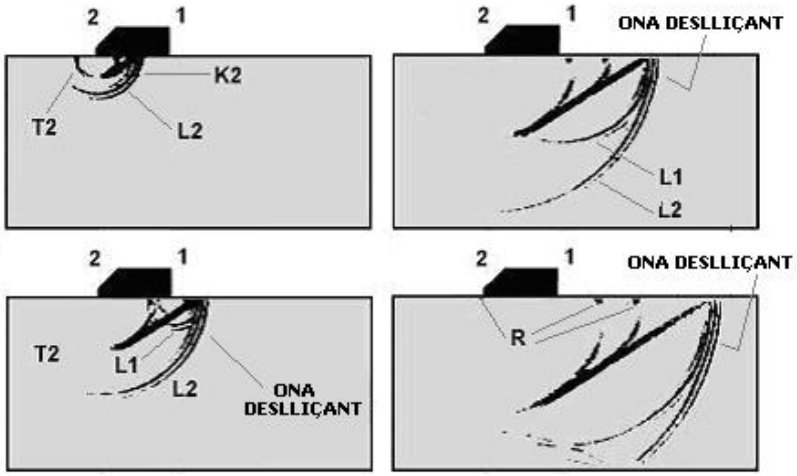



Fig. 6.2.2. Interacció ones ultrasòniques L, T, R y K a partir d'un transductor-receptor.

Amb tot, la tipologia de les ones ultrasòniques de les quals la seva trajectòria ha de ser registrada, analitzada i interpretada mitjançant un únic transductor-receptor (veure Fig. 6.2.2.) s'engloben en quatre grans categories:

- Ona directa, preponderantment transversal T.

- Ona directa, preponderantment longitudinal, L.

- Ona deslliçant de caràcter mixt (*creeping wave o surface Rayleigh wave R*) que es propaga amb la velocitat de l'ona directa longitudinal L. Les ones R són particularment útils per la inspecció de defectes superficials o pròxims a la superfície d'aplicació del transductor-receptor (Veure Fig. 6.2.2.).

- Ona capçal de caràcter mixt (*head wave K*) que es detecta únicament en materials amb espessor menor a la longitud d'ona de les ones directes utilitzades.

En els tests ultrasònics l'inspector ha de prendre la decisió sobre la freqüència del transductor que utilitzarà. El variar la freqüència quan la velocitat del so està fixada resulta en un canvi de la longitud d'ona del so. A l'annex A es troba una taula amb les velocitats del so a través de diferents materials. La longitud d'ona de l'ultrasò usat afecta significativament a la probabilitat de detectar una discontinuïtat.

Sensibilitat i resolució són dos termes freqüentment usats en inspeccions ultrasòniques per tal de descriure la capacitat de localitzar defectes amb la tècnica emprada. La sensibilitat és la capacitat de localitzar petites discontinuïtats; i generalment augmenta al augmentar la freqüència. La resolució és la capacitat del sistema per localitzar discontinuïtats que estan pròximes entre elles dins del material o localitzades a prop de la superfície. La resolució a més a més generalment augmenta amb l'increment de la freqüència.

La freqüència de l'ona pot afectar negativament la capacitat d'una inspecció. La selecció de la freqüència òptima d'inspecció sovint complica conservar el balanç entre resultats favorables i desfavorables. Abans de seleccionar la freqüència d'inspecció, s'han de tenir en compte aspectes com l'estructura de gra, l'espessor del material, la dimensió, el tipus i la possible localització del defecte. Amb l'augment de la freqüència, el so tendeix a dispersar-se de la trajectòria de l'estructura de gra i de les petites imperfeccions dins del material. Per exemple, els materials de forja amb estructura de gra direccional i polida, poden ser inspeccionats amb transductors d'alta freqüència.

És important mencionar que existeixen també altres variables que poden afectar la capacitat de l'ultrasò per localitzar els defectes. Aquestes variables són la longitud del pols, el tipus i voltatge aplicat al cristall, les propietats del cristall, la dimensió del transductor i el circuit electrònic de l'aparell receptor.

### 6.2.1. Situació actual dels ultrasons en els tests no destructius

Els anàlisis ultrasònics es practiquen des de fa vàries dècades, però dels anys cinquanta fins a l'actualitat el desenvolupament de l'instrumental tecnològic ha sofert grans progressos, que amb el suport dels ordinadors ha permès crear aparells amb gran un potencial.

En els seus inicis només eren aplicats en el camp dels metalls, però amb la investigació en nous aparells, aquests s'han aplicat en el camp dels materials composites, on la seva anisotropia i no homogeneïtat tenen una importància rellevant.

Amb la incorporació d'aplicacions informàtiques als aparells de mesura, a permès disposar d'instruments amb un gran potencial tant de capacitat d'emmagatzematge d'informació com de processament d'aquesta. El ràpid avanç en les capacitats de digitalització i computerització informàtica de dades ha permès canviar els tipus d'algorismes utilitzats per processar els resultats obtinguts, alhora que els sistemes d'imatge d'alta resolució permeten una visualització d'alt qualitat de les ones.

### 6.2.2. Situació futura dels ultrasons en tests no de destructius

Mirant en el futur, aquesta branca dels NDT proporciona un gran ventall d'oportunitats. Empreses de defensa o que treballen amb energia nuclear han jugat i juguen un paper molt important en el progrés dels ultrasons dins els tests no destructius, on la seguretat en els seus productes o instal·lacions és un factor primordial. En empreses del sector aeronàutic també s'estan portant a terme investigacions en aquesta branca dels NDT per facilitar el treball i proporcionar les mesures de seguretat i controls de qualitat exigits.

L'augment constant de la competència global ha impulsat i impulsa a canvis substancials en el desenvolupament i els cicles econòmics del mercat dels aparells d'inspecció utrasònica.

## 6.3. Introducció a la inspecció ultrasònica

Els tests ultrasònics utilitzen altres freqüències d'energia sonora per realitzar les mesures i les inspeccions. La inspecció ultrasònica pot ser emprada per l'avaluació i detecció de defectes, mesures de dimensionament, caracterització de materials i altres finalitats.

El sistema típic de test ultrasònic consisteix en diverses unitats funcionals, com l'aparell emissor-receptor, el transductor i la pantalla o dispositiu de visualització dels resultats. L'aparell electrònic emissor-receptor produeix polsos elèctrics d'alt voltatge, que a través del transductor es converteixen en energia ultrasònica d'alta freqüència. L'energia sonora és introduïda i propagada a través dels materials en forma d'ones. Quan existeix una discontinuïtat en el curs de la ona, part de l'energia rebota en la superfície del defecte. El senyal d'aquesta ona reflectida és transformada en un senyal elèctric mitjançant el transductor el qual serà visible en la pantalla de visualització de la resposta.

La inspecció ultrasònica és un sistema de Test No Destructiu (NDT) molt útil i versàtil. Algunes dels avantatges d'aquest sistema són:

- És sensible a les discontinuïtats de la superfície superior i inferior de la peça en estudi.
- La profunditat de penetració en la detecció de defectes és superior a la dels altres NDT.
- Només és necessari l'anàlisi d'una de les dues cares de la peça a analitzar quan s'utilitza la tècnica de l'eco-pulsant.
- Gran precisió per determinar grandàries i contorns.
- Requeriments de preparació prèvia mínims.
- Els aparells electrònics permeten resultats instantanis.
- Possibilitat de generar imatges detallades amb sistemes automàtics.

No obstant, la inspecció ultrasònica també presenta les següents limitacions:

- La superfície ha de ser accessible per tal de transmetre els ultrasons.
- La habilitat i formació prèvia necessària per la interpretació dels resultats és major que en alguns altres NDT.

- Es requereix la presència d'un medi acoblant per transferir els ultrasons a la peça a analitzar.

- Els materials rugosos i de perfils irregulars són de difícil inspecció.

- Les fundicions i altres materials de gra coalescent són de difícil inspecció degut a la baixa transmissió del so i l'elevat senyal de soroll.

- Els defectes orientats paral·lelament al feix sonor no solen ser detectats.

- Són necessaris estàndards de referència per tal de calibrar l'aparell i caracteritzar-ne els defectes.

## 6.4. Aparell emissor-receptor de polsos elèctrics d'alt voltatge

L'aparell emissor-receptor de polsos ultrasònics té una gran importància en els tests ultrasònics. No obstant, existeixen aparells només emissors de polsos ultrasònics els quals usats conjuntament amb un oscil·loscopi per tal de visualitzar les respostes, compleixen el mateix servei que els aparells emissors-receptors, els quals porten aquest oscil·loscopi integrat. Aquests aparells, junt amb el transductor apropiat poden ser utilitzats per la detecció de defectes i mesura d'espessors en gran varietat de materials metàl·lics, plàstics, ceràmics i composites, alhora que proporcionen una gran reducció de costos al realitzar els NDT.

L'instrument genera curts polsos elèctrics d'energia de llarga amplitud, que són convertits en curts polsos ultrasònics al ser aplicats a un transductor ultrasònic. La majoria d'aparells generadors de polsos disposen de sortides de molt baixa impedància per tal d'utilitzar en transductors de gran conducció. Les funcions de control associades al circuit generador de polsos inclouen:

- Longitud del pols o *Damping (*El temps total que el pols s'aplica al transductor).

- Energia del pols (El voltatge aplicat al transductor. Els circuits generadors de polsos solen aplicar entre 100 i 800 Volts al transductor).

En l'aspecte de la recepció, els senyals de voltatge produïts pel transductor, es tracten dels polsos ultrasònics rebuts ampliats. El senyal de ràdio freqüència amplificada (RF) és disponible com una sortida per al display o per a ser capturada per tal de processar-ne el senyal. Les funcions de control associades al circuit receptor inclouen:

- Senyal rectificada ( la senyal RF pot ser visualitzada com a mitja ona positiva, mitja ona negativa o ona completa).

- Filtres per modelar i suavitzar les senyals captades.
- Guany o amplificació de senyal.
- Control de rebuig (*Reject*).

## 6.5. Transductor piezoelèctric

La conversió dels polsos elèctrics emesos en vibracions mecàniques i la conversió de les vibracions mecàniques rebudes en energia elèctrica és la base dels tests ultrasònics. L'element actiu és el cor del transductor, que converteix l'energia elèctrica en energia acústica i viceversa. L'element actiu és bàsicament una peça de material polaritzat amb elèctrodes adjunts a dues de les seves cares oposades. Quan un camp elèctric és aplicat a través del material, les molècules polaritzades s'alineen elles mateixes amb el camp, resultant-ne dipols induïts dins de l'estructura molecular o cristal·lina del material. Aquesta alineació de molècules provoca un canvi en la dimensió del material. Un material permanentment polaritzat com el quars ($SiO_2$) o el titaniat de bari ($BaTiO_3$) produirà un camp elèctric quan el material canviï de dimensions degut a la força mecànica imposada. Aquest fenomen és conegut com l'efecte piezoelèctric.

L'element actiu més utilitzat actualment en transductors acústics es tracta de la ceràmica piezoelèctrica, que es pot tallar de diverses formes per tal de produir diferents tipus d'ones. L'element actiu en ocasions és anomenat "el cristall", que és tal com s'anomenava als inicis de la història dels NDT. Quan les ceràmiques piezoelèctriques van ser introduïdes en els NDT, ràpidament van passar a ser el material dominant en la fabricació dels transductors, ja que alhora de tenir molt bones propietats piezoelèctriques admeten la seva fabricació en diferents formes i dimensions.

El primer material piezoceràmic generalment utilitzat va ser el titaniat de bari, succeït durant els anys 60 per composts de Titaniat zirconat de plom que en l'actualitat encara són emprats en la fabricació de transductors. No obstant, en algunes aplicacions s'utilitzen nous materials com piezopolímers i piezocomposites.

L'espessor de l'element actiu és determinant per la freqüència desitjada del transductor. Un element actiu prim vibra amb una longitud d'ona que és el doble de l'espessor. Per tant, els cristalls piezoelèctrics es tallen a un espessor que és la meitat de la longitud d'ona desitjada. Així, una major freqüència en el transductor implica un menor espessor de material actiu, fet que explica la raó per la qual no es fabriquen transductors d'alta freqüència, ja que aquests resultarien molt fràgils al disposar d'un material actiu d'espessor molt petit.

La freqüència central defineix la capacitat d'un transductor. Baixes freqüències (0.5 MHz-2,25 MHz) proporcionen gran energia i penetració en el material, mentre que els cristalls d'alta freqüència (15,0 MHz – 25,0 MHz) proporcionen una reduïda penetració però una alta sensibilitat per a petites discontinuïtats (la sensibilitat d'un transductor a petits defectes és proporcional a l'eficiència del transductor com a emissor i receptor).

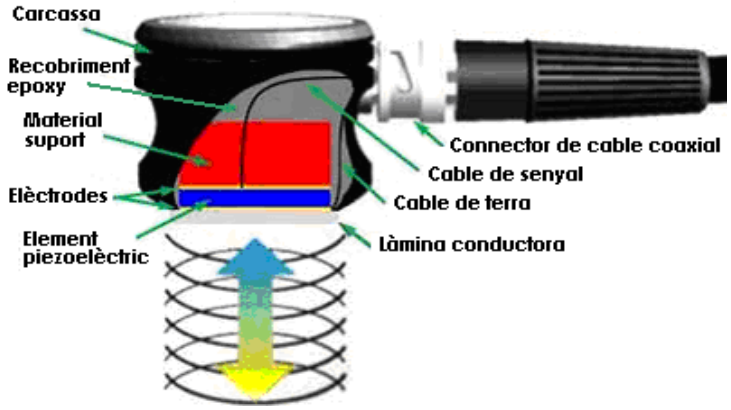



Fig. 6.5.1. Parts components d'un transductor piezoelèctric.

Els transductors estan classificats en funció de la seva aplicació:

- Transductors de contacte: Usats per inspeccions amb contacte directe i generalment manipulats de forma manual. Aquests transductors tenen dissenys ergonòmics per tal de facilitar-ne el seu moviment al llarg de la superfície a analitzar. S'utilitzen conjuntament amb materials acoblants com aigua, grassa, olis o materials comercials específics per tal d'eliminar la pel·lícula d'aire existent entre el transductor i el component a inspeccionar.

- Transductors d'immersió: No estan en contacte directe amb la peça a examinar, sinó que estan dissenyats per operar en un medi líquid i totes les seves connexions són hermètiques. Aquest tipus de transductors poden ser adquirits amb lents planes, enfocades cilíndricament o enfocades esfèricament. Un transductor enfocat concentra l'energia sonora en una àrea petita millorant-se'n la sensibilitat i la resolució axial. Generalment aquest tipus de transductors són usats en tancs d'aigua.

- Transductors amb feix d'ones en angle: Són típicament usats per introduir ones de caràcter mixt refractades a l'interior del material a analitzar. Poden trobar-se'n models amb gran varietat d'angles fixes o variables que determinen els angles de les ones incidents i refractades. La seva aplicació més usual consisteix en utilitzar-los per generar ones superficials per tal detecció de defectes superficials.

- Transductors de pinzell: Utilitzats per escannejar zones molt amples. Aquests transductors són llargs i estrets, construïts per una formació de petits cristalls

cautelosament aparellats per tal de minimitzar la variació de la seva funció i mantenir una sensibilitat uniforme a tota l'àrea del transductor.

- Transductors d'ones de caràcter mixt amb incidència normal: Són particulars perquè permeten introduir ones de caràcter mixt directament a la peça a analitzar sense necessitat d'utilitzar un suport amb l'angle del feix d'ones desitjat.

- Transductors amb retard de línia: Proporcionen versatilitat amb gran varietat d'opcions. La seva principal funció és la introducció d'un retard de temps entre la generació de l'ona sonora i l'arribada de les ones reflectides. Estan dissenyats per aplicacions que requereixen una gran precisió en la mesura de l'espessor en materials molt prims. En ocasions són utilitzats en aplicacions de mesura a alta temperatura.

## 6.6. Medi acoblant

Una part vital de qualsevol assaig ultrasònic és el medi per el qual és transmesa l'energia entre el transductor i la peça a analitzar, aquest és doncs el rol de l'acoblant ultrasònic. La seva finalitat és compensar el possible contacte defectuós entre ambdues superfícies causat per curvatures i/o irregularitats superficials, sempre presents en qualsevol superfície industrial.

El tipus de líquid acoblant emprat depèn de l'aplicació i de la naturalesa de la peça a analitzar.

Les aplicacions ultrasòniques poden ser portades a terme de forma manual i de forma automàtica. Històricament, en els tests manuals l'oli era el líquid acoblant més emprat, però en l'actualitat existeix una extensa gamma comercial d'olis i gels amb base aigua. Aquests anàlisis manuals generalment s'acostumen a realitzar mitjançant aparells ultrasònics portàtils, tal i com es pot veure a la Fig. 6.6.2.

Una de les tècniques automatitzades més emprada és el test d'immersió (veure Fig. 6.6.1.), on el transductor (o sonda) realitza l'escannejat de la peça controlat a través d'una computadora. Aquest sistema implica tenir submergit en un tanc d'aigua tant la peça a analitzar com el transductor, essent així l'aigua el medi acoblant. Amb aquesta tècnica s'obté un nivell d'acoblament constant i conseqüentment una major sensibilitat.

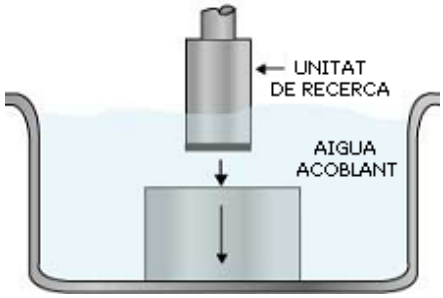



Fig. 6.6.1. Anàlisi ultrasònic d'immersió.

A vegades, la presència d'aquests líquids acoblants és un inconvenient al suposar certes limitacions en el tipus de test que podrà ser realitzat. En el cas del test manual l'aplicació i retirada de l'acoblant implica una pèrdua de temps suposant un increment en el cost del procés. Un altre problema freqüent és la falta de líquid acoblant a la cara de contacte de la proveta causant una variació de l'amplitud de senyal que dificulta la seva interpretació. Aquest problema és més pronunciat quan la superfície de la peça a analitzar és rugosa i la velocitat d'escanejat és elevada.

La limitació més important en l'ús d'un líquid acoblant és la possible contaminació que pot produir aquest en la superfície del material a inspeccionar. Exemples en són les estructures de cel·la oberta, materials porosos i molts materials i composites que sofreixen una contaminació no acceptable amb el contacte prolongat amb els líquids acoblants. Òbviament aquest fenomen és molt més crític per components que requereixen tests d'immersió. S'han realitzat molts intents per tal de superar aquestes limitacions mitjançant tècniques sense contacte, com ultrasons amb acoblament d'aire, sistemes de generació i detecció per làser, i transductors acústics electromagnètics (EMATS).

Un altre possible sistema substitutiu del líquid acoblant és l'ús d'un medi sòlid acoblant (Fig. 6.6.2.). Els transductors d'aquest tipus solen utilitzar una superfície de goma tova entre el transductor i la peça a analitzar, la qual es conforma entorn les ondulacions de la superfície a analitzar a degut a la pressió de contacte.

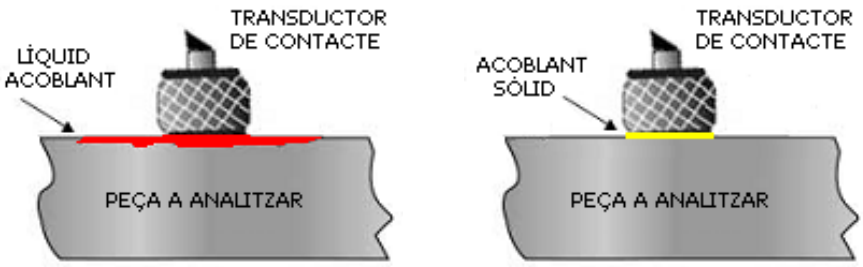



Fig. 6.6.2. Anàlisi ultrasònic amb medi acoblant líquid, i amb medi acoblant sòlid.

No obstant, els millors resultats que es poden obtenir en l'actualitat és a través del medi acoblant líquid, ja que els medis gasós i/o sòlid produeixen una gran interferència ultrasònica que oculta una part més o menys gran de la senyal identificava del defecte detectat.

## 6.7. Mètode de l'eco-pulsant

La tecnologia actual ofereix dues vies metodològiques molt diferents entre si. En una d'elles, els defectes de soldadura es detecten gràcies al fenomen de la transmissió d'ones acústiques a través dels possibles defectes presents en el material; en l'altre, els defectes es detecten mitjançant l'eco-pulsant o reflexió de les ones acústiques que incideixen sobre els mateixos. El mètode d'eco-pulsant és en l'actualitat el mètode d'inspecció ultrasònica més emprat en els tests no destructius (NDT) de soldadures, alhora que pot ser usat per obtenir informació tridimensional d'alta qualitat sobre el component explorat. No obstant, aquesta interpretació de les exploracions de l'eco-pulsant freqüentment resulta dificultosa, particularment quan estan presents geometries peculiars (com serien soldadures incompletes) o bé es tracta de components de gran longitud.

El mètode de l'eco-pulsant és indiscutiblement el més idoni per portar a terme la inspecció de la qualitat d'unions de soldadura de gran longitud. Això és degut a que la reflexió d'una ona ultrasònica a través de defectes en el cordó de soldadura (porus, fissures, interfícies, cracks, etc.) és molt més sensible a la presència dels mateixos que en la transmissió. En el primer, les ones sofreixen la refracció en medis que presenten diferents índexs acústics de refracció. D'aquí, en una fissura (que presenta una menor densitat que el material compacta, i per tant, un menor índex de refracció) del material que rodeja a la soldadura, les ones ultrasòniques es reflecteixen i refracten en la incidència; en canvi en les interfícies entre el material i la soldadura si està correctament fos, es permetrà la propagació de l'ona amb una mínima interferència.

El principi bàsic d'aquest mètode de NDT és el desplaçament d'un petit transductor o sonda a través de la superfície de la placa adjacent o propera al cordó de soldadura. De sondes o transductors n'existeixen amb diferents angles d'atac, per tal de ser utilitzats per descobrir defectes planars variant-ne la orientació. Un defecte d'orientació normal a un angle d'atac produirà una senyal significativa al detector, mentres que amb un angle d'atac allunyat de la normal, uns 20 o 30 graus, la senyal reflectida pot ésser molt petita o inexistent. La informació volumètrica del defecte detectat serà òptima o màxima quan l'àrea del feix d'ones sigui igual o superior que l'àrea del defecte. Degut a que normalment l'àrea del defecte serà superior a l'àrea del feix emès, la dimensió de la senyal reflectida només pot donar una indicació pobre de la dimensió real del defecte.

L'aplicació del mètode de l'eco-pulsant per a la identificació de defectes en l'àmbit industrial es realitza bàsicament amb dues metodologies d'inspecció que es diferencien entre elles pel

tipus de transductor usat. Una d'elles consisteix en la inspecció mitjançant un feix d'ones normal (transductor normal a la peça a analitzar) i l'altre en la inspecció mitjançant un feix d'ones amb angle (transductor desviat un angle concret versus la vertical de la superfície a analitzar).

### 6.7.1. Inspecció ultrasònica amb feix d'ones incident normal

Les mesures ultrasòniques realitzades amb el mètode eco-pulsant poden determinar la localització d'una discontinuïtat en una peça o estructura a través de la mesura acurada del temps necessari pels curts polsos ultrasònics generats pel transductor a viatjar a través de l'espessor del material, reflectir-se en la cara inferior de la peça o en la superfície de la discontinuïtat i ser retornats al altre cop al transductor. En la majoria d'aplicacions aquest interval de temps està entorn o per sota dels microsegons. El temps mesurat d'anada i tornada del pols ultrasònic està composat pels recorreguts d'anada i tornada, multiplicats per la velocitat del so en el material a analitzar. Aquest resultat s'expressa en la coneguda relació:

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

d: distància de la superfície a la discontinuïtat.
v: velocitat de les sones sonores en el material.
t: temps mesurat d'anada i tornada del pols.

Eq. 6.7.1.1

### 6.7.2. Inspecció ultrasònica amb feix d'ones incident en angle

Els transductors amb feix d'ones en angle són típicament utilitzats per introduir ones de caràcter mixt refractades a la peça a analitzar. Un feix d'ones en angle permet la detecció de defectes entorn de zones soldades sense la necessitat de passar el transductor per sobre d'elles, que al ser de superfície desigual implica complicacions en el seu escannejat. Al introduir els ultrasons a l'interior de la peça a analitzar amb un cert angle la refracció d'aquests a la cara inferior permet l'escannejat de tota la superfície d'una unió soldada tal i com es pot observar a la Fig. 6.7.2.1.

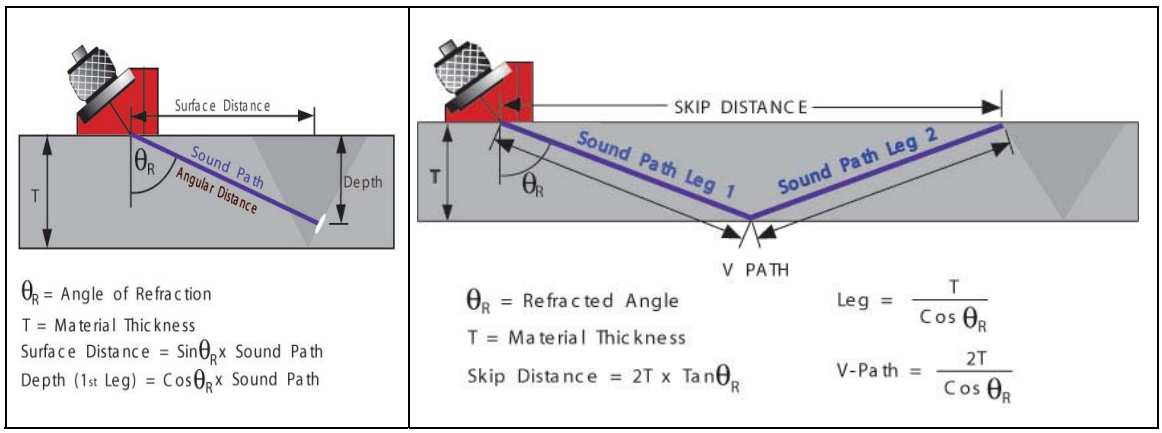


Fig. 6.7.2.1. Inspecció ultrasònica amb feix d'ones incident en angle.

### 6.7.3. Aplicació del mètode de l'eco-pulsant en l'anàlisi d'unions soldades

Per una típica unió soldada de dos peces d'acer, representada en la Fig. 6.7.3.1, l'assaig ultrasònic amb el mètode de l'eco-pulsant mitjançant un transductor mòbil amb feix d'ones a 60º detectarà les següents discontinuïtats de material:

Posició a. Només es detecten els ecos produïts per les superfícies límit del material.

a.1. Detecció de la superfície de contacte amb el transductor (superior de color verd). Aquesta senyal estarà modificada per el líquid d'acoblament emprat.

a.2. Detecció de la superfície oposada (inferior de color blau).

Posició b. A mesura que el transductor es desplaça i avança en direcció al cordó de soldadura que presenta un defecte amb forma de fissura, s'observa el registre seqüencial dels ecos produïts fora i dins de la unió de soldadura amb detecció del defecte abans esmentat.

b.1. Detecció de la superfície de contacte amb el transductor (superior de color verd). Aquesta senyal estarà modificada per el líquid d'acoblament emprat.

b.2. Detecció de part de la superfície de la fissura present en el cordó de soldadura. Aquest eco rebut (representat en color vermell) és el que determina la presència inequívoca de defecte intern.

b.3. Detecció de la superfície oposada (inferior de color blau). La detecció d'aquesta superfície juntament amb la de la b.2, vol dir que el feix d'ones emeses només incideix en part del defecte i no en la totalitat del mateix.

Posició c. Amb un nou avanç del transductor, variarà l'àrea de les superfícies que intercepten el feix d'ones.

c.1. Detecció de la superfície de contacte amb el transductor (superior de color verd). Aquesta senyal estarà modificada per el líquid d'acoblament emprat.

c.2. Detecció de la totalitat de l'àrea de la fissura. Aquest cas només es produirà si l'amplitud del feix d'ones emeses és igual a l'àrea del defecte. En aquest cas, el defecte fa de pantalla impedint la detecció de la superfície exterior oposada (color blau), i per tant, no serà detectada.

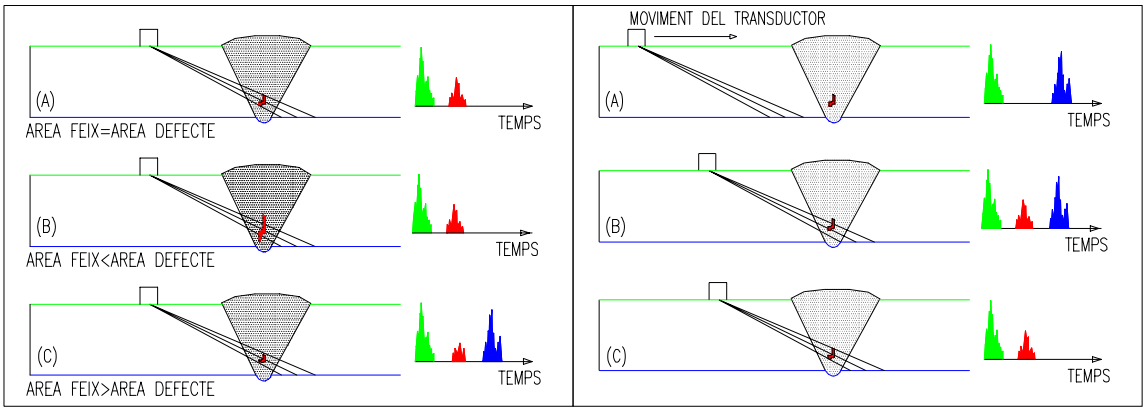



Fig. 6.7.3.1. Inspecció eco-pulsant d'una soldadura amb un transductor-receptor de 60º.

La major part de les proves ultrasòniques en els NDT són realitzades de forma manual, desplaçant el transductor al llarg de la superfície soldada i observant-ne les senyals reflectides en un oscil·loscopi detector dels defectes. Per elements llargs o de grans dimensions, aquest procediment és lent, monòton i molt susceptible a errors manuals, fet que origina l'aplicació de processos automatitzats per tal de realitzar aquesta inspecció ultrasònica augmentant-ne la regularitat.

## 6.8. Principis de la inspecció de defectes i imperfeccions en unions de soldadura entre plaques d'acer que constitueixen grans perfils.

La dificultat inherent a una adequada interpretació dels espectres ultrasònics registrats mitjançant el mètode de l'eco-pulsant només pot ser esmenada si es disposa d'un estudi sistemàtic del tipus de defectes presents en els materials a inspeccionar. La Fig. 6.8.1. mostra gràficament com en una sèrie patró d'unions de soldadura, diferents tipus de defectes (fissura, osca, porus, forat patró) es manifesten a través d'un mateix tipus de senyal sònica.

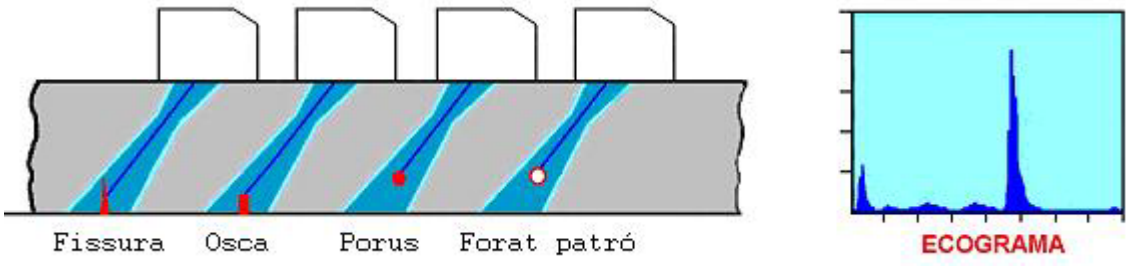



Fig. 6.8.1. Senyal ultrasònica comú per a diferents tipus de defecte.

Per aconseguir que els diferents tipus de defectes presents en un material puguin ser discriminats satisfactòriament, és imprescindible, en primer lloc, modelitzar geomètricament

les trajectòries de les ones ultrasòniques que genera el transductor-receptor d'acord amb el seu possible angle d'atac i la disposició espacial de les plaques a soldar.

En segon lloc, la tipologia dels defectes possibles en el material objecte de la inspecció ha de ser considerada, no tan sols en els seus aspectes geomètrics (texturals) sinó també en el que fa referència a la seva interacció dinàmica amb els fronts de l'ona ultrasònica que intercepten, donant lloc al consegüent eco o reflexió objecte de registre y anàlisi.

L'objectiu d'aquest projecte és establir una base referencial per a la detecció i identificació ultrasònica de defectes en els cordons de soldadura entre plaques d'acer que constitueixen grans perfils.

D'acord amb les especificacions tècniques del transductor-receptor incorporat en el sistema d'anàlisi de la senyal sònica que indica la presència d'un determinat tipus de defecte constitueix la culminació d'un procés lògic de discriminació i selecció d'informació i coneixements metal·logràfics previs. L'anàlisi de les senyals sòniques registrades obeeix a la lògica informàtica representada en la Fig. 6.8.2.

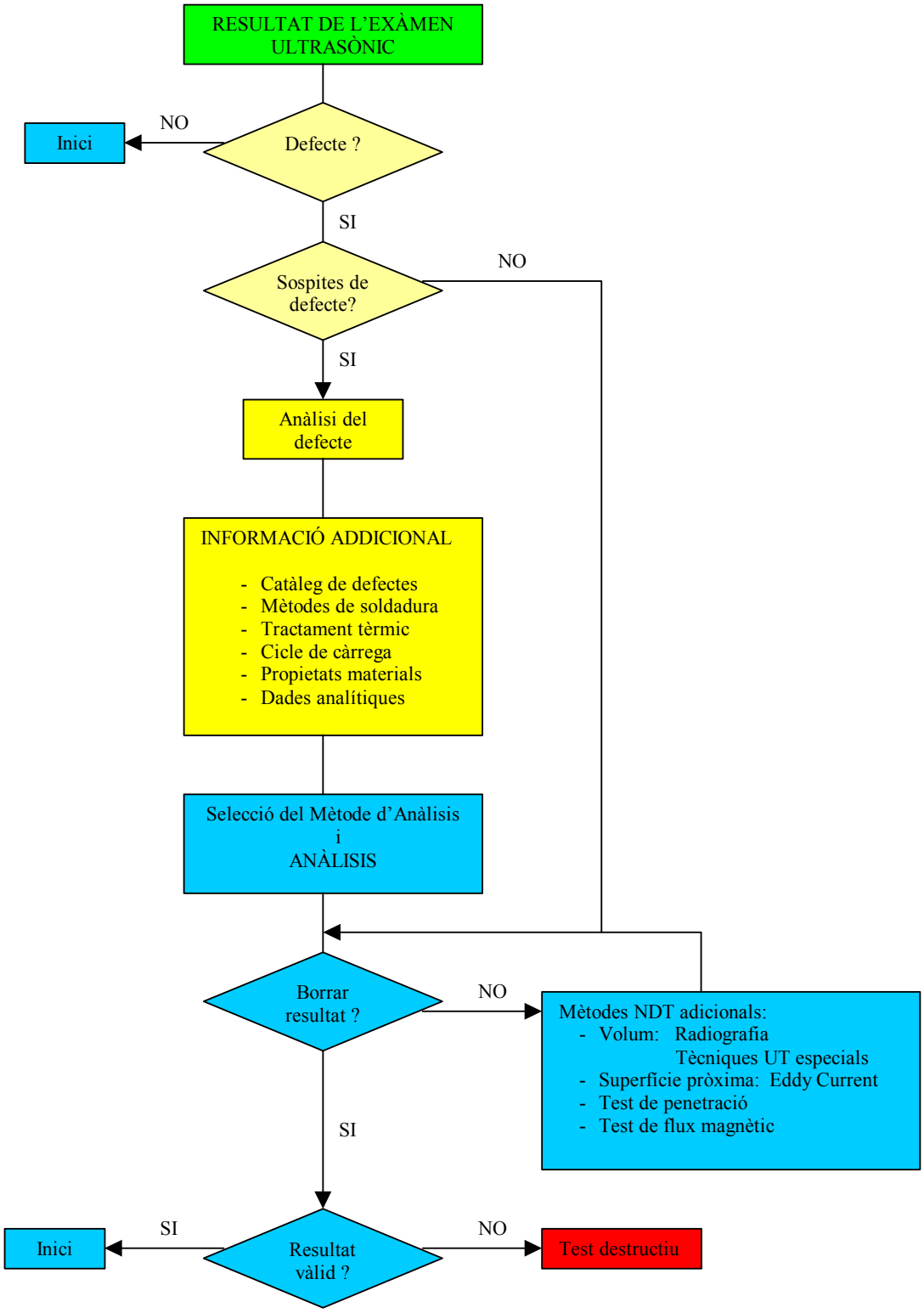



Fig. 6.8.2. Procés lògic de discriminació y selecció de tipologies d'imperfeccions registrades sònicament mitjançant l'equip EPOCH IIIB model 2400 de PANAMETRICS.

# 7. Anàlisi ultrasònic experimental

## 7.1. Especificacions tècniques dels aparells a utilitzar

Els aparells a utilitzar en la inspecció ultrasònica de les diferents provetes es tracten del detector digital de defectes PANAMETRIX EPOCH IIIB model 2400 i del transductor piezoelèctric PANAMETRIX V405-SB.

### 7.1.1. Detector digital de defectes PANAMETRIX EPOCH IIIB model 2400.

Les especificacions tècniques de l'aparell apareixen són les següents (Taula 7.1.1.1):

| | |
|---|---|
| PANTALLA | Pannell electroluminiscent de 256 columnes per 320 files. |
| RETÍCULA | Electrònicament generada de 67 x 60 mm, sense error de paral·lelisme ni canvis de contrast. |
| FREQÜÈNCIA DE PANTALLA | Mínim 60 Hz sota qualsevol condició de test. |
| SENSIBILITAT | Màxim 100.0 dB, i amb nivell de resolució seleccionable entre 6 dB i 0,1 dB. |
| AUTO CALIBRACIÓ | Continua. Automàtica autocalibració de la compensació de l'amplitud del pols i la sensibilitat del receptor per efectes d'envelliment o de temperatura. |
| REGRESSIÓ | Absolutament lineal en increments de 1% des del 0% fins al 80% de l'escala completa. |
| UNITATS MESURA | Angleses o Mètriques. |
| VELOCITAT DEL MATERIAL | De 635 a 15.240 m/s. Seleccionable entre dues configuracions de velocitat memoritzades. |
| COMPENSACIÓ DEL ZERO | De 0 a 350 μs. |
| RANG | De 4 a 5.000 mm/div estandaritzat per a la velocitat de els ones longitudinals en l'acer. |
| ANGLE REFRACTAT | Configuracions fixades de 0º, 30º, 45º, 60º, 70º, variables des de 10º a 85º amb una resolució de 0,1º. |
| NIVELL DE PORTA (GATE LEVEL) | Pot estar activat o desactivat. Amplitud a que està calibrada la porta. El nivell en el qual es pot ajustar és del 2% al 95% de l'escala de referència de les ordenades. |
| SHOCK D'EXCITACIÓ | Amplituds seleccionables de 100 V, 200 V i 400 V ( ±5% màxim). |
| DAMPING | Valors seleccionables de 50, 150 o 400 Ω. |
| AMPLITUD DE BANDA ANALÒGICA | Banda ample de 0,5 – 15 MHz a 3 dB. |
| MODES DE PROVA | L'aparell EPOCH IIIB pot operar amb tres modes de test diferents: PULSE-ECHO, TROUGHT-TRANSMISSION I DUAL. |
| ALIMENTACIÓ | • 85-264 VAC, 47-66 Hz, màxim 30 W.<br>• Bateria de 12 V. |

Taula 7.1.1.1. Especificacions tècniques PANAMETRIX EPOCH IIIB model 2400. [7]

### 7.1.2. Transductor piezoelèctric PANAMETRIX V405-SB.

Les especificacions tècniques del transductor a utilitzar són les següents (Taula 7.1.1.1):

| | |
|---|---|
| ONA DE SUPERFÍCIE | 90 º |
| TEMPERATURA MÀXIMA DE FUNCIONAMENT | 260 ºC |
| FREQÜÈNCIA DE TREBALL | 0,5 MHz – 1,0 MHz |

Taula 7.1.2.1. Especificacions tècniques transductor PANAMETRIX V405-SB. [8].

## 7.2. Disseny i fabricació de les provetes.

En el disseny de les provetes, en quan a les dimensions i material s'han tingut en compte aspectes sobre de la fabricació real de perfils estructurals metàl·lics, com són els espessors màxims de planxa utilitzats. Respecte a l'amplada s'han elegit les cotes suficients per aprofitar tota l'amplada del feix d'ones del transductor, i en quan a longituds màximes s'ha considerat el criteri de disposar d'una longitud suficient per deslliçar el transductor al llarg de la proveta amb comoditat. En la qüestió del l'elecció del material s'ha escollit l'acer estructural A42-b, el més emprat el la fabricació dels perfils estructurals metàl·lics.

L'anàlisi de l'acer A42-b és el següent:

| % C | % Si | % Mn | % P | % S | % Cr | % Mo | % Ni | % V | % Al | % Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,17-0,24 | 0,17-0,37 | 0,40-0,70 | ≤ 0,045 | ≤ 0,050 | ≤0,30 | - | ≤0,30 | - | - | 0,30 |

Taula 7.2.1. Composició química de l'acer A42-b. [9]

Al tractar-se d'un projecte on els resultats obtinguts són de gran importància i per tal d'assegurar la validesa d'aquests, al comprar el material utilitzat per fabricar les diferents provetes s'ha demanat al proveïdor un certificat de qualitat del material.

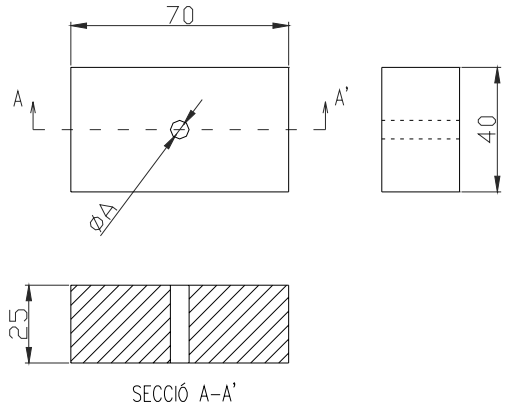
S'han creat quatre tipus diferents de provetes. En tres d'ells (tipus A, B i C) es simula una tipologia de defecte en concret per a cada tipus. De cada un d'aquests tres tipus de proveta s'han fabricat cinc models diferents per tal de disposar de la mateixa tipologia de defecte però de diferent dimensió, disposant en total de quinze provetes. El motiu de tenir cinc simulacions de la mateixa tipologia del defecte però de dimensions diferents és el poder

analitzar si existeix alguna relació entre la dimensió del defecte i els ecos detectats per l'aparell de mesura ultrasònica.

Del darrer tipus de proveta, el tipus D, només se n'ha fabricat una unitat. Aquesta simula el mateix defecte que el tipus A, però amb la disposició d'un únic defecte en diverses posicions per portar a terme l'estudi de la influència de la distància entre la superfície d'anàlisi i el defecte en la resposta obtinguda.

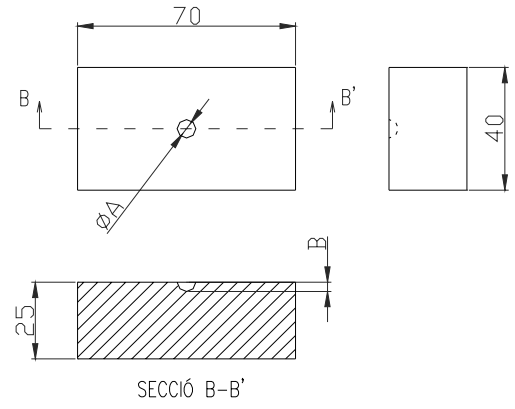
Les provetes han estat mecanitzades en un taller mecànic equipat amb la maquinària necessària per tal d'aconseguir una simulació el més precisa possible dels defectes que es podrien originar al llarg del procés de soldadura.

Les dimensions i numeració de cadascuna de les provetes fabricades per portar a terme aquest projecte estan a continuació.



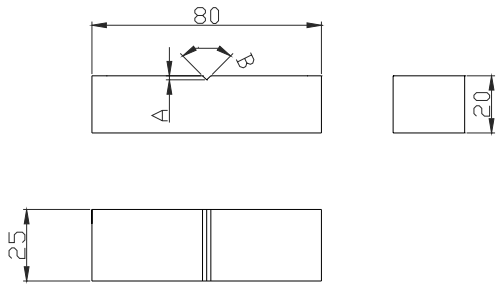

| TIPUS A | COTES VARIABLES | |
|---|---|---|
| Nº PROVETA | A (mm) | B (mm) |
| 1 | 2,00 | - |
| 2 | 2,50 | - |
| 3 | 2,75 | - |
| 4 | 3,00 | - |
| 5 | 3,25 | - |

Fig. 7.2.1. Proveta tipus A.



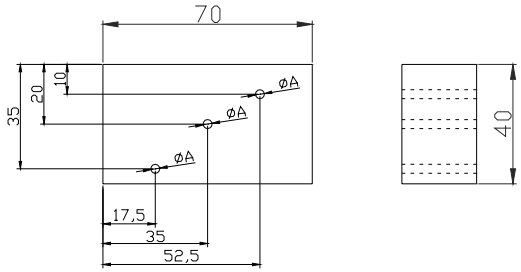

| TIPUS B | COTES VARIABLES | |
|---|---|---|
| Nº PROVETA | A (mm) | B (mm) |
| 6 | 4,10 | 1,00 |
| 7 | 6,00 | 1,80 |
| 8 | 7,60 | 2,10 |
| 9 | 8,25 | 2,30 |
| 10 | 11,00 | 4,00 |

Fig. 7.2.2. Proveta tipus B.




| TIPUS C | COTES VARIABLES | |
|---|---|---|
| Nº PROVETA | A (mm) | B (º) |
| 11 | 0,60 | 60 |
| 12 | 1,00 | 60 |
| 13 | 2,00 | 60 |
| 14 | 3,00 | 60 |
| 15 | 4,50 | 60 |

Fig. 7.2.2. Proveta tipus B.




| TIPUS D | COTES VARIABLES | |
|---|---|---|
| Nº PROVETA | A (mm) | B (mm) |
| 16 | 3 | - |

Fig. 7.2.4. Proveta tipus D.

### 7.2.1. Defectes simulats en cadascuna de les provetes.

Els defectes simulats en cada tipus de proveta apareixen a la Taula 7.2.1.1.

| TIPUS PROVETA | DEFECTES SIMULATS |
|---|---|
| A | Esquerda<br>Poca penetració |
| B | Porositat<br>Inclusions no metàl·liques |
| C | Tall lateral<br>Ruptures<br>Osca |
| D | Esquerda<br>Poca penetració |

Taula 7.2.1.1. Defectes simulats en cada tipologia de proveta.

## 7.3. Descripció del mètode operatiu.

El mètode operatiu a utilitzar intenta simular de la forma més real possible en diverses provetes tots els defectes que es poden originar al llarg del procés de soldadura emprat en la construcció dels perfils metàl·lics objectiu d'aquest projecte. Els defectes i les possibles causes que els originen han estat ja definits en l'apartat 5.6.2. de la present memòria.

Les provetes que simulen els possibles defectes seran analitzades mitjançant l'aparell de detecció ultrasònica PANAMETRIX EPOCH III model 2400 amb el corresponent transductor per tal de verificar si realment els defectes serien detectables en la inspecció ultrasònica a temps real del cordó de soldadura.

Per tal que els resultats obtinguts siguin vàlids i acceptables s'haurà de calibrar correctament l'aparell de detecció ultrasònica. A l'Annex B es troba el procediment de calibració a emprar.

Els anàlisis a realitzar a les diverses provetes es portaran a terme de forma manual, utilitzant aigua com a líquid acoblant i configurant els paràmetres de l'aparell emissor-receptor de polsos elèctrics d'alt voltatge idòniament per a cada tipus de proveta. La inspecció de les provetes es realitzarà amb un transductor de contacte amb un angle d'atac de 0º, per tal de detectar els defectes en el mateix pla en que ells es troben simulats.

La superfície en la qual es desplaçarà el transductor en cadascuna de les provetes al realitzar l'escannejat es pot observar a la Fig. 7.3.1. on apareix ressaltada amb un ratllat.

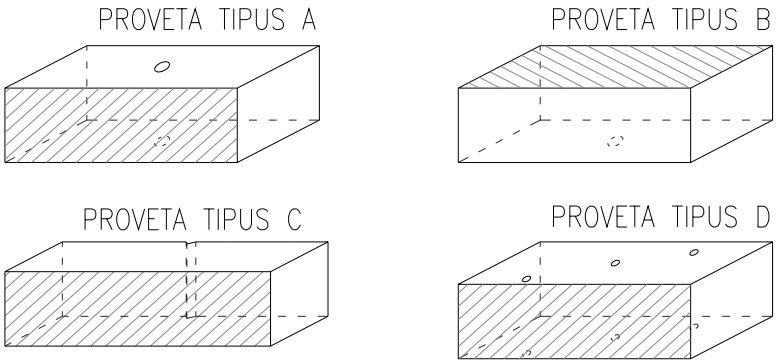



Fig. 7.3.1. Superfície d'anàlisi en cada tipus de proveta.

### 7.3.1. Detecció de defectes

Per a la detecció de defectes en cadascuna de les provetes tipus A, B i C, es realitzarà un anàlisi mitjançant el desplaçament del transductor degudament acoblat amb aigua a la superfície corresponent i a velocitat constant al llarg de tota la seva longitud per tal d'observar si el defecte és detectat. En l'anàlisi de cadascuna de les provetes, en la regió sense presència de defecte i en la qual aquest sigui detectat, es memoritzarà a l'aparell de mesura l'ecograma i els paràmetres mesurats per l'aparell en aquell instant. Per després procedir a l'estudi d'aquesta informació.

Per a cadascuna de les quinze provetes es portaran a terme deu assaigs per a la regió sense defecte i deu més en la regió amb presència de defecte. En total es disposarà de vint assaigs per cada proveta per tal de portar un estudi exhaustiu i el més fiable possible dels

resultats obtinguts. Tots els resultats dels assaigs realitzats estan inclosos en l'Annex C adjunt en el present projecte.

Per a cada tipus de proveta (A, B i C) els diferents anàlisis de cadascuna de les provetes d'aquest tipus es realitzaran amb els mateixos paràmetres de configuració de l'aparell. Podent-se així portar a terme una comparació real dels resultats obtinguts en les cinc provetes que simulen el mateix defecte en diferent dimensió. Si es mantenen constants els paràmetres de configuració de l'aparell, en cas de ser detectat el defecte, permetrà l'estudi de si existeix o no una relació entre la resposta ultrasònica obtinguda i la magnitud del defecte.

Teòricament amb la comparació visual dels ecogrames de la regió amb defecte i sense de cadascuna de les provetes, la presència del defecte hauria de ser identificada. No obstant es disposarà també dels paràmetres mesurats per l'aparell de mesura en el moment de realitzar l'anàlisi que permetrà la identificació del defecte de forma analítica.

### 7.3.2. Influència de la distància entre la superfície d'anàlisi i el defecte en la resposta obtinguda

Aquest estudi només serà realitzat en el cas que els supòsits de l'apartat 7.3.1. es compleixin. És a dir, que els defectes siguin detectats mitjançant l'anàlisi ultrasònic.

En l'estudi de la influència de la profunditat on es localitza el defecte en la resposta obtinguda en l'anàlisi, s'ha optat per crear el tipus de proveta D, enumerada com a proveta nº 16. En aquesta proveta es realitzarà un anàlisi mitjançant el desplaçament del transductor degudament acoblat amb aigua a la superfície corresponent i a velocitat constant al llarg de tota la longitud de les dues cares d'anàlisi per tal d'observar si existeix alguna relació o no entre la distància del transductor al defecte i la resposta obtinguda.

A la proveta 16, es portaran a terme deu assaigs per a la regió sense defecte i deu més per a cadascuna de les cinc disposicions de defecte. En total es disposarà de seixanta assaigs per tal de portar un estudi exhaustiu i el més fiable possible dels resultats obtinguts.

Les cinc disposicions de defecte que presenta la proveta han estan anomenades com: a, b, c, d, e. Aquestes es poden observar en la Fig. 7.3.2.1.

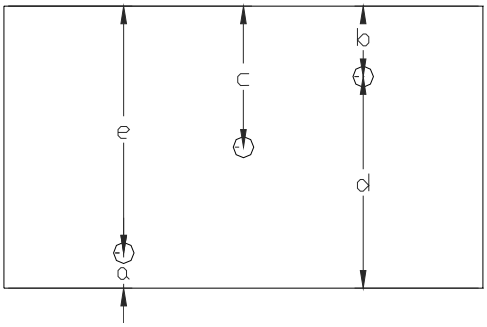



Fig. 7.3.2.1. Disposició de defectes en proveta tipus D.

És important esmentar que les diferents mesures es realitzaran amb els mateixos paràmetres de configuració de l'aparell per tal de que es pugui portar a terme una comparació real dels resultats obtinguts. Al mantenir constants els paràmetres de configuració de l'aparell, permetrà observar l'existència o no d'una relació entre la resposta ultrasònica obtinguda i la distància del defecte a la cara de la proveta per la qual transcorre el transductor.

Teòricament amb la comparació visual dels ecogrames de la regió sense defecte i en les cinc disposicions del defecte simulat, l'existència d'alguna relació hauria de ser visible. Es disposarà també dels paràmetres mesurats per l'aparell de mesura en el moment de realitzar l'anàlisi que permetran la identificació del defecte de forma analítica.

### 7.3.3. Identificació i caracterització de defectes

En el cas de ser detectats els defectes, es procedirà a un anàlisi més minuciós per intentar assolir, mitjançant també la inspecció ultrasònica, la caracterització de la tipologia del defecte detectat.

Per portar a terme aquesta caracterització dels defectes detectats en cada tipus de proveta, es realitzaran 6 anàlisis de la regió amb presència de defecte per a cadascuna de les provetes. Com en el cas de l'estudi de la detecció de defectes per a cada tipus de proveta (A, B o C) tots els anàlisis es portaran a terme amb els mateixos paràmetres de configuració de l'aparell per tal de que es pugui portar a terme una comparació real dels resultats obtinguts en les cinc provetes que simulen el mateix defecte.

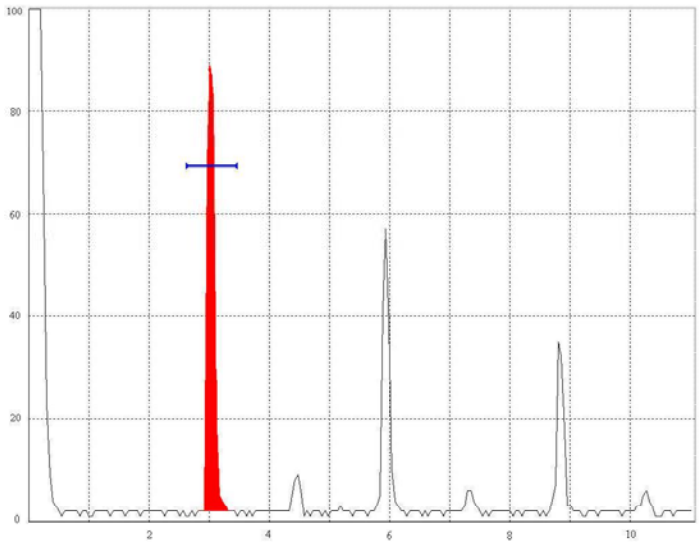
La caracterització del defecte es tractarà bàsicament d'una inspecció visual de l'ecograma obtingut en l'anàlisi de la regió de la proveta on la resposta en la detecció del defecte és màxima. Teòricament s'espera obtenir un ecograma similar per a totes les provetes que simulen el mateix tipus de defecte, on la major o menor amplitud del mateix indicarà la magnitud de la dimensió del defecte detectat.

# 8. Discussió dels resultats

## 8.1. Llegenda de la presentació dels resultats

En cas de ser correcte el mètode operatiu dissenyat, la presència d'algun defecte a la proveta hauria de ser visible a través dels resultats obtinguts en l'escannejat de les diferents provetes.

La presentació dels resultats obtinguts en l'anàlisi de cadascuna de les provetes serà tal i com es mostra en l'exemple present a la Fig. 8.1.1. En aquest exemple es pot observar l'ecograma i els valors dels diferents paràmetres captats pel l'aparell emissor-receptor de polsos elèctrics en el moment de memoritzar-los.




| | |
|---|---|
| (1) AMPLITUDE MAX 100% | (2) CURRENT 89% |
| (3) MIN DEPTH 40.83 | (4) PEAK 40.83 mm |
| (5) REF 32.7+ 0.0dB | (6 RANGE 133.8 mm |
| (7) REJ 0 % | (8) DELAY 0.000 mm |
| (9) VEL 5738 m/s | (10) FULLWAVE RECTIFY |
| (11) ZERO 0.292 us | (12) PULSER LOW |
| (13) ANGLE 00.0º | (14) DAMPING 50 ! |
| (15) THICK 40.00 mm | (16) PULSE-ECHO MODE |
| (17) PRF AUTO | |
| (18) Gate1 Start | 35,76 |
| (19) Gate1 Width | 11,68 |
| (20) Gate1 Level | 69% |
| (21) Gate1 Alarm | OFF |
| (22) Gate0 Start | 0 |
| (23) Gate0 Width | 0 |
| (24) Gate0 Level | 0 |
| (25) Gate0 Alarm | EPOCHIII |

Fig. 8.1.1. Exemple de presentació de resultats

A la taula adjunta a l'ecograma hi ha el valor de les variables que mesura l'aparell en aquell l'instant, i dels paràmetres de configuració de l'aparell per aquell tipus de proveta en concret (A, B, C o D). A continuació apareix l'explicació de cadascuna de les variables i paràmetres contingudes en els resultats presentats, que han identificades amb un número per tal de facilitar-ne la seva localització.

| Nº | DADA | UNITATS | EXPLICACIÓ |
|---|---|---|---|
| 1 | AMPLITUDE MAX | adimensional (%) | Amplitud màxima de l'escala de referència de les ordenades. |
| 2 | AMPLITUDE CURRENT | adimensional (%) | Amplitud màxima que presenta el pic del segon eco detectat (color vermell), amb l'escala de referència de les ordenades. |
| 3 | MIN DEPTH | mm | Profunditat mínima detectada |
| 4 | PEAK STATUS | mm | Valor de pic detectat |
| 5 | REF-GAIN | dB | Sensibilitat |
| 6 | RANGE | mm | Configura la base del temps de l'aparell, i ajusta la separació entre ecos. |
| 7 | REJECT | adimensional (%) | Elimina les senyals no desitjades que estan per sota el mínim fixat. El nivell REJECT és modificable de forma continua des del 0% al 80% del total de l'escala. |
| 8 | DELAY | mm | En aquest cas suposarem un retard nul. |
| 9 | MATERIAL VELOCITY | m/s | Velocitat del so pròpia en aquell material en concret. Velocitat de les ones longitudinals. (Annex A) |
| 10 | WAVEFORM RECTIFICACTION | - | Tipus de rectificació de forma de l'ona emprada. L'aparell EPOCH IIIB admet els següents tipus de rectificació: FULLWAVE, HALFWAVE POSITIVE, HALFHAVE NEGATIVE I RF |
| 11 | ZERO OFFSET | µs | Compensació del temps mort entre l'emissió del primer ultrasó o l'entrada d'aquest a l'interior de la peça. |
| 12 | PULSE ENERGY | - | Configuració de l'energia utilitzada en els shocks d'excitació dels polsos utilitzats per l'aparell. El valor és seleccionat en funció de les condicions en que es realitza el test. L'aparell EPOCH IIIB admet tres possibles seleccions d'energia: LOW (100V), MEDIUM (200V) i HIGH (400V). |
| 13 | REFRACTED ANGLE | (º) | Angle d'atac del transductor usat en l'anàlisi ultrasònic. |
| 14 | DAMPING | - | Optimitza el contorn de la forma de l'ona per portar a terme mesures amb alta resolució a través d'un circuit de resistència interna. Els valors seleccionables són de 50, 150 o 400 Ω. |
| 15 | THICKNESS | mm | Espessor de la peça a analitzar. En el nostre cas, el de la proveta. |
| 16 | TIPUS ANÀLISI | - | Tipus de test amb que es realitzarà l'anàlisi. L'aparell EPOCH IIIB pot operar amb tres modes de test diferents: PULSE-ECHO, TROUGHT-TRANSMISSION I DUAL. |
| 17 | PRF AUTO | | Configuració interna de l'aparell |
| 18 | Gate1 Start | µs | Variable sobre el rang sencer mostrat. |
| 19 | Gate1 Width | µs | Variable que va des de Gate 1 Start fins al rang màxim mostrat. |
| 20 | Gate1 Level | adimensional (%) | Amplitud a que està calibrada la Gate 1 (color blau) amb l'escala de referència de les ordenades. Per amplituds d'eco inferiors a aquest valor, el valor de AMPLITUDE MAX és nul. |
| 21 | Gate1 Alarm | - | Alarma que en cas d'estar activada ens avisa |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | quan la lectura actual de l'espessor és inferior al nivell mínim definit per l'usuari. |
| 22 | Gate0 Start | µs | No s'utilitza |
| 23 | Gate0 Width | µs | No s'utilitza |
| 24 | Gate0 Level | (%) | No s'utilitza |
| 25 | Gate0 Alarm | - | No s'utilitza |

Taula 8.1.1. Explicació de les dades presents en el resultat.

Els resultats de tots els anàlisis realitzats a les diverses provetes es troben a l'Annexes C, D i E adjunts a la present memòria.

## 8.2. Resultats de la detecció de defectes

Amb els supòsits i el mètode operatiu descrits en l'apartat 7.3.1. de la present memòria, s'ha portat a terme en el procés de detecció dels defectes simulats en les diverses provetes per tal de validar el correcte funcionament del mètode operatiu elegit. Tots els resultats obtinguts en l'anàlisi de les diverses provetes es troben a l'Annex C adjunt al present projecte.

En els resultats de l'anàlisi de totes les provetes, s'observa com la presència del defecte en la proveta és fàcilment detectable amb la resposta del segon eco (eco d'estudi) que apareix en el gràfic mostrat en la pantalla de l'aparell. La comparació dels ecogrames memoritzats en la regió amb i sense defecte en cada proveta, permet observar la clara disminució de l'amplitud del segon eco al detectar-se el defecte. Aquesta variació de l'amplitud es pot disposar de forma numèrica si es porta a terme la resta entre les dades "*amplitude current*" de les regions sense defecte i amb defecte.

### 8.2.1. Provetes tipus A

Quan s'avança el transductor per la proveta, al principi al no existir cap defecte, el segon eco presenta una amplitud constant. Al iniciar-se la detecció del defecte, l'amplitud constant que presentava el segon eco fins aquest instant, comença a disminuir fins a un mínim que coincideix en la regió on l'àrea del defecte és màxima. Un cop la posició del transductor ha superat aquesta regió, l'amplitud del segon eco comença a augmentar progressivament altre vegada fins a retornar a l'amplitud constant inicial quan el defecte deixa de ser visible. En la resta de pics també existeix aquesta disminució, no obstant ens centrarem només en el segon pic del qual se'n disposa el valor de la seva amplitud.

A la Taula 8.2.1.1. hi ha un breu resum dels resultats de les amplituds del segon pic (*current amplitude*) a les regions amb i sense defecte obtinguts en els deu anàlisis realitzats a les cinc provetes.

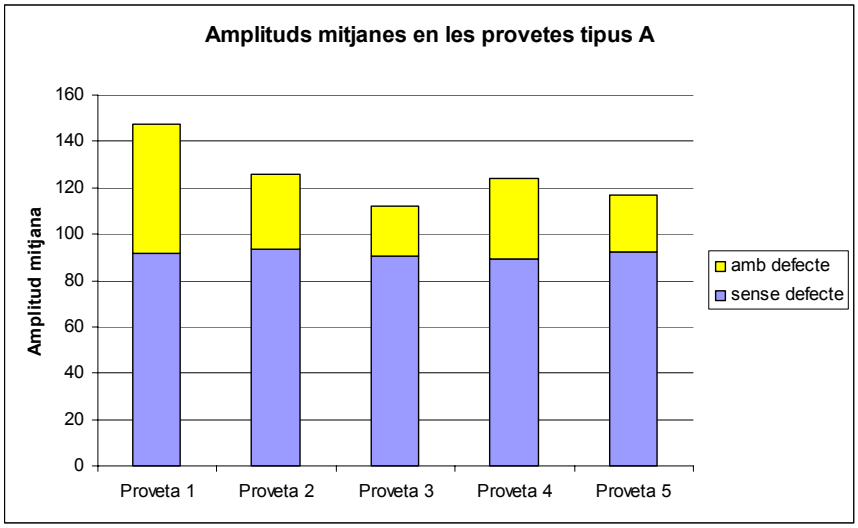
| | PROVETA Nº 1 | | PROVETA Nº 2 | | PROVETA Nº 3 | | PROVETA Nº 4 | | PROVETA Nº 5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | |
| ANÀLISI | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte |
| 1 | 92 | 56 | 93 | 32 | 89 | 22 | 92 | 36 | 93 | 26 |
| 2 | 91 | 53 | 92 | 33 | 86 | 23 | 90 | 34 | 92 | 25 |
| 3 | 95 | 57 | 94 | 33 | 86 | 23 | 87 | 35 | 95 | 25 |
| 4 | 93 | 56 | 92 | 34 | 91 | 21 | 87 | 35 | 95 | 23 |
| 5 | 88 | 56 | 94 | 31 | 92 | 21 | 92 | 37 | 88 | 26 |
| 6 | 94 | 53 | 94 | 32 | 92 | 20 | 86 | 35 | 93 | 26 |
| 7 | 89 | 55 | 93 | 32 | 93 | 19 | 89 | 33 | 93 | 22 |
| 8 | 92 | 57 | 96 | 32 | 92 | 20 | 90 | 35 | 90 | 22 |
| 9 | 93 | 56 | 91 | 32 | 94 | 23 | 90 | 34 | 94 | 23 |
| 10 | 91 | 56 | 93 | 33 | 90 | 22 | 88 | 36 | 91 | 24 |
| **MITJANA** | **92** | **56** | **93** | **32** | **91** | **21** | **89** | **35** | **92** | **24** |

Taula 8.2.1.1. Resum i mitjana de les amplituds del segon eco.

Amb les respostes del segon eco obtingudes, tant de forma gràfica com numèrica (veure Taula 8.2.1.1.), s'observa que no existeix una relació entre la dimensió del defecte i l'amplitud màxima que presenta aquest eco. En les provetes números 1, 2 i 3 si que semblaria que hi ha una certa relació inversa entre el valor de l'amplitud del segon pic i la dimensió del defecte. No obstant, en la proveta número 4, l'amplitud del segon pic ens augmenta, i en la proveta 5 ens torna a disminuir.

Semblaria lògic pensar que en la proveta 4 existeix alguna incoherència ens els resultats ja que la resposta obtinguda en l'anàlisi d'aquesta proveta no segueix la mateixa tendència que la resta de provetes. Aquest fenomen és degut a que l'àrea del defecte simulat en la proveta 4 coincideix o és molt pròxima a l'àrea efectiva dels feix d'ones ultrasòniques emès pel transductor, únic cas on a partir de la resposta ultrasònica es pot tenir una visualització real de la magnitud del defecte.

En resum, com major és l'àrea del defecte, menor amplitud presenta aquest en la regió on l'àrea del defecte és màxima, amb l'excepció del cas particular que l'àrea del defecte coincideixi amb l'àrea efectiva del feix d'ultrasons emès. Aquesta relació es pot observar al Gràfic 8.2.1.1. on es representen les amplituds mitjanes del segon pic calculades a partir dels resultats obtinguts en els deu anàlisis realitzats a les regions amb i sense defecte per a cada proveta.




Gràfic 8.2.1.1. Comparativa de l'amplitud en la regió sense defecte i amb defecte.

## 8.2.2. Provetes tipus B

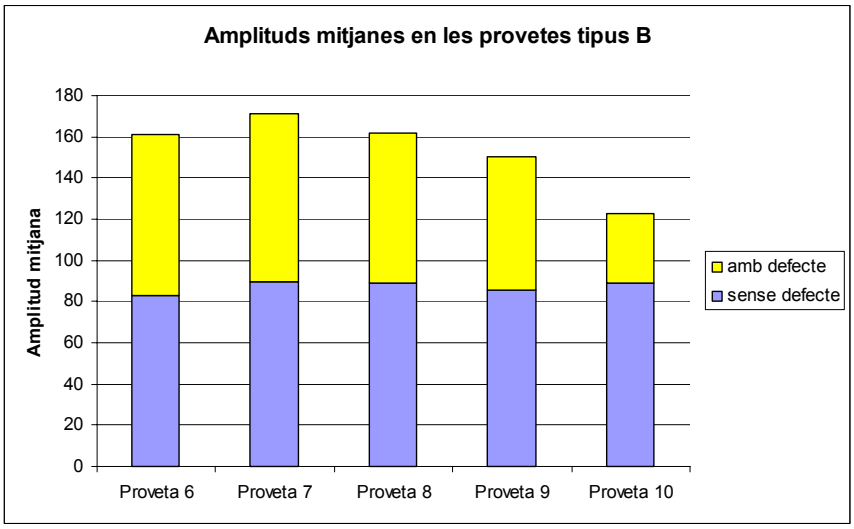
Quan s'avança el transductor per la proveta, al principi al no existir cap defecte, el segon eco presenta una amplitud constant. Al iniciar-se la detecció del defecte, l'amplitud constant que presentava el segon eco fins aquest instant, comença a disminuir fins a un mínim que coincideix en la regió on l'àrea del defecte és màxima. Un cop la posició del transductor ha superat aquesta regió, l'amplitud del segon eco comença a augmentar progressivament altre vegada fins a retornar a l'amplitud constant inicial quan el defecte deixa de ser visible. En la resta d'ecos també existeix aquesta disminució, no obstant ens centrarem només en el segon eco del qual se'n disposa el valor de la seva amplitud.

A la Taula 8.2.2.1. hi ha un breu resum dels resultats de les amplituds del segon eco (*current amplitude*) a les regions amb i sense defecte obtinguts en els deu anàlisis realitzats a les cinc provetes.

| | PROVETA Nº 6 | | PROVETA Nº 7 | | PROVETA Nº 8 | | PROVETA Nº 9 | | PROVETA Nº 10 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | |
| ANÀLISI | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte |
| 1 | 83 | 80 | 91 | 82 | 90 | 73 | 86 | 65 | 91 | 36 |
| 2 | 83 | 79 | 89 | 81 | 90 | 76 | 84 | 62 | 88 | 36 |
| 3 | 83 | 78 | 88 | 81 | 89 | 75 | 87 | 60 | 89 | 33 |
| 4 | 83 | 79 | 89 | 82 | 88 | 73 | 84 | 68 | 87 | 29 |
| 5 | 83 | 78 | 90 | 82 | 89 | 75 | 87 | 65 | 88 | 33 |
| 6 | 83 | 78 | 90 | 82 | 88 | 71 | 84 | 67 | 89 | 34 |
| 7 | 83 | 78 | 90 | 82 | 89 | 70 | 88 | 66 | 89 | 35 |
| 8 | 82 | 79 | 90 | 83 | 88 | 72 | 88 | 65 | 91 | 34 |
| 9 | 82 | 79 | 91 | 80 | 88 | 72 | 86 | 65 | 90 | 34 |
| 10 | 82 | 79 | 90 | 81 | 89 | 73 | 85 | 63 | 89 | 33 |
| **MITJANA** | **83** | **79** | **90** | **82** | **89** | **73** | **86** | **65** | **89** | **34** |

Taula 8.2.2.1. . Resum i mitjana de les amplituds del segon eco.

Amb les respostes del segon eco obtingudes, tant de forma gràfica com numèrica, s'observa l'existència d'una relació inversa entre la dimensió del defecte i l'amplitud màxima que presenta aquest eco. Com major és l'àrea del defecte, menor amplitud presenta aquest en la regió on l'àrea del defecte és màxima. Així, com més gran és la magnitud d'aquest tipus de defecte, major és la diferència entre l'amplitud del segon eco en la regió sense defecte i amb aquest. Aquesta relació es pot observar al Gràfic 8.2.2.1. on es representen les amplituds mitjanes calculades a partir dels resultats obtinguts en els deu anàlisis realitzats a les regions amb i sense defecte per a cada proveta.




Gràfic 8.2.2.1. Comparativa de l'amplitud en la regió sense defecte i amb defecte.

### 8.2.3. Provetes tipus C

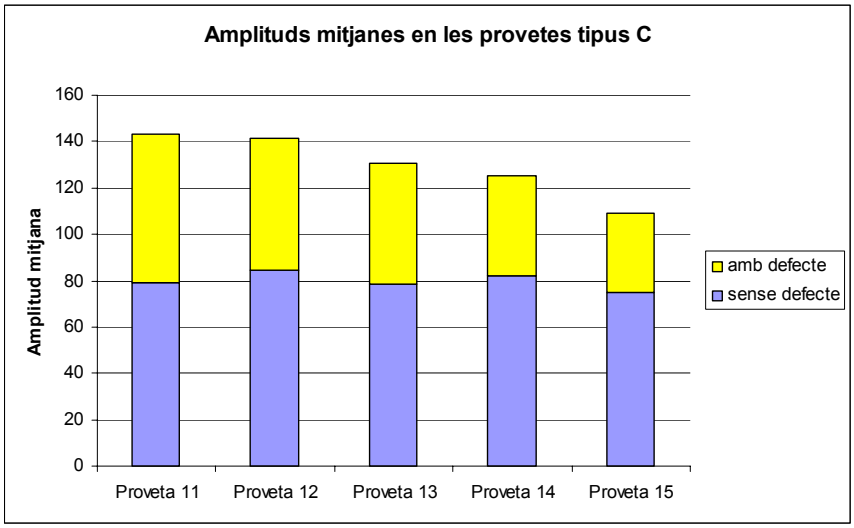
Quan s'avança el transductor per la proveta, al principi al no existir cap defecte, el segon eco presenta una amplitud constant. Al iniciar-se la detecció del defecte, l'amplitud constant que presentava el segon eco fins aquest instant, comença a disminuir fins a un mínim que coincideix en la regió on l'àrea del defecte és màxima. Un cop la posició del transductor ha superat aquesta regió, l'amplitud del segon eco comença a augmentar progressivament altre vegada fins a retornar a l'amplitud constant inicial quan el defecte deixa de ser visible. En la resta d'ecos també existeix aquesta disminució, no obstant ens centrarem només en el segon eco del qual se'n disposa el valor de la seva amplitud.

A la Taula 8.2.3.1. hi ha un breu resum dels resultats de les amplituds del segon eco (*current amplitude*) a les regions amb i sense defecte obtinguts en els deu anàlisis realitzats a les cinc provetes.

| | PROVETA Nº 11 | | PROVETA Nº 12 | | PROVETA Nº 13 | | PROVETA Nº 14 | | PROVETA Nº 15 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | | CURRENT AMPLITUDE (%) | |
| ANÀLISI | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte | sense defecte | amb defecte |
| 1 | 75 | 70 | 86 | 61 | 79 | 55 | 85 | 43 | 76 | 35 |
| 2 | 73 | 62 | 84 | 59 | 78 | 54 | 84 | 41 | 72 | 34 |
| 3 | 84 | 68 | 81 | 60 | 78 | 50 | 82 | 43 | 74 | 34 |
| 4 | 82 | 70 | 86 | 53 | 80 | 50 | 81 | 47 | 78 | 32 |
| 5 | 77 | 64 | 87 | 52 | 79 | 55 | 87 | 44 | 76 | 36 |
| 6 | 86 | 65 | 84 | 51 | 76 | 54 | 81 | 47 | 75 | 34 |
| 7 | 79 | 63 | 86 | 53 | 79 | 52 | 78 | 44 | 76 | 35 |
| 8 | 75 | 60 | 84 | 63 | 79 | 50 | 78 | 39 | 74 | 33 |
| 9 | 78 | 61 | 86 | 62 | 79 | 50 | 84 | 42 | 74 | 34 |
| 10 | 81 | 60 | 82 | 55 | 79 | 51 | 81 | 40 | 73 | 33 |
| **MITJANA** | **79** | **64** | **85** | **57** | **79** | **52** | **82** | **43** | **75** | **34** |

Taula 8.2.3.1. . Resum i mitjana de les amplituds del segon eco mesurades en els anàlisis.

Amb les respostes del segon eco obtingudes, tant de forma gràfica com numèrica, s'observa l'existència d'una relació inversa entre la dimensió del defecte i l'amplitud màxima que presenta aquest eco. Com major és l'àrea del defecte, menor amplitud presenta aquest en la regió on l'àrea del defecte és màxima. Així, com més gran és la magnitud d'aquest tipus de defecte, major és la diferència entre l'amplitud del segon eco en la regió sense defecte i amb aquest. Aquesta relació es pot observar al Gràfic 8.2.3.1. on es representen les amplituds mitjanes calculades a partir dels resultats obtinguts en els deu anàlisis realitzats a les regions amb i sense defecte per a cada proveta.




Gràfic 8.2.3.1. Comparativa de l'amplitud en la regió sense defecte i amb defecte.

## 8.3. Resultats de la influència de la distància entre la superfície d'anàlisi i el defecte en la resposta obtinguda

Amb els supòsits i el mètode operatiu descrits en l'apartat 7.3.2. de la present memòria, s'ha portat a terme l'anàlisi de les diverses disposicions del mateix defecte que presenta la proveta número 16. Tots els resultats obtinguts d'aquests anàlisis es troben a l'Annex D adjunt al projecte.

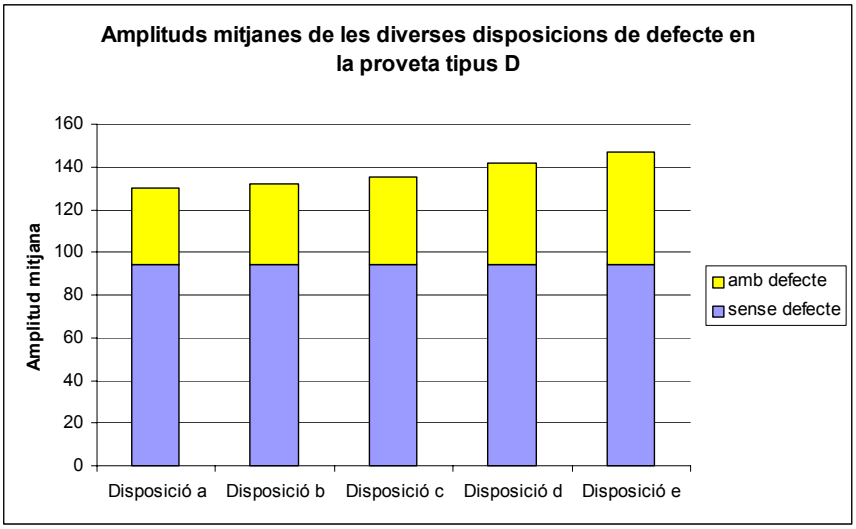
En els resultats de l'anàlisi de les cinc disposicions de defecte s'observa l'existència d'una relació entre la distància de la superfície d'anàlisi al defecte en la resposta obtinguda. Al augmentar aquesta distància, l'amplitud que presenta el segon pic també augmenta. Així que es pot afirmar que existeix una relació directa entre la distància de la superfície d'anàlisi i el defecte en l'amplitud del segon pic de la resposta obtinguda.

Aquesta relació es pot deduir fàcilment amb l'observació de les amplituds mitjanes calculades en la taula resum de les amplituds (*amplitude current*) mesurades per l'aparell en el moment de realitzar l'anàlisi (Taula 8.3.1.).

| | PROVETA Nº 16 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | sense defecte | disposició a | disposició b | disposició c | disposició d | disposició e |
| ANÀLISI | Amplitud (%) | Amplitud (%) | Amplitud (%) | Amplitud (%) | Amplitud (%) | Amplitud (%) |
| 1 | 93 | 37 | 37 | 40 | 49 | 54 |
| 2 | 93 | 36 | 36 | 39 | 49 | 52 |
| 3 | 93 | 36 | 38 | 42 | 48 | 52 |
| 4 | 94 | 35 | 38 | 40 | 48 | 53 |
| 5 | 91 | 36 | 39 | 41 | 48 | 52 |
| 6 | 93 | 36 | 39 | 40 | 48 | 52 |
| 7 | 90 | 37 | 36 | 41 | 49 | 53 |
| 8 | 96 | 36 | 36 | 40 | 47 | 53 |
| 9 | 96 | 36 | 38 | 42 | 47 | 54 |
| 10 | 96 | 36 | 38 | 40 | 47 | 52 |
| **MITJANA** | **94** | **36** | **38** | **41** | **48** | **53** |

Taula 8.3.1. Resum i mitjana de les amplituds del segon eco mesurades en els anàlisis.

Amb la representació gràfica (Gràfic 8.3.1) dels valors presents a la Taula 8.3.1. encara es mostra de forma més clara d'aquesta relació directa que era objecte d'estudi d'aquest punt de la memòria.




Gràfic 8.3.1. Comparativa de l'amplitud en la regió sense defecte i amb defecte

Cal destacar que l'amplitud mitjana de la detecció de la regió sense defecte de la proveta és igual per a totes les disposicions de defecte ja que totes elles estan presents en la mateixa proveta.

## 8.4. Resultats de la identificació i caracterització de defectes

La identificació i caracterització dels defectes s'ha realitzar seguint el mètode operatiu descrit en l'apartat 7.3.3. de la present memòria. A la conclusió de si el mètode operatiu emprat era correcte o no, s'hi ha arribat de forma visual. Amb l'observació de tots els anàlisis realitzats en les diferents provetes que es troben en l'Annex E adjunt al projecte, es pot afirmar que la caracterització de la tipologia del defecte és possible. En funció del tipus de defecte simulat als tres tipus de proveta s'obté un ecograma característic per a cada tipus de defecte, de major o menor escala en funció de la magnitud d'aquest.

### 8.4.1. Provetes tipus A

En els resultats de la inspecció ultrasònica d'aquest tipus de provetes s'observa que existeix una gran similitud en tots els ecogrames obtinguts en les diferents provetes. Al igual que en l'estudi de la detecció del defecte realitzat en aquest mateix projecte es corrobora que al augmentar la dimensió del defecte, apareix una disminució de l'amplitud del segon pic de l'ecograma, amb l'excepció de la proveta 4, tal i com ja s'ha justificat en el punt 8.2.1. de la memòria.

Els defectes simulats en aquest tipus de proveta, com són una esquerda o la poca penetració del material d'aportació en la soldadura es podrien caracteritzar amb l'ecograma tipus que apareix en la Fig. 8.4.1.1.

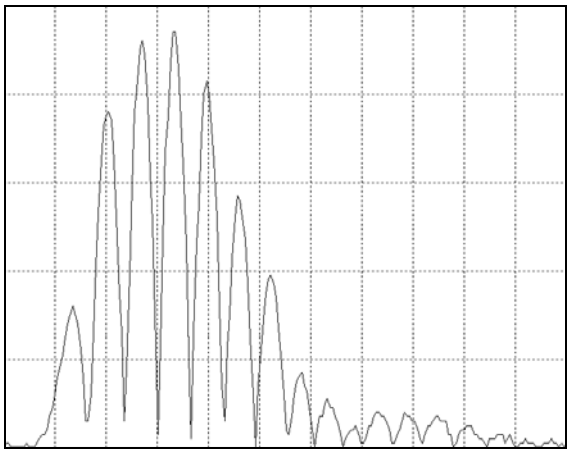


Fig. 8.4.1.1. Caracterització del defecte simulat en les provetes tipus A

En l'ecograma tipus detectat per la tipologia de defectes simulats en les provetes tipus A es detecten bàsicament quatre pics que sobresurten en amplitud a la resta. Essent la principal característica identificadora d'aquesta classe de defecte.

### 8.4.2. Provetes tipus B

En els resultats de la inspecció ultrasònica d'aquest tipus de provetes s'observa que existeix una gran similitud en tots els ecogrames obtinguts en les diferents provetes. Els defectes simulats en aquest tipus de proveta, com la presència de porositat o inclusions no metàl·liques en la soldadura, es podrien caracteritzar amb l'ecograma tipus que apareix en la Fig. 8.4.2.1.

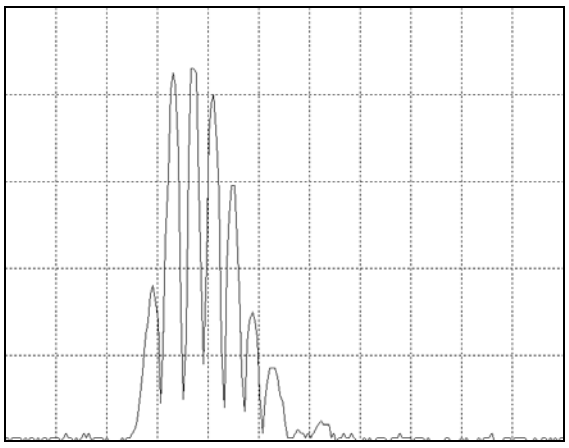


Fig. 8.4.2.1. Caracterització del defecte simulat en les provetes tipus B

En l'ecograma tipus detectat per la tipologia de defectes simulats en les provetes tipus B es detecten bàsicament tres pics que sobresurten en amplitud a la resta. Essent la principal característica identificativa d'aquesta classe de defecte

### 8.4.3. Provetes tipus C

En els resultats de la inspecció ultrasònica d'aquest tipus de provetes s'observa que existeix una gran similitud en tots els ecogrames obtinguts en les diferents provetes. Els defectes simulats en aquest tipus de proveta, com la presència de porositat o inclusions no metàl·liques en la soldadura, es podrien caracteritzar amb l'ecograma tipus que apareix en la Fig. 8.4.3.1.

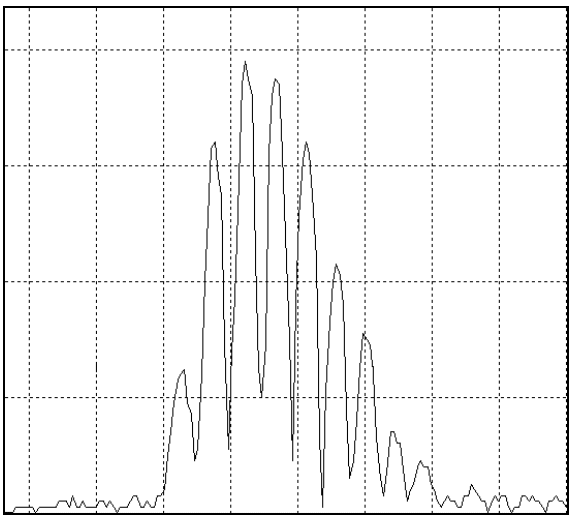
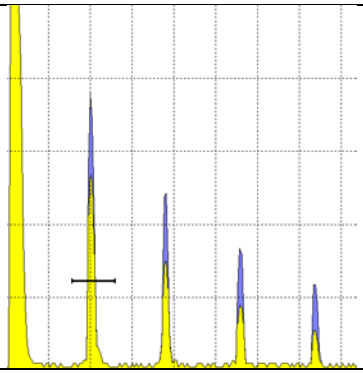


Fig. 8.4.3.1. Caracterització del defecte simulat en les provetes tipus C

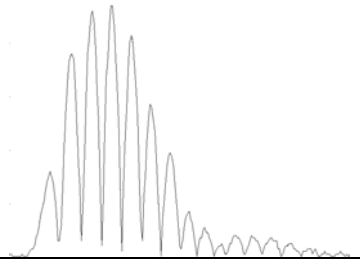
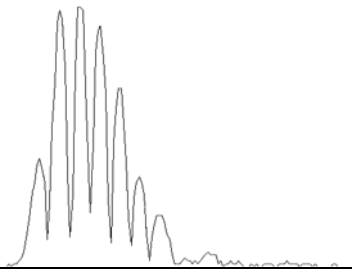
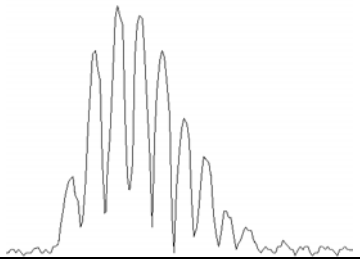
En l'ecograma tipus detectat per la tipologia de defectes simulats en les provetes tipus C es detecten bàsicament quatre pics que sobresurten en amplitud a la resta (al igual que els de les provetes tipus A) però a la vegada gairebé són simètrics dos a dos, essent aquesta la principal característica que diferencia els defectes simulats en les provetes tipus C dels simulats en les tipus A.

# 9. Base de referència per la detecció i identificació ultrasònica de defectes en cordons de soldadura

## 9.1. Detecció ultrasònica de defectes

| ECOGRAMA PATRÓ | EXPLICACIÓ |
|---|---|
|  | Quan l'amplitud mesurada en la inspecció ultrasònica del cordó de soldadura deixa de ser constant (color blau = regió sense defecte) i disminueix (color groc) ens indica la detecció d'algun defecte. L'inspector establirà en cada cas el valor llindar de la disminució d'amplitud a partir de la qual considerar aquella detecció com a defecte. |
| | Fig. 9.1.1. Ecograma detecció |

## 9.2. Identificació de defectes

| ECOGRAMA PATRÓ | IDENTIFICACIÓ DEFECTE |
|---|---|
|  | - Esquerda en el cordó.<br>- Poca penetració del material d'aportació. |
| | Fig. 9.2.1. Ecograma patró A |
|  | - Porositat en el cordó.<br>- Presència d'Inclusions no metàl·liques en el cordó. |
| | Fig. 9.2.2. Ecograma patró B |
|  | - Tall lateral en el cordó<br>- Ruptura del cordó<br>- Osca en el cordó |
| | Fig. 9.2.1. Ecograma patró C |

# 10. Assaig d'un cordó de soldadura real utilitzant la base de referència

## 10.1. Descripció del mètode operat

El mètode operatiu serà el mateix que s'ha utilitzat en l'anàlisi de les diverses provetes però aplicat a un cas real. L'assaig es realitzarà a la Proveta E, la qual disposa de dos cordons de soldadura idèntics, un d'ells sense cap tipus de defecte i l'altre amb tres defectes visibles a simple vista, anomenats defecte A, defecte B i defecte C. A les figures: Fig. 10.1.1.2., Fig. 10.1.1.3., Fig. 10.1.1.4. i Fig. 10.1.1.5. es poden veure imatges de la proveta i de cadascun del tres defectes.

Els anàlisis es realitzaran de forma manual utilitzant aigua com a líquid acoblant i configurant els paràmetres de l'aparell de mesura idòniament per aquesta proveta. La inspecció es portarà a terme al llarg del cordó de soldadura defectuós per tal de comprovar si els patrons de referència experimentals extrets de la inspecció de les provetes són vàlids per la seva aplicació en la detecció i identificació de defectes en la soldadura real.

La inspecció del cordó de soldadura es realitzarà amb el desplaçament del transductor de forma continua i a velocitat constant al llarg de tota longitud del cordó, memoritzant els resultats ultrasònics detectats en la regió sense defecte i en els tres defectes.

Es portarà a terme dues inspeccions ultrasòniques independents, una per a la detecció dels defectes i l'altre per a la identificació i caracterització d'aquests mitjançant els patrons de referència resultants de l'anàlisi experimental realitzat. Per a la detecció dels defectes es realitzaran sis anàlisis per a la regió del cordó de soldadura defectuós que no presenta defectes, i sis més per a cada un dels tres defectes a estudiar. En quan a la caracterització i identificació dels defectes es realitzaran sis anàlisis per a cada un d'ells.

El motiu de realitzar sis anàlisis és per tenir la màxima seguretat de que els resultats obtinguts són fiables. El disposar només d'un anàlisi podria portar a conclusions errònies al no tenir seguretat el resultat obtingut de l'anàlisi sigui correcte o no. Amb l'estudi de tots els anàlisis realitzats es podrà arribar a la conclusió de la validesa o no de la base refencial (apartat 9 de la memòria) per la seva aplicació en la detecció i identificació de defectes en la soldadura real.

Els resultats de tots els anàlisis es troben a l'Annex F adjunt al projecte.

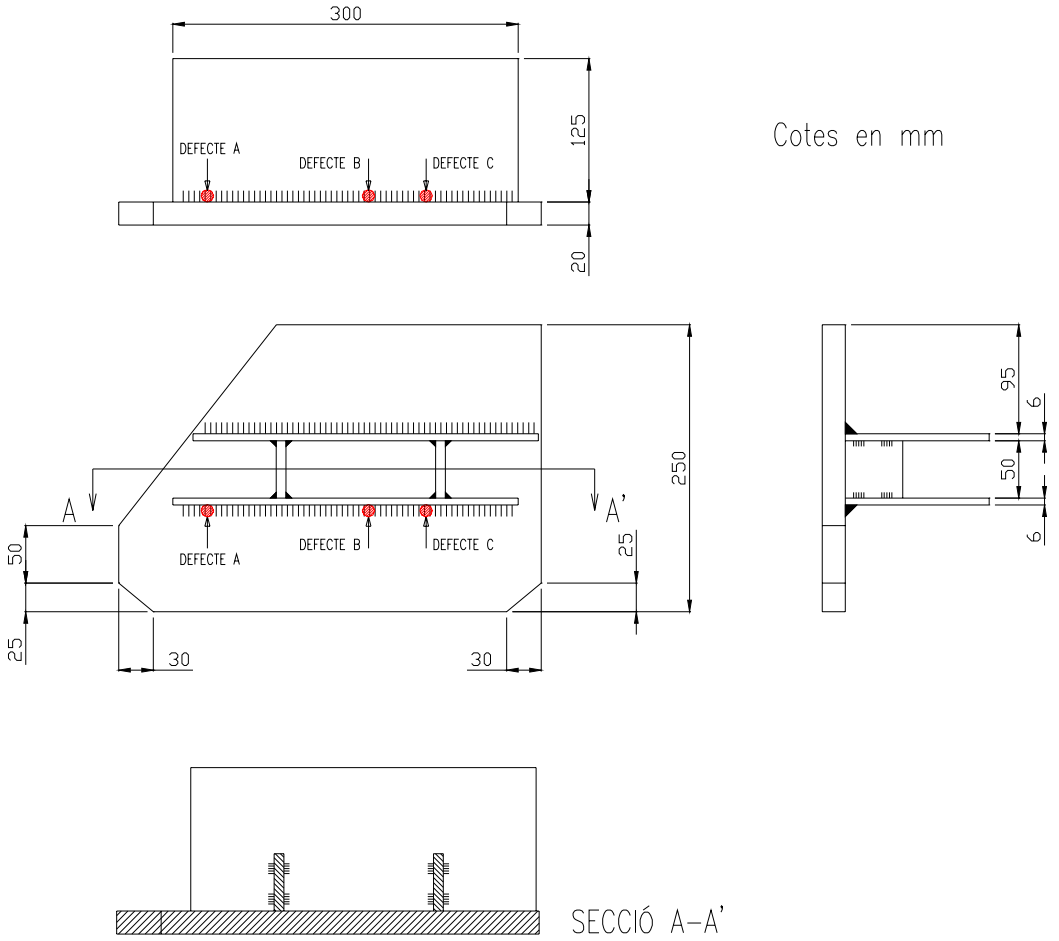



Fig. 10.1.1. Dimensions Proveta E1.

Fig. 10.1.1.2. Imatge proveta E1.

Fig. 10.1.2.3. Imatge defecte A.

Fig. 10.1.1.4. Imatge defecte B.

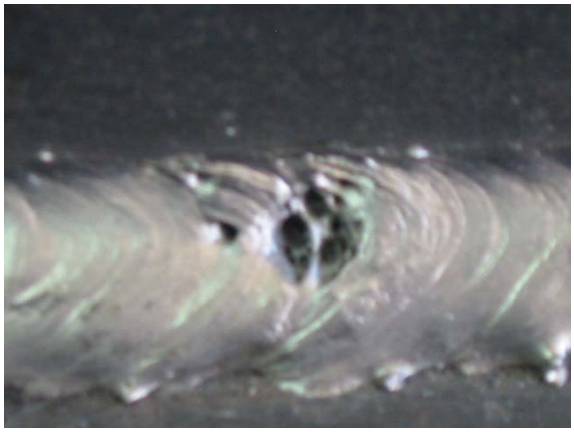


Fig. 10.1.1.5. Imatge defecte C.

## 10.2. Discussió dels resultats de la detecció de defectes

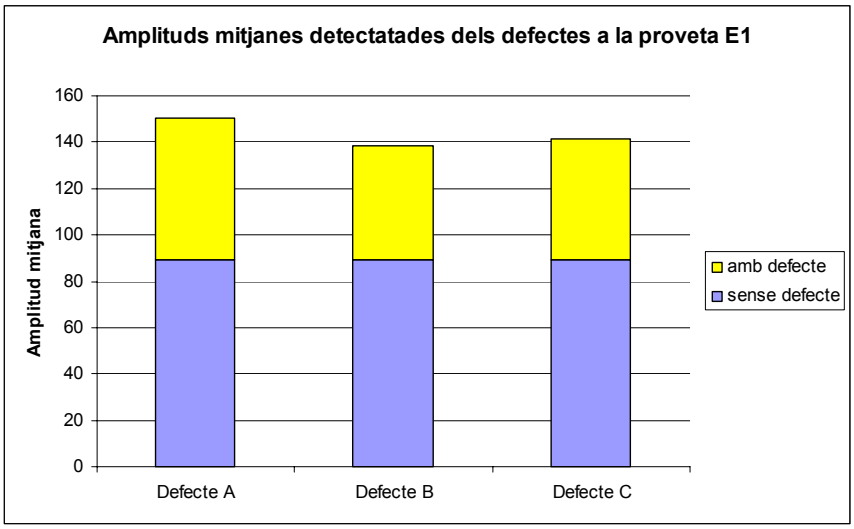
En la inspecció continua del cordó de soldadura, al desplaçar el transductor per la zona del cordó sense presència de defecte, en l'ecograma que proporciona de l'aparell de detecció el segon eco presenta una amplitud gairebé constant. La seva amplitud presenta petites variacions degudes a la uniformitat no perfecte del cordó de soldadura. Quan el feix d'ones emeses per transductor entra en contacte amb una de les regions amb presència de defecte, aquest és detectat i l'amplitud del segon eco disminueix considerablement. Un cop el transductor supera el defecte, l'amplitud del segon pic torna al valor inicial pràcticament constant de la regió sense defecte.

A la taula 10.2.1. es mostra un resum dels valors de la variable "*amplitude current*" mesurada per l'aparell de detecció utrasònica en els diferents anàlisis realitzats per a la detecció dels defectes. Amb la comparació de les amplituds mesurades a la regions sense defecte i amb presència d'aquests, es pot tenir una visió numèrica de les variacions de l'amplitud que presenta el segon eco al llarg de la inspecció continua del cordó de soldadura.

| | PROVETA E1 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | sense defecte | defecte A | defecte B | defecte C |
| ANÀLISI | Amplitud (%) | Amplitud (%) | Amplitud (%) | defecte (%) |
| 1 | 91 | 58 | 51 | 50 |
| 2 | 89 | 63 | 41 | 52 |
| 3 | 89 | 61 | 48 | 53 |
| 4 | 92 | 59 | 43 | 50 |
| 5 | 84 | 60 | 56 | 49 |
| 6 | 91 | 64 | 52 | 55 |
| **MITJANA** | **89** | **61** | **49** | **52** |

Taula 10.2.1. Resum i mitjana de les amplituds del segon eco mesurades en els anàlisis.

La representació de l'amplitud mitjana del segon eco calculada per a cada defecte en comparació amb l'amplitud mitjana de la regió sense presència de defecte mostra que l'existència d'un defecte implica una disminució considerable de l'amplitud del segon eco. Aquesta representació es pot veure al Gràfic 10.2.1.




Gràfic. 10.2.1. Comparativa de l'amplitud en la regió sense defecte i amb defecte.

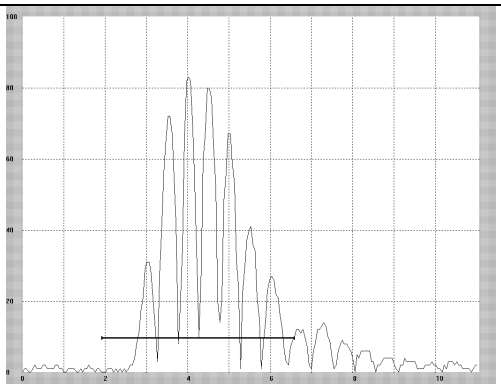
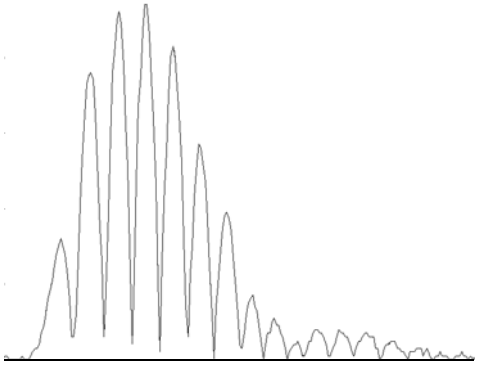
Amb l'anàlisi dels resultats obtinguts en la detecció ultrasònica de defectes del cordó de soldadura real de la proveta s'observa que a les conclusions a les quals s'arriba coincideixen amb les obtingudes en la detecció ultrasònica experimental realitzada per establir una base referencial per la inspecció ultrasònica de cordons de soldadura.

## 10.3. Discussió dels resultats de la identificació i caracterització de defectes

Un cop detectats els tres defectes s'ha procedit a la identificació i caracterització d'aquests. En els resultats s'observa l'existència d'una similitud en tots els ecogrames obtinguts dels diferents anàlisis del mateix defecte. El motiu d'aquesta similitud és degut a que els anàlisis són realitzats de forma manual, l'acoblament mai és constant i que la posició del transductor en el moment de la mesura no és exactament la mateixa en totes les mesures. Considerant acceptable la petita variació que poden presentar els ecogrames obtinguts en l'anàlisi del mateix defecte, es prendrà un ecograma qualsevol per a cada tipus de defecte per portar a terme la comparació d'aquest amb els ecogrames tipus obtinguts en l'anàlisi ultrasònic experimental que es troben en la base de referència de l'apartat 9.2. de la present memòria. Es prendrà un ecograma qualsevol per a cada defecte per tal de simular el cas de la inspecció ultrasònica a temps real, on es realitzarà un únic anàlisi del cordó de soldadura.

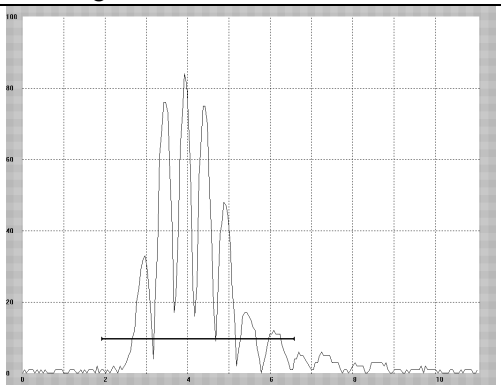
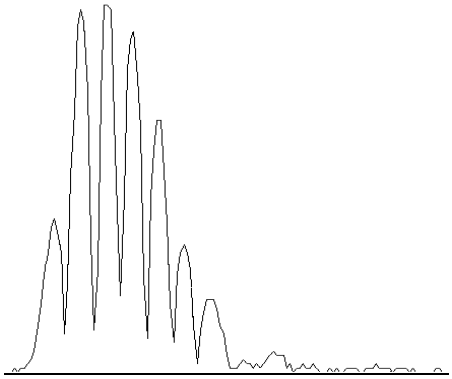
### 10.3.1. Identificació i caracterització del defecte A

Prenent l'ecograma de l'anàlisi 2 (Fig. 10.3.1.1.) com a ecograma característic d'aquest defecte i comparant-lo amb els ecogrames tipus de l'apartat 9.2. de la memòria, s'observa que presenta una gran similitud amb l'ecograma de la Fig. 9.2.1. Per tant, aquest defecte podrà serà identificat com una esquerda o bé poca penetració del material d'aportació, caracteritzat en la proveta tipus A.

| Ecograma característic defecte A | Ecograma tipus identificació del defecte |
|---|---|
|  |  |
| Fig. 10.3.1.1. Ecograma anàlisi 2 defecte A | Fig. 10.3.1.2. Ecograma patró A |

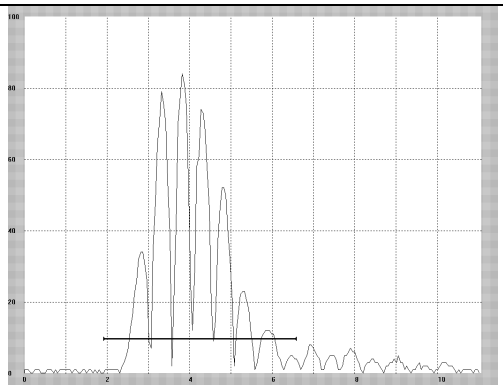
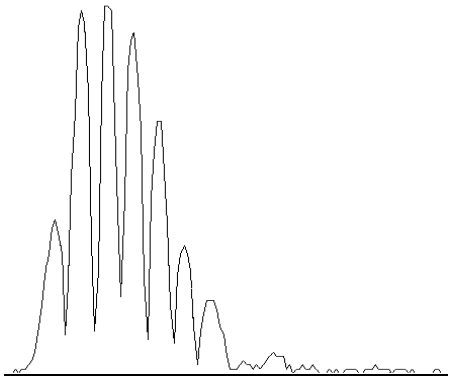
### 10.3.2. Indentificació i caracterització del defecte B

Prenent l'ecograma de l'anàlisi 2 (Fig. 10.3.2.1.) com a ecograma característic d'aquest defecte i comparant-lo amb els ecogrames tipus de l'apartat 9.2. de la memòria, s'observa que presenta una gran similitud amb l'ecograma de la Fig. 9.2.2 Per tant, aquest defecte podrà serà identificat com a porositat o bé inclusions no metàl·liques, caracteritzat en la proveta tipus B.

| Ecograma característic defecte B | Ecograma tipus identificació del defecte |
|---|---|
|  |  |
| Fig. 10.3.2.1. Ecograma anàlisi 2 defecte B | Fig. 10.3.2.2. Ecograma patró B |

### 10.3.3. Identificació i caracterització del defecte C

Prenent l'ecograma de l'anàlisi 2 (Fig. 10.3.3.1.) com a ecograma característic d'aquest defecte i comparant-lo amb els ecogrames tipus de l'apartat 9.2 de la memòria, s'observa que presenta una gran similitud amb l'ecograma de la Fig. 9.2.2 Per tant, aquest defecte podrà serà identificat com a porositat o bé inclusions no metàl·liques, caracteritzat en la proveta tipus B.

| Ecograma característic defecte C | Ecograma tipus identificació del defecte |
|---|---|
|  |  |
| Fig. 10.3.3.1. Ecograma anàlisi 2 defecte C | Fig. 10.3.3.2. Ecograma patró B |

# Conclusions

El mètode operatiu dissenyat per a la creació d'una base referencial per a la inspecció ultrasònica de cordons de soldadura en elements estructurals metàl·lics ha estat acertat. Els resultats obtinguts de forma experimental amb l'anàlisi de les provetes que simulen els possibles defectes de soldadura ha permès confeccionar la base referencial, la qual ha estat comprovada amb un cas real de soldadura i s'ha corroborat la seva validesa en l'aplicació en camp real.

La detecció i identificació dels defectes produïts en el procés de soldadura és possible mitjançant la inspecció ultrasònica del cordó de soldadura:

- La detecció d'un defecte es realitza amb el valor de l'amplitud del segon eco detectat per l'aparell de detecció ultrasònica. Al llarg de la inspecció del cordó de soldadura l'amplitud d'aquest eco es manté pràcticament constant, però al ser detectat algun defecte l'amplitud presenta una disminució. L'inspector ha de ser l'encarregat de definir el llindar a partir del qual el valor d'aquesta disminució serà detectat com a defecte.

- Un cop detectat un defecte és possible la seva identificació amb la comparació de l'ecograma obtingut de la inspecció ultrasònica del defecte amb els ecogrames tipus establerts en la base referencial per a la inspecció ultrasònica de cordons de soldadura en elements estructurals metàl·lics, objectiu d'aquest projecte.

# Agraïments

- CAMPS GROUP: Assessorament tècnic, bibliogràfic i direcció de projecte.

- TALLERS PARRAMON S.A.: Cessió de les seves instal·lacions per a la realització dels assaigs.

- ESTAMPACIONS METÀL·LIQUES BARRACA, S.C.P. : Cessió de taller i maquinària per mecanització de provetes.

- DANIEL VIDAL I PONS: Mecanització de provetes.

# Bibliografia

Al final del cos del document, s'hi ha d'incloure una llista de totes les fonts en què es basa el document i ha de fer-se referència a aquesta llista en els llocs adequats dins del text. Opcionalment la documentació suplementària que no se cita en el text, però que es considera d'interès per al lector del projecte, s'ha incloure com a llista bibliogràfica independent en un apartat (bibliografia complementària) d'aquest mateix capítol.

## Referències bibliogràfiques

**[1]** J. BÉNARD, A. MICHEL, J. PHILIBERT, J. TALBOT. Metalurgia General. Paris. 1973. Pàg. 416.

**[2]** AMERICAN WELDING SOCIETY. Brazing manual. Chapman & Hall Ltd. London. 1955.

**[3]** Norma Francesa NF C90-50.

**[4]** ASM HANDBOOK: "Welding, Brazing amb Soldering. Volume 6. England. (ISBN 0-87170-382-3).

**[5]** COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION.

**[6]** SELCO. Manuale istruzioni uso e manutezione. Generatori sinergici multifunzione per saldature. Edizione '01. Padova (Italy), 2001. Pàg. 78.

**[7]** PANAMETRIX, INC. NDT DIVISION. Instruction manual. EPOCH IIIB model 2400, part #910-155A. Waltham (USA), 1990. Pàg. 10.

**[8]** PANAMETRIX, INC. NDT DIVISION. Ultrasonci transducers.. Waltham (USA). Cap. 10, pàg. 1-3, 1997.

**[9]** C. W. WEGST. Stahlschlüssel. Herausgabe und Vertieb. Verlag Stahlschüssel GmbH. Marbach, 1983.

## Bibliografia complementària

Soldadura:

N.F. LASHKÓ, S.V. LASHKÓ. Soldadura Indirecta de Metales. De. Mir. Moscú. 1979.

J. BÉNARD, A. MICHEL, J. PHILIBERT, J. TALBOT. Metalúrgia General. Ed. Hispano Europea. Barcelona. 1973.

B. CHALMERS. Physical Metallurgy. Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1962.

BARRIE D. DUNN. Metallurgical Assessment of Sapcecraft Parts and Materials. Ellis Horwood Limited, West Sussex, 1992. (ISBN 0-7458-0762-3).

B. M. BUDAK, A. A. Samarski, A. N. TIJONOV. Problemas de la física matemàtica. De. Mir. Moscú, 1984.

A. N. KRETÓVNIKOV, V.N VIGDOROVICH. Termodinámica química. De. Mir. Moscú, 1980.

B. S. BOKSHTEIN. Difusión de metales. De. Mir. Moscú,1980.

HOWARD H. MANKO. Solders and Soldering. McGraw-Hill Book Company. New York, 1978. (ISBN 0-07-0.9897-6).

CARLOS RANNINGER RODRÍGUEZ. Curso superior de soldadura. Apuntes ETSEIB. Barcelona, 1992.

Ultrasons:

LION, D.R. AND HUTCHINS, D.A. Development of novel piezoelectric ultrasonic transducers for couplant-free ultrasonic testing Brit. J. NDT, vol 35 pàg. 705-708, 1993.

DRINKWATER, B. AND CAWLEY, P. Practical application of solid coupled ultrasonic transducers Mat. Eval. pàg. 401-406, 1997.

DICKSON, K.J. Dry coupling ultrasonic method of inspection on composite and metallic honeycomb panels on aircraft structures. Pro. 10th World Conf. On NDT, pàg. 216-221, 1982.

KALAL, J. Water sensitive chemically cross-linked gels. Inst. Macromol. Chem, Czechoslovak Academy of sciences, Prague 6, Czechoslovakia, pàg. 71-80, circa 1980.

VICENZA, A. M. ET AL. A study of the water sorption kinetic of Poly(HEMA) hydrogels by SLAM an FT-IR measurements. IEEE Trans. On Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol 43 Nº 5, pàg. 948-955, 1996.

MAFFEZZOLI, A. ET AL. Ultrasonic characterisation of water sorption in Poly (2-hydroxyethyl mathacrylate) hyrogels. Jn. Of Applied Polymer Science, vol 67, pàg. 823-831, 1998.

KRAUTKRAMER, J. AND KRAUTKRAMER, H. Ultrasonic testing of materials. Springer-Verlag (Berlin), 4th Edition, 1990.

P. FELLINGER, R. MARKLEIN, K. J. LANGENBERG, S. KLAHOLZ. Numerical modelling of elastic wave propagation and scattering with EFITelastodynamic finite integration technique. Wave Motion Special Issue 1994.

W. HESSELMANN, T. JUST, H. KOSCHEDA. Sensitivity and flaw detectability of ultrasonic testing of cladded surfaces. Proc. 12th World Conf. Non-Destructive Testing, (1989) pàg. 1125-1127, ed. J. Boogaard, G. M. van Dijk, Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1989.

K. J. LANGENBERG, P. FELLINGER, R. MARKLEIN. On the nature of the so called subsurface longitudinal wave and/or the surface longitudinal "creeping" Wave. Res. Nondestr. Eval. 2 (1990) pàg. 59-81.

K. J. LANGENBERG, T. KREUTTER, V. SCHMITZ. Holographic imaging of cacks in welds. Proc. Int. Conf. on Improved Weldment Control with Special Reference to Computer Technology, (1988), pàg. 97-104, Pergamon Press, Oxford.

K. MAYER, R. MARKLEIN, K. J. LANGENBERG, T. KREUTTER. Three dimensional imaging system based on Fourier transform synthetic aperture focusing technique. Ultrasonics 28 (1990), pàg. 241-255.

V. SCHMITZ, Ultrasonic imaging methods. Principles, realisations and applications. Proc. 10th Int. Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, 1990, pàg. 289-295, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

M SPIES. Elastic waves in homogeneous and layered transverselyisotropic media: plarze waves and Gaussian wavepackets. A general approach. J. Acoust. Soc. Am. 95 (1994), pàg. 1748-1760.

M. SPIES, Elastic wave propagation in general transversely- isotropic media. I: Green's functions and elastodynamic holography. J. Acoust. Soc. Am. 96 (1994), pàg. 1144-1157.

M. SPIES, Elastic wave propagation in transversely- isotropic media. II: The generalized Rayleigh function and an integral representation for the transducerfleld. Theory. J. Acoust. Soc. Am. (1994).

M. SPIES, Transducer- modelling in general transversely isotropic media via point-source- synthesis. Theory. J. NDE (1994)-

M. SPIES, P. FELLINGER, U. SCHLEICHERT, K. J. LANGENBERG. Ultrasonic field patterns and broadband imaging- simulations in transversely isotropic media Rev. Progr. Quant. NDE 12A (1993), pàg. 123-130.

M. VIJAYENDRA, E. NEUMANN. Reflection and transmission energy coefficients at the interface between austenitic base and weld metal in the case of inclined columnar grains. J. Phys. D, Appl. Phys. (1995).

K. WILKEN, Review of experiences with the longitudinal bend test (LBT) for microfissuring susceptibility of deposited weld metal. International Institute of Welding IIW / IIS - Doc - IX - 1722 - 93 (1993).

## Web's consultades

http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm

http://www.ndt.net

http://karldeutch.de