

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TÉCNICA DIGITAL PARA LA MEDICIÓN DE LA DISTORSIÓN EN  
UNIONES DE GRAN LONGITUD Y ESPESOR GRUESO SOLDADAS POR  
GMAW.**

**POR**

**RAFAEL FÉLIX CONTRERAS**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA  
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 20 DE ENERO DE 2017**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TÉCNICA DIGITAL PARA LA MEDICIÓN DE LA DISTORSIÓN EN  
UNIONES DE GRAN LONGITUD Y ESPESOR GRUESO SOLDADAS POR  
GMAW.**

**POR**

**RAFAEL FÉLIX CONTRERAS**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA  
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 20 DE ENERO DE 2017**

# AGRADECIMIENTOS

## **A COMIMSA:**

Agradezco profundamente al gran equipo *COMIMSA* por la atención y disposición otorgada hacia mí, de la misma manera agradezco la oportunidad de estar bajo la estructura de formación *COMIMSA*.

## **A CONACYT:**

Agradezco profundamente el apoyo económico otorgado para realizar estudios de tiempo completo y obtener así el grado de especialista en tecnologías de la soldadura industrial.

## **A los maestros:**

Agradezco profundamente la invaluable calidad y dedicación a la enseñanza otorgada para obtener los conocimientos necesarios para la realización del trabajo presente.

## **A mi familia:**

Agradezco profundamente el apoyo incondicional y comprensión otorgada para alcanzar una nueva meta en la vida.

# DEDICATORIA

Dedicado a aquellas personas que han puesto el apoyo para que esta etapa en mi formación académica se haya alcanzado, pero principalmente y de manera muy especial a mi familia, ya que ellos son el motor que me impulsa y me fortalece incondicionalmente.

# ÍNDICE

SÍNTESIS .....	1
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 ANTECEDENTES .....	2
1.2 OBJETIVO.....	3
1.2.1 Objetivos Específicos.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	4
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
1.5 APORTACIÓN INDUSTRIAL .....	5
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO .....	5
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 DILATACIÓN Y CONTRACCIÓN TÉRMICA.....	6
2.2 CAMBIO VOLUMÉTRICO POR TRANSFORMACIÓN DE FASE .....	7

2.2.1 Cambios de volumen por temperatura .....	8
2.2.2 Transformaciones de fases .....	8
2.3 FENÓMENO DE DISTORSIÓN POR SOLDADURA.....	10
2.3.1 Clasificación por Distorsión .....	12
2.4 ESFUERZOS RESIDUALES.....	14
2.5 PROCESO DE SOLDADURA GMAW.....	15
2. 6 ESCÁNER 3D PARA MEDICIÓN DE DISTORSIÓN.....	18
2.6.1 Escáner 3D de contacto .....	18
2.6.2 Escáner 3D sin contacto denominado como activos .....	19
2.6.3 Escáner 3D sin contacto denominado como pasivos.....	21
2.7 MÉTODOS PARA MEDIR DISTORSIÓN .....	22
2.7.1 Reconstrucción y Modelado .....	22
2.7.2 Establecer sólidos a partir de mallas de polígonos .....	24
CAPÍTULO 3 ESTADO DEL ARTE .....	26
3.1 PREDICCIÓN Y SIMULACIÓN DE DISTORSIÓN .....	26
3.2 DISTORSIÓN ASOCIADA A LA ENTRADA DE CALOR.....	29
3.3 COMPARACIÓN DE DISTORSIÓN A TRAVÉS DE TÉCNICAS DIGITALES.....	30
3.4 TÉCNICAS PARA LA INSPECCIÓN DE DISTORSIÓN.....	32

CAPITULO 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA .....	35
4.1 PUNTOS INVARIANTES Y PLANTILLA DE TARGETS.....	35
4.2 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE ESCANEEO.....	36
CAPITULO 5 CASO DE ESTUDIO .....	37
5.1 ETAPA DE AJUSTE PARA ESCANEEO.....	37
5.1.1 Punto Invariante .....	39
5.1.2 Plantilla de marcas de referencia .....	40
5.1.3 Resolución de Escaneo.....	45
5.2 PRUEBAS PRELIMINARES.....	47
5.2.1 Punto Invariante .....	47
5.2.2 Plantilla de <i>Targets</i> .....	48
5.2.3 Resolución de Escáner .....	51
5.3 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DIGITAL 3D .....	52
5.3.1 Aplicación de técnica, Caso I .....	52
5.3.2 Aplicación de técnica, Caso II .....	53
5.4 MATERIAL Y EQUIPO UTILIZADO PARA EL PROYECTO .....	54
CAPITULO 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	59
6.1 RESULTADOS DE PRUEBAS PRELIMINARES .....	59
6.1.1 Resultados al establecer punto invariante.....	60

6.1.2 Resultados al establecer plantilla de <i>targets</i> .....	60
6.1.3 Resultados al establecer resolución de escaneo .....	61
6.2. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DIGITAL 3D	62
6.2.1 Resultados de aplicar técnica sobre Caso I: .....	62
6.2.2 Resultados de aplicar técnica sobre Caso II: .....	64
CONCLUSIONES .....	66
LISTA DE ECUACIONES .....	67
LISTA DE TABLAS .....	68
LISTA DE FIGURAS .....	69
BIBLIOGRAFÍA .....	72



# SÍNTESIS

En el presente documento se describe el procedimiento para determinar magnitud y dirección en distorsiones utilizando escáner 3D sobre placas AISI-1018 con espesor de 16mm en uniones por soldadura GMAW de gran longitud.

Estableciendo adecuadamente el fenómeno de distorsión a través de aquellos conceptos teóricos que fundamentan de forma científica cómo se presenta dicho evento en uniones de gran longitud y de espesor grueso utilizando proceso de soldadura GMAW.

De igual forma, se recomienda una técnica para establecer de manera adecuada los valores de ajuste (*SET-UP*) para realizar la medición de distorsión con precisión y con rapidez.

La técnica digital para medir distorsión que presenta este documento se realiza a través de un caso de estudio, donde se muestra la alteración geométrica bajo dos circunstancias distintas al aplicar el proceso de soldadura GMAW, logrando así, establecer de manera cuantificada la magnitud y dirección sobre cada discordancia geométrica generada.

# **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 ANTECEDENTES**

En los procesos de ensamble mediante el proceso GMAW en uniones de gran longitud sobre placas de acero con espesor grueso, se presenta una problemática de distorsión en la geometría final tras dicha unión, lo cual es efecto del calor inducido en el metal, siendo posible controlar tal fenómeno a través de los parámetros del proceso.

Para lo anterior, es necesario medir las distorsiones presentes a lo largo de la unión en magnitud y dirección mediante técnicas digitales 3D de medición, con el fin de establecer sectores de la geometría donde sea posible controlar la entrada de calor para reducir el efecto de la distorsión.

Por parte de COMIMSA se han llevado a cabo proyectos donde dicha medición se realiza para distintos fines, siendo en cada uno de ellos mediante procedimientos diferentes, por tal motivo se ha propuesto crear un manual en

donde se establezca de manera sistemática la medición y a su vez se estandarice el método para realizarla.

En consecuencia a la problemática que se presentó inicialmente, se pretende diseñar un manual de procedimiento que explique el método para realizar la medición enfocada a uniones de gran longitud sobre placas AISI-1018 de 16 *mm* de espesor mediante el proceso GMAW.

## **1.2 OBJETIVO**

Realizar un procedimiento para determinar magnitud y dirección de distorsiones utilizando un escáner de tres dimensiones sobre placas AISI-1018 con espesor de 16mm en uniones por soldadura GMAW de gran longitud.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

1.- Establecer la metodología de digitalización y conversión de conjuntos de puntos a malla de polígonos de placas patrón (placas de 30 cm de longitud y 16 mm de espesor).

2.- Obtener nubes de puntos digitalizados mediante escaneo 3D de alta precisión en placas de acero antes y después de ser soldadas por el proceso GMAW.

3.- Convertir las nubes de puntos en mallas de polígonos y posteriormente en geometrías de sólidos.

4.- Traslapar las geometrías de las configuraciones deformada y no deformada para obtener las mediciones de distorsión estableciendo la metodología para realizar dicha medición.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

Basado en que las acciones correctivas para controlar la deformación por soldadura requieren ser medidas, este proyecto propone establecer cómo realizar la medición de distorsión determinando magnitud y dirección mediante escáner de tres dimensiones en uniones de gran longitud por GMAW sobre placa AISI-1018 de 16 mm de espesor.

### **1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Cuando se realizan procesos de soldadura sobre placas de acero, éstas tienden a tener cierta distorsión debido al calor que se genera durante el proceso, sin embargo, es necesario medir el grado de distorsión con la finalidad de encontrar formas de controlarla para que no interfiera con procesos posteriores.

La medición de distorsión mediante escáner de tres dimensiones, se efectúa a través de comparación de imágenes digitales donde es representado el objeto en su forma ideal y partiendo de esto, es que se establece un punto de referencia para compararlo con el objeto deformado obtenido por medio de una nube de puntos y a través de esta comparación se mide la magnitud y dirección de la distorsión.

Bajo el método de escáner de tres dimensiones y estableciendo una nube de puntos sobre un patrón, será posible establecer la distorsión generada por soldadura GMAW sobre placas AISI-1018 de gran longitud con espesor de 16 mm, y con esto llegar a establecer cómo realizar tal medición.

## **1.5 APORTACIÓN INDUSTRIAL**

Siendo modelos esquemáticos los que presentan la forma de realizar la medición de distorsión, aunado a que los equipos de escaneo 3D son genéricos utilizables para distintos fines, este proyecto mostrará cómo determinar dirección y magnitud de las deformaciones resultantes de uniones de GMAW de gran longitud en placa AISI-1018 con espesor de 16 mm mediante escáner 3D.

## **1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO**

Este proyecto se limita a la medición de la distorsión mediante técnicas digitales de escaneo 3D en placas de acero de 30cm de longitud y 16mm de espesor soldadas por proceso GMAW.

# **CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO**

## **2.1 DILATACIÓN Y CONTRACCIÓN TÉRMICA**

La causa fundamental de la deformación por soldadura es la variación local de dimensiones del metal en la zona de unión, dado que, los metales por su naturaleza dilatan de forma volumétrica cuando son expuestos a una fuente de calor y de manera inversa ejercen una contracción cuando la temperatura disminuye, siendo esto un comportamiento normal de un metal frente a una dilatación y una contracción libre (1).

Cuando la dilatación y/o la contracción en un metal ocurren de manera impedida, el metal presenta un comportamiento distinto, dado que durante la dilatación impedida existen fuerzas de compresión actuando sobre el metal y durante una contracción impedida presenta fuerzas de tensión sobre sí mismo (2).

Una dilatación impedida genera un aumento de volumen irregular en algún punto del material por efecto de fuerzas de compresión sobre aquellos puntos

donde se impide una dilatación longitudinal, quedando esto como una deformación permanente en las dimensiones del material, por tanto, durante la contracción impedida las fuerzas de tensión actúan generando tracción con posibilidad de llegar a la fractura si el material rebasa el límite elástico tal como se muestra en la Figura 2.1.

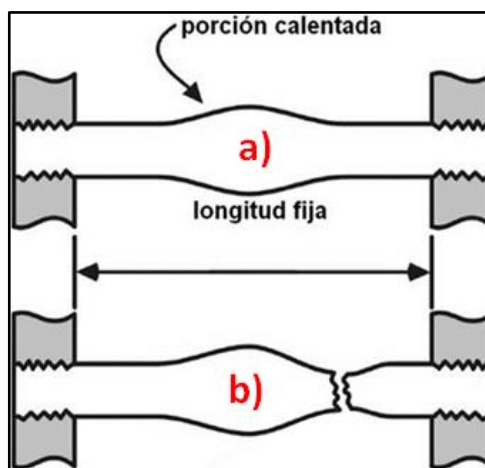


Figura 2.1 Comportamiento de dilatación y contracción impedida, a). La dilatación impedida genera cambios volumétricos permanentes, b).La contracción impedida es causa de fractura por esfuerzos (3).

## 2.2 CAMBIO VOLUMÉTRICO POR TRANSFORMACIÓN DE FASE

Los cambios volumétricos se presentan en los aceros expuestos a cambios de temperatura obedeciendo esto a las leyes de la dilatación, teniendo estos cambios de temperatura fronteras llamadas temperaturas críticas, dado que al ser rebasadas se genera transformaciones de fase, lo cual ocasiona cambios de volumen por la estructura cristalina de estas.

Estas estructuras coexisten unas con otras en relación contenido de carbono contenido en el acero y a la velocidad con que se presentan los cambio de

temperatura, considerando que este documento establece el estudio sobre acero de bajo contenido de carbono, se enfocaran los cambios volumétricos a las fases presentes en esa zona del diagrama hierro- carbono.

### 2.2.1 Cambios de volumen por temperatura

Los aceros experimentan aumento de volumen cuando sufren un incremento en la temperatura, este incremento responde a un coeficiente de dilatación de  $14 \times 10^{-2}$  mm en los aceros de bajo carbono calentados entre 20°C y 700°C, es decir, que si una varilla de acero *AISI-1018* con 100mm de longitud es calentada desde 20°C (*temperatura ambiente*) hasta 600°C, resultando en una dilatación del 0.81mm, esto se obtiene utilizando la ecuación 1 (4).

$$D = (L \cdot C_{dil})(\Delta T) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- $D$ = dilatación (*mm*)
- $C_{dil}$ = coeficiente de dilatación
- $L$ = longitud de la pieza (*mm*)
- $\Delta T$ = diferencial de temperatura (°C)

### 2.2.2 Transformaciones de fases

El rango de temperaturas desde 730°C hasta 738°C se establecen como temperatura crítica para el acero con contenido de carbono entre 0.18% y 0.20% dentro del diagrama *Hierro-Carbono*, dado que al rebasar dicha temperatura, la *fase ferrita* se transforma a *austenita*, ocasionando una



contracción en dicho cambio debido a la reducción volumétrica por el cambio de estructura cristalina, ya que la ferrita presenta una estructura cúbica centrada en el cuerpo (*BCC*, por sus siglas en inglés) y la austenita una estructura centrada en las caras (*FCC*, por sus siglas en inglés) (4). (Ver Tabla 2.1)

Considerando lo anterior, durante un enfriamiento muy lento en un acero al carbono, el comportamiento en las estructuras cristalinas resulta en trayectoria inversa al calentamiento, teniendo temperatura entre 710°C y 680°C transformando de *austenita* a *ferrita*, ocurriendo en dicha transformación una dilatación ocasionado por el cambio de estructura cristalina, es decir se transforma de estructura *FCC* a estructura *BCC*, siendo la estructura austenítica más compacta que la estructura ferrítica (4) (5). (Ver Tabla 2.1)

Tabla 2.1 Tabla con valores de factor de empaquetamiento en estructuras CS, BCC y FCC (5).

Tipo de estructura cristalina	Abreviación	No. De átomos contenidos	Factor de empaquetamiento
<i>CUBICA SIMPLE</i>	<b>CS</b>	1	0.52
<i>CUBICA CENTRADAD EN EL CUERPO</i>	<b>BCC</b>	2	0.68
<i>CUBICA CENTRADAD EN LAS CARAS</i>	<b>FCC</b>	4	0.74

En el caso de un enfriamiento acelerado, en un acero al carbono se presenta una transformación de *fase austenita* a *martensita*, la cual presenta una estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo (*BCT* por sus siglas en inglés), logrando dicha transformación llevando de temperaturas austeníticas hasta temperaturas por debajo de 50°C instantáneamente, obteniendo de esta transformación un aumento en el volumen en el acero a baja temperatura, es decir, no se cuenta con la plasticidad que se tiene a temperaturas elevadas, existiendo el riesgo de fractura.

Se da el riesgo de fractura durante la transformación martensítica cuando el enfriamiento en la superficie del acero finaliza encapsulando al núcleo que se encuentra en dicha etapa de transformación, al transformar el núcleo completamente se da un aumento de volumen presentando esfuerzos de tracción en la superficie, llegando en ocasiones a fracturar la misma) (4). (Ver Figura 2.2)

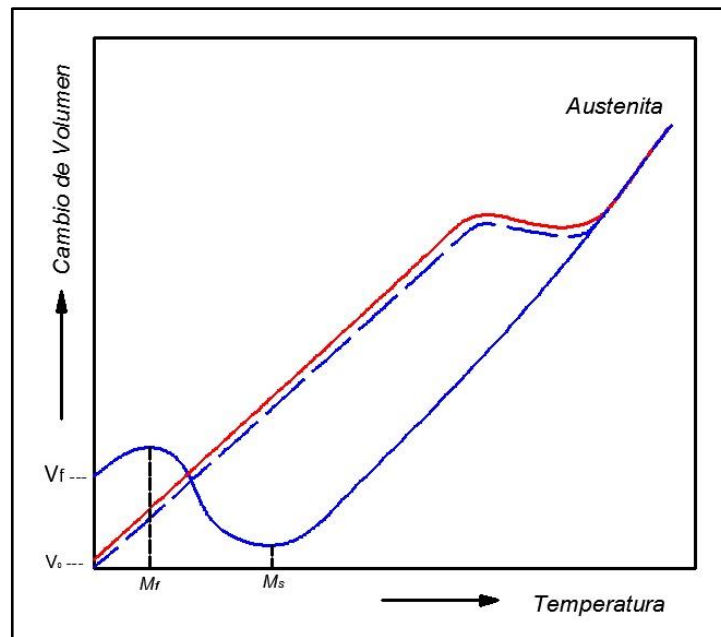


Figura 2.2 Gráfica de los cambios de volumen en relación al calentamiento de un acero (*línea roja*) con enfriamiento lento (*línea segmentada azul*) y el caso de un enfriamiento rápido (*línea continua azul*) (4).

### 2.3 FENÓMENO DE DISTORSIÓN POR SOLDADURA

La distorsión en soldaduras resulta de la expansión y contracción del metal del cordón y el metal base adyacente, ocurre durante el ciclo de calentamiento y enfriamiento de dicho proceso. Durante este ciclo, es cuando se presenta la contracción del metal que conduce a la distorsión (6). Esta última es producida

en un metal por causa de la distribución no uniforme de calor entrante lo cual genera expansión y contracción como se muestra en la Figura 2.3, siendo conocido este fenómeno como *distorsión por soldadura*.

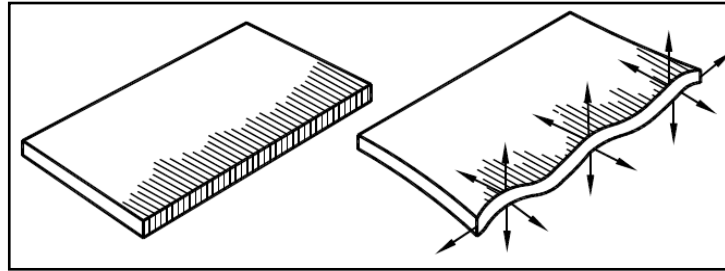


Figura 2.3 Fenómeno de distorsión por calentamiento (7).

La distorsión por soldadura genera esfuerzos residuales que debilitan el material reduciendo la capacidad de carga que éste pueda soportar, dado que estos esfuerzos son cargas que actúan permanentemente sobre los materiales que presentan distorsión por soldadura (8). (Ver Figura 2.4)

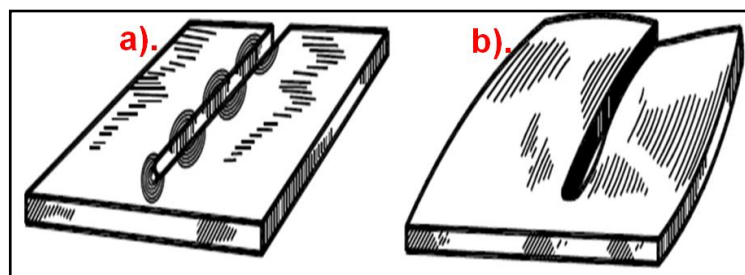


Figura 2.4 Efecto de esfuerzos residuales por calentamiento,  
a). Geometría inicial de la placa antes de ser expuesta al calentamiento,  
b). Geometría final de la placa después de estar expuesta al calentamiento (2).

Un caso común para ejemplificar el fenómeno de distorsión se da al aplicar un cordón de soldadura sobre una barra de acero, ésta sufrirá una distorsión típica deformando la barra hacia la cara donde se aplica el cordón de soldadura causando dilatación y posteriormente contrayendo sobre la cara posterior como se muestra en la Figura 2.5 (2).

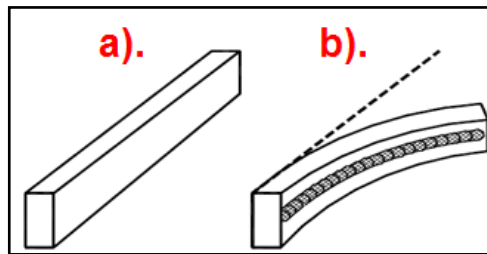


Figura 2.5 a). Ilustración de geometría de una barra antes de aplicar cordón de soldadura, b). Modificación geométrica por efecto de apilamiento, por causa de aplicar un cordón de soldadura sobre una cara de una barra de acero (2).

### 2.3.1 Clasificación por Distorsión

Debido a que el efecto de contracción puede dirigir esfuerzos en distintos sentidos, existe una clasificación de los tipos de distorsión (ver Figura 2.6). A continuación se mencionan únicamente las formas básicas, ya que otras formas de distorsión sólo son combinaciones entre las principales:

**(A) Contracción transversal:** es generada por la combinación de esfuerzos en sentido perpendicular a la unión.

**(B) Contracción longitudinal:** es generada por la combinación de esfuerzos en sentido paralelo a la unión.

(C) Distorsión longitudinal: presente cuando el material soldado muestra pandeo uniforme a lo largo de la trayectoria de soldadura.

(D) Distorsión angular: presente cuando el material soldado muestra pandeo uniforme perpendicular a la trayectoria de soldadura.

(E) Distorsión de rotación: afecta el paralelismo en los bordes, generando separación o contracción entre estos durante el proceso de unión.

(F) Distorsión por pandeo: presente cuando la unión muestra un pandeo no uniforme justo sobre la trayectoria de la unión.

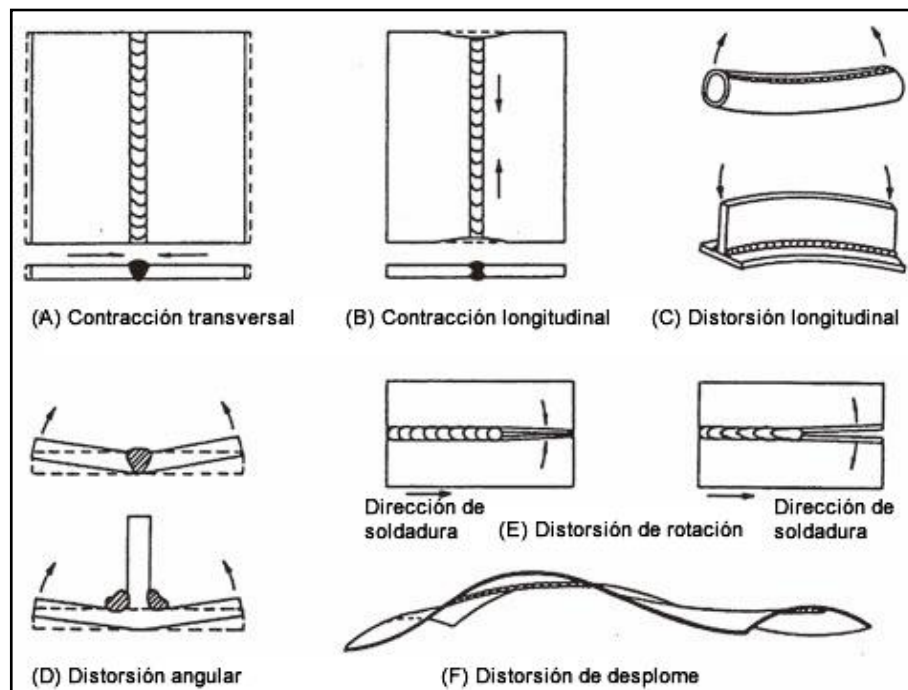


Figura 2.6 Clasificación de las formas básicas de distorsiones por soldadura (7).

## 2.4 ESFUERZOS RESIDUALES

Los esfuerzos residuales son el efecto de esfuerzos internos generados a causa de cambios de temperatura no uniformes sobre un material, siendo estos entonces esfuerzos térmicos (3).

Bajo el modelo de tres barras es posible explicar los esfuerzos residuales (ver Figura 2.7), éste explica el efecto que ocurre en tres barras que se encuentran limitadas permanentemente por una placa sobre los extremos superiores de las barras y otra placa en los extremos inferiores, en tal modelo es expuesta la barra central a temperatura considerablemente elevada respecto a la temperatura ambiente manteniendo las dos barras laterales a temperatura ambiente a lo largo de dicho periodo, es decir, sobre éstas últimas no ocurre cambio térmico en ningún momento.

Posteriormente se interrumpe el calentamiento sobre la barra central permitiendo que ésta regrese a temperatura ambiente, resultando que durante el periodo de calentamiento de la barra central presenta dilatación y por tanto se ve sometida a esfuerzos de compresión, durante ese mismo periodo las barras laterales se someten a esfuerzos de tensión a consecuencia también de la dilatación de la barra central.

Cuando la barra central alcanza temperatura ambiente, ocurre una contracción para regresar a su estado inicial, sin embargo, tal contracción se ve restringida por las barras laterales, dado que éstas no modificaron su longitud, siendo entonces esfuerzos de tensión los que actúan a través de la barra central, por lo tanto, éstos son esfuerzos residuales que adquirió dicho sistema a consecuencia del cambio térmico no uniforme que experimentó (3).

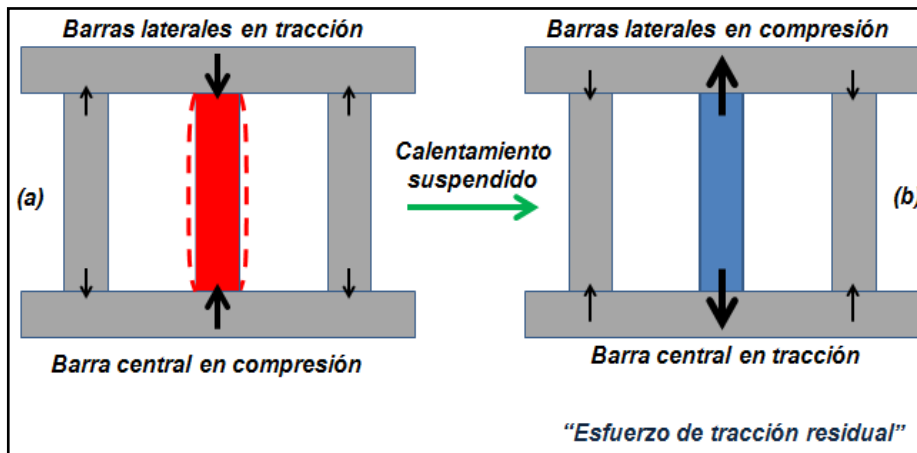


Figura 2.7 Ilustración de modelo de tres barras,

- a). Barra central se encuentra en compresión al dilatarse, b). Disminuye la temperatura de la barra central sufriendo una contracción y con ello esfuerzos de tensión (3).

## 2.5 PROCESO DE SOLDADURA GMAW

El proceso de soldadura por arco eléctrico de metal y protección de gas (*GMAW*, por sus siglas en inglés) tiene como característica principal inducir menor temperatura sobre el metal en comparación a otros procesos y por lo tanto, reduce la presencia de distorsiones (7) (9).

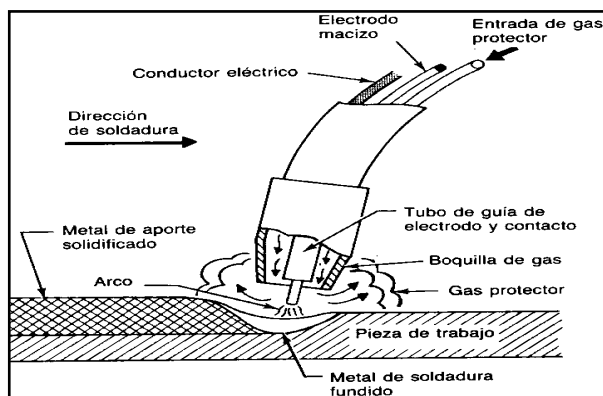


Figura 2. 8 Ilustración de operación de proceso de soldadura *GMAW* (7).

Este proceso se divide en dos subprocesos llamados Metal-Gas Activo y Metal-Gas Inerte (*MAG* y *MIG* respectivamente por sus siglas en inglés) según las características químicas del gas de protección que sea utilizado:

**a).- MAG:** involucra gas de protección activo, es decir, el gas de protección y el metal fundido llevan a cabo una reacción química donde el resultado proporciona un metal en la unión con características mecánicas especiales.

**b).- MIG:** involucra gas de protección inerte, es decir, el gas de protección utilizado cumple con la única función de proteger el charco de soldadura y en algunos casos de estabilizar el arco eléctrico.

El proceso *GMAW* tiene la flexibilidad de poder adaptarse para realizar la transferencia de metal por tres métodos distintos, como es mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 2. 9.

**1).- Transferencia por espray:** pequeñas gotas de fluido de metal del electrodo se transfieren a la zona de soldadura a una velocidad de varios cientos de gotas por segundo, este tipo de transferencia es libre de salpicaduras y muy estable, éste método puede ser utilizado en todas las posiciones y el gas de protección utilizado es argón mezclado (9).

**2).- Transferencia globular:** pequeños glóbulos impulsados por la fuerza de la transferencia de arco eléctrico en el metal lo que resulta en considerable salpicaduras.

Para este método son utilizadas corrientes de soldadura elevadas y es posible una mayor penetración con mayor velocidad en proceso de soldadura, comparada con las conseguidas en transferencia por espray y comúnmente es aplicado para unir secciones pesadas; se utiliza dióxido de carbono como gas de protección y estabilizador del arco eléctrico (10).



**3).- Corto circuito:** pequeñas gotas individuales (más de 50 por segundo) son formadas en el momento en que el electrodo genera el arco, fundiendo el metal y creando un charco de soldadura. Éste método utiliza gases ricos en dióxido de carbono y electrodos de alambre con diámetro pequeño (11).

Las temperaturas que se generan en el proceso *GMAW* son relativamente bajas, en consecuencia, este método es adecuado sólo para lámina delgada, es decir, menos de 6 mm (0.25 pulgadas) de espesor, de lo contrario el riesgo de producir fusión incompleta es alto, siendo un proceso fácil de operar y es muy utilizado para unir metales ferrosos. El sistema de arco pulsado en secciones finas tiene la capacidad de ser utilizado tanto para metales ferrosos como no ferrosos (7).

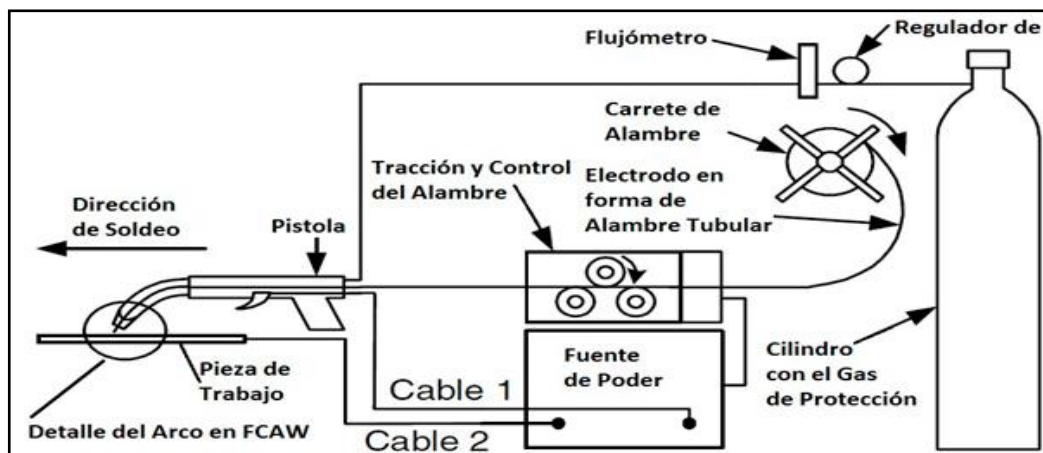


Figura 2. 9 Ilustración de equipamiento básico utilizado en proceso GMAW (7).

## **2. 6 ESCÁNER 3D PARA MEDICIÓN DE DISTORSIÓN**

Un escáner 3D es el equipo mediante el cual se capturan imágenes a detalle con el fin de ser digitalizadas, y a través de la cual se examinará por comparación. Este proceso se lleva a cabo determinando un conjunto de puntos superficiales a los que se refiere como nube de puntos.

La nube de puntos es el indicador de referencias sobre las dimensiones y formas de la pieza, con la finalidad de establecer posiciones de referencia que permita examinar por comparación de coordenadas la geometría de superficies de objetos.

Para comprender cómo opera un equipo de este tipo, es necesario visualizarlo como un sistema de coordenadas en un espacio esférico tomando como origen al propio escáner 3D, donde cada punto analizado se asocia con coordenadas  $(x, y)$  y a la vez con una distancia que será el componente  $r$ , de esta forma se establecen coordenadas tridimensionales de cada punto sobre la superficie del modelo.

Los escáneres 3D han sido categorizados en dos ramas en función de cómo se realiza la toma de datos sobre la superficie, es decir, si ésta se realiza a través de contacto y la otra es donde no requiere tener contacto sobre la superficie, éstos últimos se dividen a su vez en dos categorías que son escáner activos y pasivos (12).

### **2.6.1 Escáner 3D de contacto**

Realizan la examinación del objeto apoyando sobre la superficie el elemento señalador o palpador, que consta de una punta de acero duro o zafiro con el

cual se indica cada uno de los puntos que formarán la nube de puntos, y a su vez una serie de sensores internos determinan las coordenadas de cada punto señalado (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) (13).

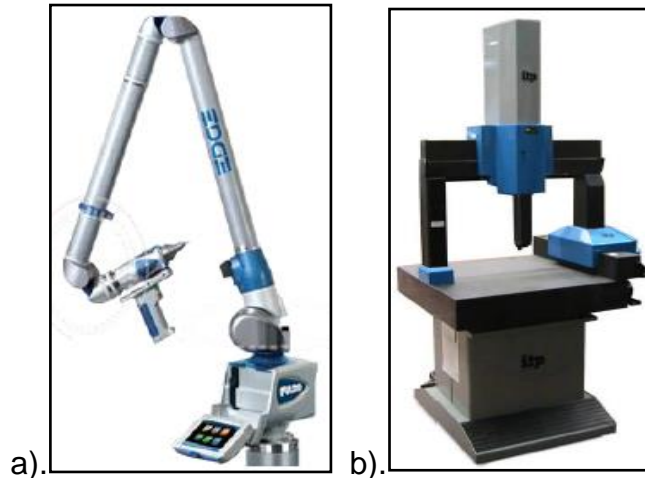


Figura 2. 10 Ejemplos de escáner de contacto,  
a). Ilustración de equipo FARO ScanARM, b). Ilustración de equipo CMM ITP Viscount Bridge (13).

Un ejemplo de un escáner 3D de contacto es un equipo CMM (Máquina de medición por coordenadas por sus siglas en inglés) destacando que una de sus desventajas es que requiere el contacto físico con el objeto, lo cual resulta un proceso lento sobre superficies con forma compleja (13).

### 2.6.2 Escáner 3D sin contacto denominado como activos

El grupo de escáner 3D sin contacto está ubicado en la categoría de activos, es decir, aquellos equipos que emiten algún tipo de señal a través de la cual examinan la superficie del objeto. Existen cuatro clases:

a).- **Escáner 3D de captación por haz láser:** basa la captura de datos en la triangulación de posición de un objeto, es decir, utilizando un láser dirigido al objeto a digitalizar y posteriormente ser capturado por un sensor encargado de medir la luz reflejada desde el objeto mediante triangulación trigonométrica, lo cual es procesado internamente por el equipo obteniendo como resultado una compleja y densa nube de puntos. (Ver Figura 2.11)



Figura 2.11 Ilustración de escáner 3D de captación por láser (13).

b).- **Escáner 3D de captación por luz estructurada:** realiza una triangulación trigonométrica proyectando una serie de patrones lineales sobre la superficie del objeto, de esta forma examina los bordes de cada línea de los diferentes patrones, estableciendo así la distancia entre la superficie digitalizada y el escáner, a la vez que genera una nube de puntos (14).

c).- **Escáner 3D time-of-flight por pulsación láser:** en relación a la velocidad en la que viaja un haz de láser es analizado el rebote de éste, estableciendo con ello una nube de puntos que describe las características de la forma del objeto.

**d).- Escáner 3D time-of-flight por cambio de fase:** utiliza el principio de medir la velocidad de rebote del haz de luz. Para mejorar la precisión, el haz de luz puede ser modulado en su intensidad de disparo y al ser recibido por el sensor también compara la variación de fase en el láser que retorna (13).

### **2.6.3 Escáner 3D sin contacto denominado como pasivos**

Los escáneres pasivos no emiten señales de ningún tipo, estos equipos detectan la radiación reflejada del ambiente sobre la superficie del objeto examinado. Los equipos de esta categoría detectan la luz visible, dado ésta radiación está en el ambiente. Cabe mencionar que en la actualidad los métodos pasivos son los más económicos disponibles en el mercado ya que no necesitan hardware particular (13).

**Escáner Estereoscópico:** los equipos de escaneo estereoscópicos utilizan el principio de fotogrametría, es decir, utiliza la medida de paralaje entre imágenes para determinar la distancia de cada pixel en la imagen examinada. Generalmente son dos cámaras levemente separadas, analizando la misma superficie simultáneamente, donde las diferencias entre las imágenes capturadas determinan la referencia dimensional sobre las formas de la superficie analizada (14).

**Escáner por análisis de Silueta:** estos equipos generan bosquejos a partir de una secuencia fotográfica sobre un objeto tridimensional a través de un fondo de contraste bien definido.

Las imágenes capturadas se convierten en siluetas, las cuales son ensambladas cruzando los puntos colindantes para formar una aproximación

visual del objeto. Cabe mencionar que éste método es el más inexacto, ya que omite gran cantidad de detalles presentes en una superficie.

**Modelado basado en imagen:** basados en la fotogrametría resultan ser semejantes a los equipos estereoscópicos, con la particularidad de que las fotos se toman desde un objeto dentro de un espacio tridimensional, a través del cual se modela una imagen con detalles de la superficie del objeto analizado. Este método depende mucho de la habilidad del usuario al establecer la imagen de análisis (12) (14).

## **2.7 MÉTODOS PARA MEDIR DISTORSIÓN**

La medición de distorsión es un proceso comparativo a partir del cual se logra cuantificar magnitud y dirección sobre aquellos desplazamientos presentes en dos estados distintos del mismo objeto, para tal comparación se requiere un patrón de puntos que establezcan referencia de cambio sobre éste (15).

### **2.7.1 Reconstrucción y Modelado**

Una nube de puntos es una retícula generada sobre la superficie del objeto de manera digital a través de un escáner *3D* y utilizando modelos como malla poligonal, modelo de superficies *NURBS*, o modelo sólido *CAD*, logrando convertir dicha retícula en una imagen digital, siendo entonces este proceso conocido como reconstrucción y modelado (15) (16).

**Modelos de malla de polígonos:** la retícula generada a partir de la nube de puntos es modelo generado a partir de unir aquellos puntos adyacentes mediante líneas rectas con el propósito de generar una superficie continua, teniendo una combinación de polígonos enlazados entre sí, a partir de esto se establecen las características que posee una superficie (17) (14). (Ver Figura 2.12)

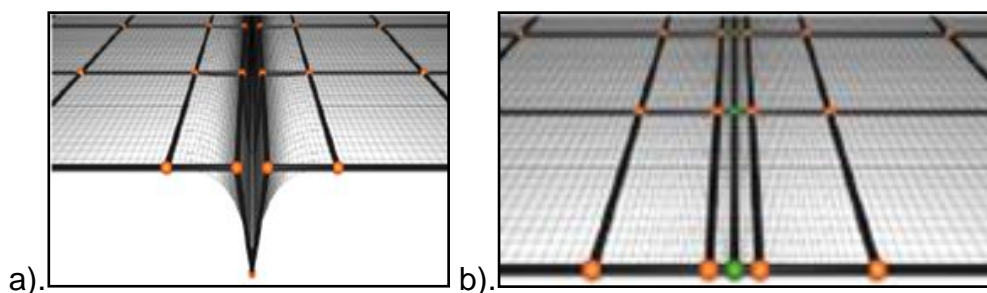


Figura 2.12 a).Esquema de la malla de polígonos después de aplicar procesos de soldadura, b). Esquema de la malla de polígonos antes de aplicar procesos de soldadura (14).

La reconstrucción de superficies digitales mediante éste método, regularmente presenta el inconveniente de generar archivos de datos muy grandes, por lo tanto, relativamente difíciles de editar (15).

Los archivos de datos bajo el modelo de malla de polígonos pueden ser editados mediante aplicaciones como: *Meshlab*, *Cyclone*, *Kubit*, *Pointcloud*, *JRC-3D Reconstructor*, *Photomodeler*, *Imagemodele*, *Polyworks*, *Rapidform*, *Geomagic*, *Imageware*, *Rhino*.

**Modelo de superficies:** esta técnica de modelación utiliza un conjunto de pequeñas curvas unidas que adquieren las características superficiales del objeto analizado, creando datos de tales curvas bajo código *NURBS*, el resultado es un modelo basado en una esfera matemática (12) (14) (18).

La principal ventaja de este modelado es la creación de datos relativamente ligeros y sencillos de editar aun siendo geométricas complejas con aplicaciones como *Rapidform*, *Geomagic*, *Rhino*, *Maya*, *T-Splines*.

**Modelos sólidos CAD:** este modelado se basa en una retícula esférica elástica sobre la cual se ajustan los puntos que describen la superficie del objeto, este modelado también proporciona "*intención del diseño*" donde más allá de la forma por sí sola señala características del objeto analizado como orificios concéntricos incluidos dentro de la pieza, siendo este modelado sencillo de editar con aplicaciones como *Geomagic*, *Imageware*, *Rhino*, *Rapidform* (17).

### **2.7.2 Establecer sólidos a partir de mallas de polígonos**

Posterior a la etapa de reconstrucción y modelado de nube de puntos, se presenta la construcción de sólidos digitales, es decir, que de la malla de polígonos generada se pretende establecer caras en cada uno de los planos de la malla y así generar una reconstrucción digital del objeto escaneado.

Para esto es necesario exportar el archivo de mallado con extensión *.stl* a algún software como "*Geomagic*, *Imageware*, *Rhino* o *Rapidform*" para convertir los datos a un sólido digital sobre el cual se establecerá finalmente la medición de deformación generada (18) (19).

Una vez establecido el archivo con los datos adquiridos dentro del software existen 6 pasos a realizar para establecer un sólido a partir de una malla digital, dichos pasos son (18):

- 1.- Agrupamiento por regiones
- 2.- Establecer un cuerpo principal que abarque toda la malla



- 3.- Recortar aquellas secciones que no pertenezcan a la malla
- 4.- Establecer con precisión la forma del cuerpo apegado al mallado
- 5.- Reconstrucción de bordes
- 6.- Análisis de distorsión

Establecido lo anterior es posible obtener un traslape de sólidos digitales y a través de estos determinar la distorsión generada con las magnitudes precisas y las direcciones en las que se presentan los desplazamientos que producen la deformación del objeto (19).

## CAPÍTULO 3 ESTADO DEL ARTE

En la búsqueda de bibliografía en el análisis de técnicas para establecer dirección y magnitud sobre deformaciones generadas en placas unidas por soldadura, se encontró que las investigaciones establecían como simular la distorsión de manera matemática y bajo software basando dicha simulación en la entrada de calor por efecto del proceso de soldadura, así como de las características físicas y química del metal base.

### 3.1 PREDICCIÓN Y SIMULACIÓN DE DISTORSIÓN

En el año 2013, *Robert Ngendang Lidam* y colaboradores publicaron una investigación titulada “*Angular distortion analysis of the multipass welding process on combined joint types using thermo-elastic-plastic FEM with experimental validation*”, en donde mostraron un análisis de distorsión angular inducida por la soldadura por GMAW en uniones *a tope* y juntas en *T*, sobre

placas con un espesor de 9 mm y utilizando el software *SysWeld* para desarrollar y comparar dicho análisis empleando el modelo de elementos finitos (*FEA*), basado en el enfoque elástico-plástico térmico con acero de bajo carbono al manganeso, como se muestra en la Figura 3.1 (20).

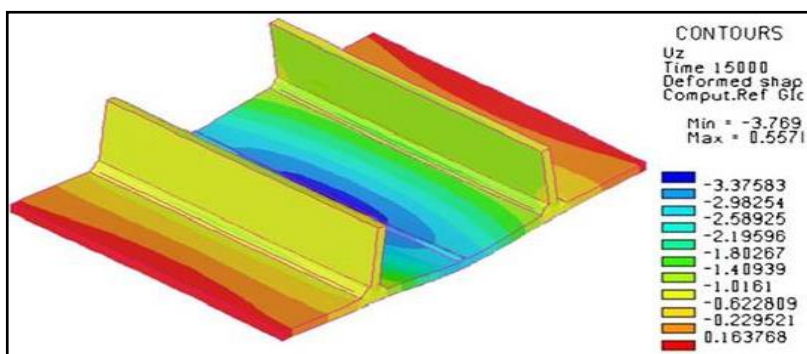


Figura 3.1 Relación de desplazamiento resultante a partir de imagen de escáner 3D posterior a la soldadura (20).

En el año 2014, *C.M. Davies, J. Ahn, M. Tsunori, D. Dye y K.M. Nikbin* publicaron un artículo titulado “*The Influence of Pre-existing Deformation on GMA Welding Distortion in Thin Steel Plates*”, donde se analiza la influencia de la deformación pre-existente sobre la distorsión generada al unir placas delgadas por GMAW, a través de un modelo de elementos finitos establecen la presencia de deformaciones pre-existentes antes de la deformación final (21).

En el año 2015, *Donghong Wang, Bo He, Shumei Liu, Changhui Liu y Li Fei* en el artículo titulado “*Dimensional shrinkage prediction based on displacement field in investment casting*”, muestran un análisis de la deformación que se presenta en un molde de inyección a través de un modelo numérico y un escáner láser 3D, comparando la distorsión obtenida contra lo establecido en el

modelo matemático y es así como lograron demostrar la predicción en la contracción de la pieza, ver Figura 3.2 (22).

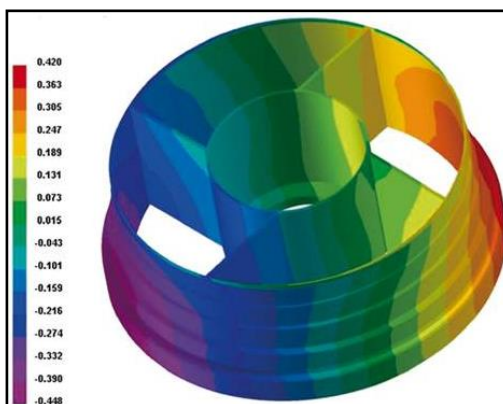


Figura 3.2 Relación de distorsión generada en una pieza fabricada por un molde de inyección (22).

El año 2016, *Gao Lin, Lin Pang, Zhiqiang Hu y Yong Zhang* publicaron un artículo titulado “*Improving accuracy and efficiency of stress analysis using scaled boundary finite elements*”, mostrando un análisis de tensión por medio del modelo de elementos finitos basándose en mallados poligonales y nubes de puntos, los cuales son adquiridos a través de un equipo de escaneo demostrando en su investigación cómo se desplaza la tensión a través de un objeto (ver Figura 3. 3) (23).

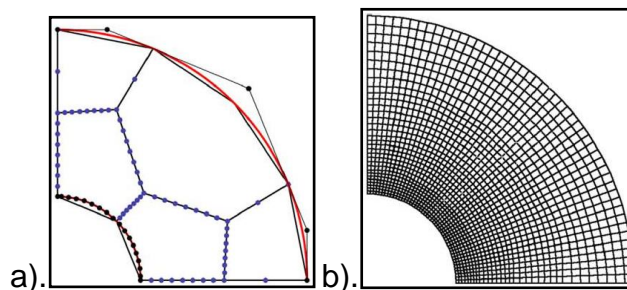


Figura 3. 3 Comparación de mallados en los cuales se realiza el estudio, a). Ilustración de mallado a partir de imagen escaneada, b). Ilustración de mallado a partir de *FEM* (23).

### 3.2 DISTORSIÓN ASOCIADA A LA ENTRADA DE CALOR

Respecto a la distorsión en relación a la entrada de calor por efecto del proceso de soldadura, así como los tipos de distorsiones presentes asociadas a esta variable, se encontró que en el año 2014 *Xiuyang Fang & Jianxun Zhang* en su publicación “*Effect of underfill defects on distortion and tensile properties of Ti-2 Al-1.5 Mn welded joint by pulsed laser beam welding*”, establecen el efecto de distorsión a través de placas delgada de *Ti-2 Al-1.5 Mn* unidas por láser pulsado a través de distintas potencias y velocidades de avance, en donde muestran el efecto que se tiene en el relleno de la unión así como en la distorsión longitudinal y angular sobre dichas placas (24).

En el año 2014, *You-Chul Kim, Mikihiro Hirohata, Masaki Murakami & Koutarou Inose* en su publicación titulada “*Effects of heat input ratio of laser-arc hybrid welding on welding distortion and residual stress*”, demuestran cómo conocer la distorsión y tensión residual a través de un modelo numérico, realizando variación en el calor de entrada de un proceso de soldadura híbrido-láser sobre placas de acero SM490, obteniendo una predicción de la distorsión angular sobre dicha placa (25).

En el año 2015, *Ninshu Ma & Jiangchao Wang y Yasuhisa Okumoto* en la publicación “*Out-of-plane welding distortion prediction and mitigation in stiffened welded structures*”, muestran una investigación acerca de la distorsión que se presenta en la fabricación de estructuras reforzadas en relación a la predicción y mitigación de contracciones transversales y longitudinales, estableciendo en el estudio que matemáticamente es posible predecir sólo bajo ciertas condiciones la distorsión generada tras un proceso de soldadura considerando un método de enderezado por flama (26).

El año 2014, *You-Chul Kim*<sup>1</sup>, *Mikihito Hirohata* y *Koutarou Inose* en el artículo titulado “*Verification of Possibility for Controlling Welding Distortion Generated by Laser-Arc Hybrid Welding*”, presentan la forma en la que predicen la distorsión por soldadura y la tensión residual generada por soldadura híbrida láser, siendo este análisis realizado por un método de elementos finitos basado en la entrada de calor dual de dicho proceso de soldadura, mostrando una comparación de los resultados a través de mediciones avanzadas de distorsión contra la predicción del modelo de elementos finitos (27).

El año 2016, *M.N. IIman*, *Kusmono a*, *M.R.Muslihb*, *N. Subeki a*, *H.Wibowoa* en el documento titulado “*Mitigating distortion and residual stress by static thermal tensioning to improve fatigue crack growth performance of MIG AA5083 welds*”, presentan una investigación utilizando el tensado térmico elástico para mejorar el comportamiento de fatiga en aluminio AA-5083, logrando reducir la distorsión longitudinal presentando mejora en la tasa de crecimiento a la fractura (1).

### **3.3 COMPARACIÓN DE DISTORSIÓN A TRAVÉS DE TÉCNICAS DIGITALES**

Durante esta búsqueda de bibliografía se encontró que las investigaciones establecían comparaciones de medición de distorsión a través de equipos de escaneo con imágenes digitalizadas a manera de validar métodos que predicen la deformación generada tras un proceso de soldadura.

El artículo publicado el año 2011 bajo la autoría de *Mahyar Asadi* , *John A. Goldak* titulado “*Combinatorial optimization of weld sequence by using a surrogate model to mitigate a weld distortion*”, muestran un modelo matemático

para llegar a la secuencia óptima de posibles sub-pasos de una soldadura en función de reducir la distorsión generada durante las secuencias del proceso, utilizando para este análisis un equipo de escaneo 3D sobre el proceso con el cual genera una nube de puntos para posteriormente obtener una imagen CAD, y a través de este análisis establecen una secuencia de pasos de soldadura que compensa la distorsión al aplicar cordones secuenciados entre sí, en la unión radial de dos segmentos de tubería, como se muestra en la Figura 3. 4 (6).

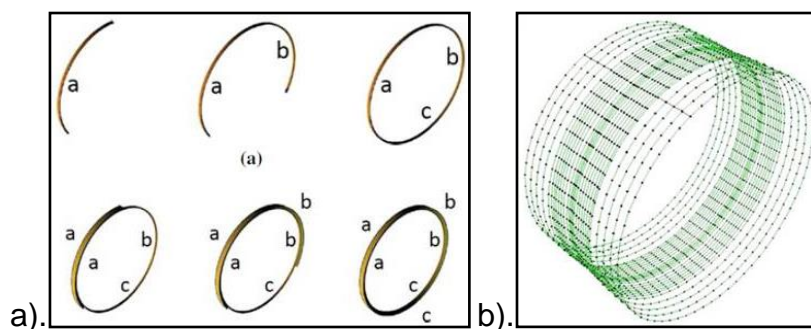


Figura 3. 4 a). Ilustración de secuencia de soldaduras para controlar la distorsión,  
b). Ilustración de mallado a través del cual se estableció la secuencia de soldadura (6)

En el año 2014 *Mato Peric, Zdenko Tonkovic, Alan Rodic, Martin Surjak, Ivica Garašić, Ivanka Boras, Srec'ko Švaic* en el artículo titulado “*Numerical analysis and experimental investigation of welding residual stresses and distortions in a T- joint fillet weld*”, muestran mediante un modelo de elementos finitos la simulación del proceso de soldadura estableciendo la magnitud de la deformación, para lo cual son establecidas dos partes principales: análisis térmico y análisis mecánico de esfuerzo.

Este experimento considera el análisis térmico como una función del tiempo para cada punto de integración, donde la relación temperatura-tiempo es

utilizada como dato de entrada, estableciendo que la solución térmica puede ser secuencial o totalmente aunada a la solución mecánica de la estructura, mostrando como análisis de esfuerzo térmico un análisis numérico 3D, dando como recomendación utilizar condiciones de simetría estableciendo que en definiciones complejas del flujo de calor se sustituyan por un flujo uniforme, es decir, que las condiciones térmicas de borde se simplifican teniendo que el coeficiente de convección y el coeficiente de radiación sean tomados como constantes (28).

En el año 2014, *Teodor Tóth y Jozef Zivcák* presentan un artículo titulado “*A Comparison of the Outputs of 3D Scanners*” mostrando una comparación de mallas de polígonos, adquiridas a través de dos equipos de escaneo diferentes y se comparan contra imágenes CAD, así establecen una comparación de imágenes adquiridas a través del equipo de la marca *CREAFORM* modelo *EXAscan* contra el explorador óptico *GOM ATOS* (29).

En el año 2016 *Gianfranco Genta, Paolo Minetola y Giulio Barbato* en el artículo titulado “*Calibration procedure for a laser triangulation scanner with uncertainty evaluation*” muestran cómo es la triangulación de un escáner 3D, tomando como referencia un equipo de medición CMM, demostrando algunas fallas que pueden presentarse al utilizar equipos láser para escanear (30).

### **3.4 TÉCNICAS PARA LA INSPECCIÓN DE DISTORSIÓN**

En la búsqueda bibliográfica existen propuestas para optimizar la tarea de digitalizar superficies y lograr obtener mejores resultados, encontrando publicaciones de algunos artículos que establecen diversas técnicas a través de distintos métodos como es el caso del documento publicado el año 2013 por los



investigadores: *Pierre Hugues Allard, Jérôme Alexandre Lavoie* con el título “*Differentiation of 3D scanners and their positioning method when applied to pipeline integrity*”, en el cual se muestra cómo realizar una elección de escáner adecuada en conjunto con métodos para establecer una plantilla de targets y la técnica de inspección para digitalizar superficies con una adquisición de datos adecuada, como se muestra en la Figura 3. 5 (14).



Figura 3. 5 Ilustración de escaneo mediante luz estructurada sobre superficie de geometría compleja (14).

El año 2013 *Tomohiro Mizoguchi, Satoshi Kanai, Hiroaki Date y Hiroyuki Tanaka* en el artículo titulado “*Robust and Exhaustive Method for Symmetry Detection from Scanned Meshes*”, muestran nuevos métodos para reparar los ruidos generados sobre el mallado desde la adquisición de nubes de puntos, demostrando que las distorsiones o deformaciones de la superficie de los objetos no se modifican al aplicar el método propuesto (31).

En el año 2015 *Valentina Campanelli, Stephen M. Howell y Maury L. Hull* en su publicación “*Accuracy evaluation of a lower-cost and four higher-cost laser scanners*” evalúan el escáner nombrado *NextEngine de bajo costo*, contra equipos de las empresas *NIKON, LDI, CREAFORM y NDI*, comparando

imágenes adquiridas a través de estos equipos, mostrando resultados que demuestran que la resolución en los equipos de bajo costo pueden competir contra equipos de costo elevado (32).

El año 2016 *Tian Qingguo, Zhang Xiangyu y Ma Qian Ge Baozhen* en su artículo titulado “*Utilizing polygon segmentation technique to extract and optimize light stripe centerline in line-structured laser 3D scanner*”, en el cual muestran un método para realizar contorno de polígonos optimizando puntos sobre la nube 3D y modelos de superficies reconstruidas, demuestran que el método propuesto logra generar superficies 3D más completas y más suaves de los objetos (33).

El año 2016 *Wolfgang Thaller, Ursula Augsdörfer y Dieter W. Fellner* en el artículo titulado “*Procedural mesh features applied to subdivision surfaces using graph grammars*”, muestran una técnica de mallado que logra optimizar la superficie sin omitir detalles importantes de ésta, a través de un método llamado “*Graph-Grammar*” demuestran que métodos diferentes incorporan ruido durante el escaneo que afecta el mallado y la calidad de la imagen (34).

# CAPITULO 4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

## 4.1 PUNTOS INVARIANTES Y PLANTILLA DE TARGETS

Para establecer cómo elegir los puntos invariantes en el objeto que se analizará, se consideraron regiones de la superficie lejanas de la zona afectada por el calor (ZAC, por sus siglas en español) de la unión soldada, dado que estos puntos serán las referencias para establecer magnitud y dirección de la deformación sobre el sólido digital.

Para establecer una técnica digital para la medición de la distorsión que sea adecuada para el objetivo del presente proyecto, se analizaron artículos como *“Differentiation of 3D scanners and their positioning method when applied to pipeline integrity”* (14), *“Procedural mesh features applied to subdivision surfaces using graph grammars”* (34), y *“Calibration procedure for a laser triangulation scanner with uncertainty evaluation”* (30), en los cuáles se

describen métodos y técnicas para generar imágenes sin ruidos ocasionados por el ambiente, también se explica la separación de etiquetas de referencia (conocidas como *targets*) en una plantilla, así como la relación que existe entre ésta y el láser para adquirir datos de manera adecuada.

## 4.2 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE ESCANEO

Los parámetros de escaneo como la velocidad de obturador, intensidad del láser y resolución de escaneo se proponen a partir de las dimensiones y geometría que se analizarán, teniendo a partir de estos parámetros una nube de puntos o malla de polígonos a través de la cual se establecerá la medición de distorsión, siendo artículos como “*Combinatorial optimization of weld sequence by using a surrogate model to mitigate a weld distortion*” (6), “*Accuracy evaluation of a lower-cost and four higher-cost laser scanners*” (32) y “*Utilizing polygon segmentation technique to extract and optimize light stripe centerline in line-structured laser 3D scanner*” (33), en los que son mostradas algunas técnicas para establecer sólidos a partir de mallas de polígonos o nubes de puntos obtenidas con escáner láser 3D.

# **CAPITULO 5 CASO DE ESTUDIO**

Tomando como meta establecer la magnitud y dirección de las deformaciones generadas en placas tras la unión por soldadura, utilizando técnicas de medición avanzada mediante escáner 3D para ejecutar el procedimiento sobre un sólido digitalizado, se muestra la forma detallada del proceso que lleva a establecer la distorsión de manera cuantitativa.

## **5.1 ETAPA DE AJUSTE PARA ESCANEEO**

Para la etapa de escaneo es importante verificar qué comportamiento presenta tanto el emisor como el receptor de láser del equipo, con la finalidad de establecer la intensidad del láser y la frecuencia de obturador adecuados para adquisición de datos sobre la superficie de la pieza que se quiere analizar.

Una correcta adquisición de datos de la superficie analizada también depende de establecer adecuadamente que no existan zonas de la superficie con brillo parcial o constante, ya que, al ser reflejada la emisión del láser el

equipo no podrá establecer la forma del objeto, es decir, no logra realizar la adquisición de datos de la zona, para este caso, será necesario neutralizar el brillo con pintura de acabado mate o polvo que se adhiera a la pieza y elimine el reflejo, como se muestra en la Figura 5.1 Ilustración donde se ejemplifica cómo se neutraliza el brillo superficial con polvo revelador para llevar a cabo un escaneo con equipo láser portátil Figura 5.1.



Figura 5.1 Ilustración donde se ejemplifica cómo se neutraliza el brillo superficial con polvo revelador para llevar a cabo un escaneo con equipo láser portátil.

Durante la etapa de escaneo es necesario establecer adecuadamente tres aspectos importantes para lograr una adquisición precisa de la geometría de la superficie, siendo estos aspectos la resolución de escaneo, diseño de plantilla de referencias y establecer los puntos invariantes de la pieza.

Durante la adquisición de información de la superficie de la pieza en la etapa de escaneo, es importante establecer los medios adecuados bajo los cuales el equipo es capaz de captar las características relevantes sobre la geometría del objeto y a través de esta información establecer con exactitud aquella magnitud

y dirección que presenta la deformación de la pieza, siendo por esta razón importante establecer adecuadamente el valor de resolución para el escaneo, el diseño de plantilla de referencias y los puntos invariantes de la pieza.

### 5.1.1 Punto Invariante

La medición de distorsión a través de la metodología que este documento propone, requiere realizar el escaneo en dos etapas secuenciales, siendo la primera de ellas donde se adquiere una imagen digital ideal de la geometría del objeto y la segunda en la que se obtiene una digitalización posterior a la deformación del mismo, para lo cual es de suma importancia establecer referencias sobre la geometría durante la primer etapa del escaneo, y con esto no alterar la posición de escaneo durante la segunda etapa y finalmente lograr un adecuado traslape de las imágenes.

Siendo las referencias mencionadas anteriormente conocidas como “*puntos invariantes*” de la pieza, la elección de estos puntos es realizada bajo el concepto de establecer zonas o secciones del objeto con mínima o preferentemente, nula alteración geométrica sobre la forma original, ya que servirán como referencia para realizar la medición de deformación generada del objeto.

Para una efectiva elección de los puntos invariantes es recomendable analizar los siguientes aspectos:

a).- Los puntos invariantes deberán ser como mínimo dos, estos se establecerán preferentemente en ubicaciones dentro de la geometría lejanas a la ZAC generada por el proceso de soldadura.

b).- Pueden presentarse geometrías en las que existan ciertas simetrías entre sus caras generando confusión al rotarse, es decir, una placa rectangular presenta dos lados cortos, dos lados largos y dos caras iguales, al rotar esta geometría  $180^\circ$  se puede perder la perspectiva de la cara que se está analizando; En casos semejantes a este ejemplo, se recomienda formar marcas permanentes como puntos invariantes del objeto de acuerdo a lo señalado en el inciso anterior (Inciso a).

c).- Sobre geometrías que no repiten simetría entre sus lados o caras, y se puede establecer que no cabe lugar a confusión para reconocer la sección que se observa al girarse, se recomienda de igual forma establecer puntos invariantes de acuerdo al *inciso (a)*, dado que éstos serán la referencia en las imágenes al comparar los sólidos digitales.

d).- En casos donde los puntos invariantes establecidos sufren modificaciones durante la deformación del objeto alterando la referencia de comparación entre las imágenes digitales, se recomienda indicar como referencia el centro del objeto o como opción una de las esquinas, de esta forma será posible llegar a cuantificar la magnitud de la deformación pero no será posible establecer con precisión la dirección que toma durante la distorsión.

### **5.1.2 Plantilla de marcas de referencia**

Las marcas de referencia (*targets*) son objetivos en los que el equipo de escaneo genera referencia para establecer profundidad, inclinación y cambios de sección sobre la misma superficie como es el caso de las esquinas, siendo estos targets un apoyo para establecer con precisión las características de la



geometría del objeto analizado, teniendo que estos son comercializados con distintos mecanismos de fijación para mejorar el proceso de diseño de plantilla sobre una superficie y con esto lograr una adquisición de datos adecuada (13) (14).

La plantilla de marcas de referencia o *targets*, se recomienda establecer tomando en cuenta cinco aspectos generales, los cuales son descritos a continuación.

- 1.) La cantidad de *targets* que conforman la plantilla estará en relación a la complejidad de la geometría que presente la superficie del objeto, siendo las zonas con cambios de formas o profundidades donde la población de *targets* deberá aumentar.
- 2.) El escáner requiere encontrar como mínimo 4 *targets* en forma simultánea para adquirir datos, siendo aquellas zonas que no cumplan esta condición, donde mostrará espacios vacíos dentro de la imagen digital a consecuencia de la falta de adquisición de datos.
- 3.) El escáner reconoce elementos con arreglos triangulares, por lo tanto, el diseño de la plantilla deberá realizarse en geometrías de triángulos entre los elementos, tomando en cuenta que si el equipo detecta múltiples objetivos simultáneamente en línea recta, el equipo no generará adquisición de datos, así mismo la posición entre los *targets* dentro de la plantilla, deberán tener arreglos asimétricos, esto último para evitar interpretaciones digitales incorrectas de la superficie.
- 4.) La distancia entre los *targets* dentro de una plantilla no deberá exceder de 12.70 cm (5.00 in), considerando también que dicha separación no deberá ser menor a 1.20 cm (0.50 in), para con esto permitir al equipo realizar una adecuada adquisición de datos.

5.) Los targets requieren un mínimo de 2.00 cm (0.75 in) de superficie a su alrededor, en casos de esquinas o cambios de sección estos deberán ser posicionados cuidando esta condición, de lo contrario podría existir pérdidas en la adquisición de datos en estas zonas (14). (Ver Figura 5.2)

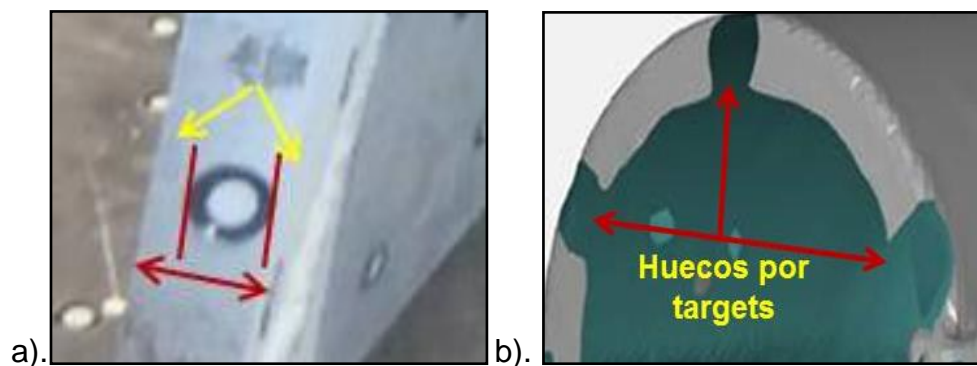


Figura 5.2 a). Ilustración de ubicación de targets incorrecta, b). Ilustración de huecos en la imagen digital causada por ubicación incorrecta de *targets*.

La plantilla de *targets* es el soporte para dar referencia al equipo de escaneo durante la adquisición de datos, cabe aclarar que esta plantilla puede extenderse a superficies colindantes al objeto escaneado, es decir, puede extenderse sobre una mesa o sobre el piso en el cual se encuentra la pieza de estudio, esto se puede tomar en cuenta para casos donde las piezas de estudio son muy pequeñas o la geometría de éstas no permiten establecer una plantilla adecuada sobre su superficie.

Cuando una plantilla de *targets* se ha completado adecuadamente, es recomendable considerar tres situaciones:

a). Una plantilla establecida con 100 *targets* o más, es considerada compleja, por esto es recomendable realizar adquisición de puntos antes de generar

adquisición de datos de la superficie, estableciendo la referencia desde la parte central a los extremos, de esta manera el equipo adquiere con mayor precisión los datos de la superficie.

Para realizar la adquisición de puntos a través de *VXelements 5.0*, sobre la plantilla deberá desplegar las opciones que ofrece el botón de *escáner* de la barra de herramientas, seleccionar *adquirir puntos* y a través del escáner realizar la adquisición de puntos (13). (Ver Figura 5.3)

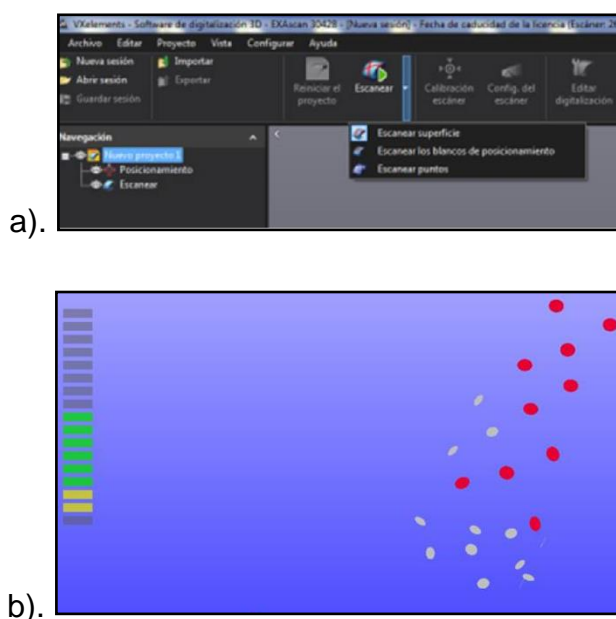


Figura 5.3 a). Ilustración de barra herramientas de software *VXelements 5.0*, donde se ubica el botón de escaneado, b). Ilustración de la adquisición de referencia sobre la plantilla de *targets* a través de software *VXelements 5.0*.

b). Una vez establecidos los puntos de la plantilla dentro de la imagen digital en el proceso de escaneo, es importante no tener pérdida de *targets* en la plantilla física para garantizar una adquisición de datos correcta, en caso de remover un *target* de la plantilla, se corre el riesgo de perder la capacidad de

adquisición de datos de esas zonas, cabe mencionar que es posible retirar o cambiar de posición algunos *targets* de la plantilla siempre que estas modificaciones se realicen de manera medida y así el equipo pueda establecer una referencia coherente de la superficie del objeto.

c). La plantilla de *targets* establecida para realizar el escaneo puede auxiliarse de extensiones de la misma, como apoyo sobre zonas con geometría compleja, es decir, que durante el escaneo se puede aumentar el tamaño de la plantilla inicial tanto como sea necesario, lo cual no genera complicaciones en la imagen adquirida, aunque es importante aclarar que estos incrementos deberán permanecer fijos a la plantilla original hasta concluir la adquisición de datos, de lo contrario podría generar errores de referencia sobre la imagen digital(Ver Figura 5.4-*b*) (14).

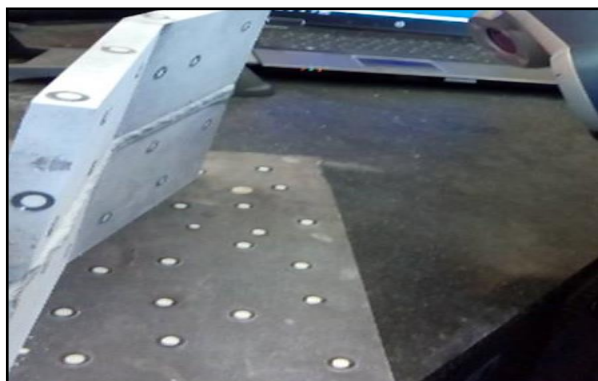


Figura 5.4 Ilustración de la aplicación de una plantilla de targets extendida.

Durante la adquisición de datos en el escaneo, pueden aparecer señales de pérdida de referencia en dos modalidades diferentes, siendo una de ellas la aparición de puntos azules los cuales señalan discordancia entre la referencia establecida y la ubicación actual de los *targets* en la zona señalada, otra

modalidad es la aparición de puntos rojos, los que indican falta de información para triangular la referencia; Para los dos casos en los que se señala pérdida de referencia, el equipo interrumpe la adquisición de datos permitiendo resolver la situación y así no alterar la imagen digitalizada, tal como se muestra en la Figura 5. 5 (13).

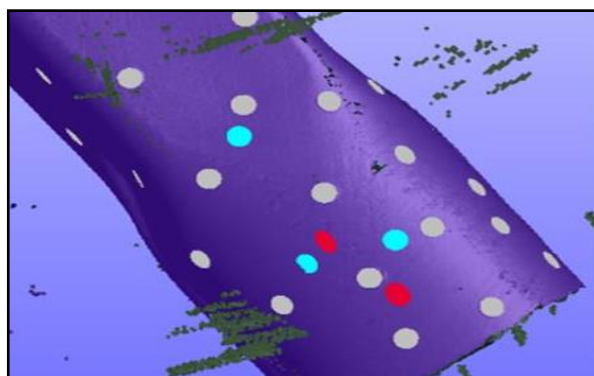


Figura 5. 5 Ilustración de señalización de software ante la pérdida de referencia durante la adquisición de datos, mostrando con puntos rojos una sección en la que falta información para triangular la referencia y con puntos azules la sección donde existe discordancia entre la referencia inicial y la final.

### 5.1.3 Resolución de Escaneo

La resolución de escaneo es una escala en la que se establece la cantidad de puntos que representaran a la superficie escaneada sobre un área determinada, es decir, el equipo establece una malla de puntos basada en la imagen adquirida durante el escaneo, donde los puntos estarán fijados a una distancia constante entre sí, y dicha separación corresponderá al valor de resolución seleccionado.

La resolución dentro de un escaneo tiene una relación directa con el tamaño del objeto que se quiere analizar, así como las dimensiones de aquellas características de la superficie que denotan relevancia al momento de establecer magnitud y dirección de deformación, es decir, que una resolución óptima será aquella en la que los detalles sobre la superficie excedan 2.5 veces como mínimo el valor de resolución elegido para el escaneo, como se esquematiza en la Figura 5.6 (14).

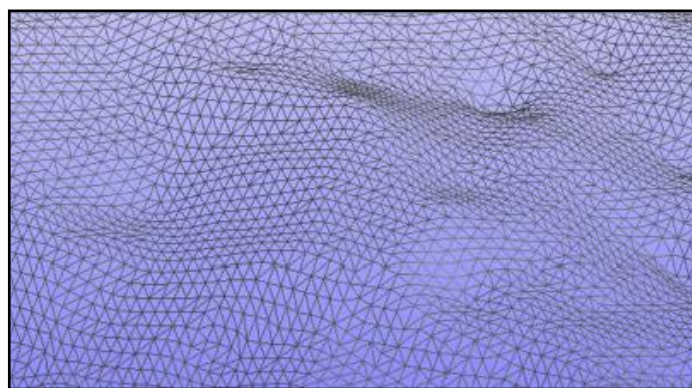


Figura 5.6 Esquema de la malla de puntos que se define con el valor de resolución (14).

La resolución en los equipos de escaneo es un valor fijado en milímetros, teniendo un rango de amplitud de resolución entre 0.20 mm y 5.00 mm, donde una resolución baja es aquella con valores entre 2.00 mm y 5.00 mm, y una resolución alta toma valores entre 0.20 mm y 1.00 mm. Los valores de resolución establecidos entre 1.00 mm y 2.00 mm se conocen como resolución intermedia.

## 5.2 PRUEBAS PRELIMINARES

Para establecer adecuadamente los aspectos sobre los cuales se realizará el escaneo de probetas, en donde se medirá la distorsión para este documento, se ha considerado realizar una serie de ejercicios que ayuden a establecer el diseño de plantilla de *targets* y resolución de escáner, los cuales son explicados a continuación.

### 5.2.1 Punto Invariante

Este proyecto contempla realizar la medición de distorsión sobre placa de acero *AISI-1018* con dimensiones de 100.00 mm x 300.00 mm con un espesor de 15.80 mm, teniendo un diseño de unión con bisel de 20° sobre el canto de 300.00 mm y unidas mediante el proceso de soldadura *GMAW* robotizado.

Estableciendo como puntos invariantes sobre las probetas las esquinas externas no biseladas en los lados de 300.00 mm de la placa, éstas esquinas fueron marcadas con 2 muescas antes de iniciar el proceso. (Ver Figura 5.7)

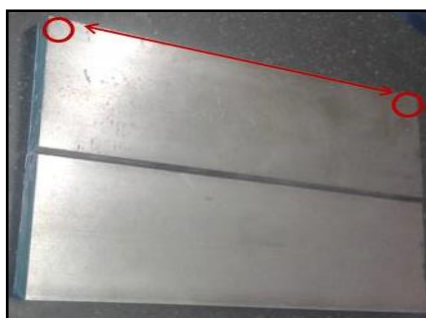


Figura 5.7 Ilustración de geometría de placas de acero AISI-1018 con ubicación de puntos invariantes representados por círculos rojos.

Se elige esta ubicación para los puntos invariantes ya que estas zonas son las más lejanas a la entrada de calor causada por el proceso de soldadura y considerando que éstas esquinas no serán afectadas por la deformación durante la distorsión.

### **5.2.2 Plantilla de *Targets***

Para establecer la plantilla de *targets* se realizó inicialmente una serie de 3 escaneos sobre placas de geometría rectangular con cara plana, estableciendo sobre cada una de estas plantillas de *targets* con distintas separaciones entre elementos, como se indica a continuación:

1).- Se estableció una plantilla de *targets* con secciones prolongadas en las cuales los elementos mantuvieron una proximidad igual o inferior a 2.00 cm (0.75 in), presentándose una falla de adquisición de datos causando una serie de interrupciones continuas durante el escaneo de esta zona, siendo ocasionado por una saturación de elementos de referencia.

2).- Se estableció una plantilla de *targets* con secciones prolongadas donde los elementos mantuvieron de forma constante una separación mayor a 11.00 cm (4.50 in), presentándose una falla donde el equipo interrumpió la adquisición de datos por falta de elementos de referencia.

3).- Se estableció una plantilla de *targets* con separaciones aleatorias entre 3.50 y 9.5 cm (1.375 y 3.750 in) generando mejor adquisición de datos durante el escaneo, es decir, se obtuvieron imágenes digitales con mayor eficiencia.

Posteriormente, se realizó un ejercicio en el cual la plantilla de *targets* fue establecida sobre una superficie con geometría compleja, es decir, que ésta



superficie presenta cambio en: profundidad, superficies de planas a cilíndricas y bordes con esquinas angulares. (Ver Figura 5.8)



Figura 5.8 Ilustración de plantilla de *targets* sobre superficie con geometría compleja.

Con la finalidad de encontrar un diseño de plantilla de *targets* para zonas reducidas con geometría compleja, el cual mantenga una referencia estable durante la adquisición de datos, fue llevado a cabo un ejercicio como se describe a continuación:

a).- Se colocaron *targets* sobre el canto o borde del material, así como en las caras externa e interna de la pieza, sosteniendo un rango de separación aleatoria entre los elementos de 5.00 a 9.50 cm (2.00 a 3.75 in) consistente en toda la plantilla (Ver Figura 5.9-a).

b).- Se colocaron los *targets* de la plantilla considerando únicamente la cara externa e interna de la pieza, sosteniendo un rango de separación aleatoria entre los elementos de 5.00 a 9.50 cm (2.00 a 3.75 in) consistente en toda la plantilla (Ver Figura 5.9-b).

c).- Se colocan los *targets* únicamente sobre la cara externa del objeto y apoyando el escaneo con una plantilla alterna montada en el piso de la pieza, sosteniendo un rango de separación aleatoria entre los elementos de 5.00 a 9.50 cm (2.00 a 3.75 in) consistente en toda la plantilla (Ver Figura 5.9-c).

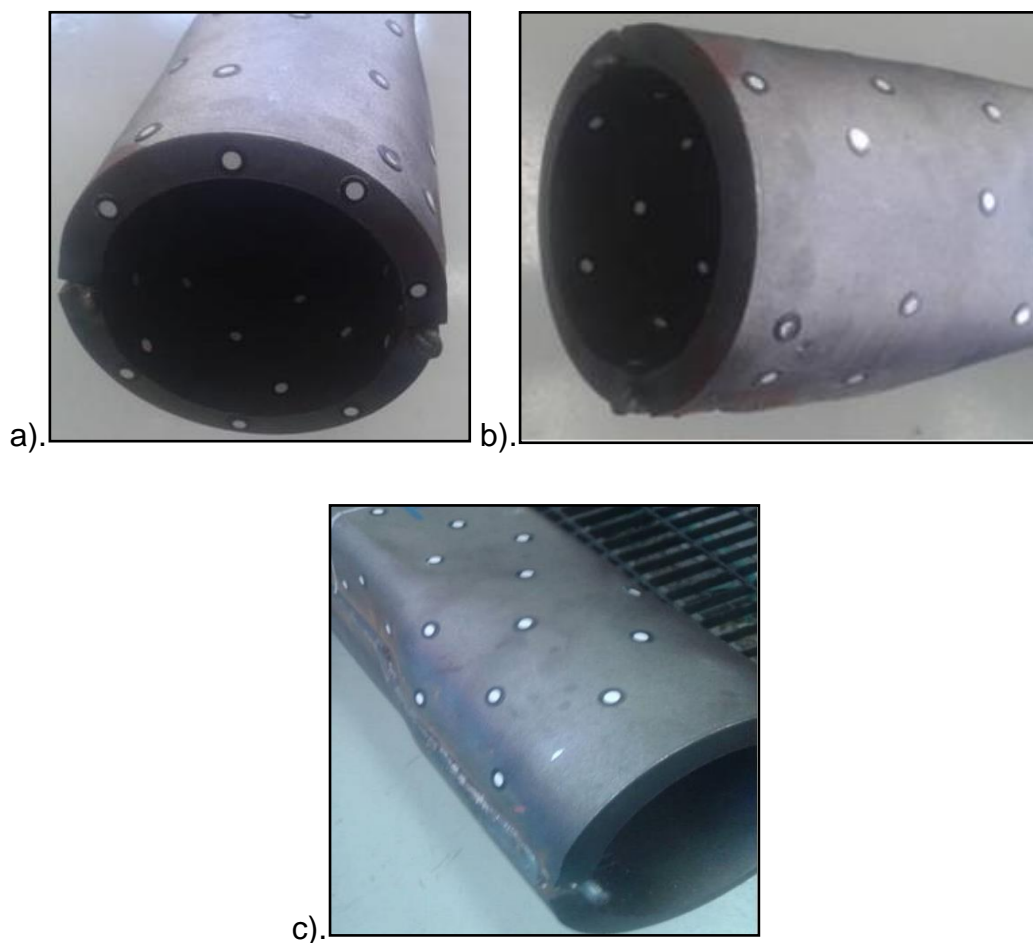


Figura 5.9 Ilustraciones de las plantillas de *targets* con elementos en diversas secciones:  
a). Ilustración de plantilla de *targets* con elementos sobre el canto, cara exterior e interior,  
b). Ilustración de plantilla de *targets* con elementos sobre cara exterior e interior,  
c). Ilustración de plantilla de *targets* colocados únicamente sobre cara exterior.

### 5.2.3 Resolución de Escáner

En cuanto a la resolución de escaneo, se realizó una serie de pruebas con la finalidad de establecer las diferencias entre los resultados a través de escaneos con valores de resolución distintos y sobre una misma plantilla de *targets* colocada sobre una superficie con geometría compleja, la cual se menciona en este documento como pieza patrón.

Los escaneos mencionados anteriormente se realizaron de la siguiente manera:

a).- Para cada evento fue asignado un valor de resolución, siendo cronometrado el escaneo, dado que el equipo regula la cantidad de datos adquiridos de la superficie y a su vez la velocidad de adquisición de datos se da en diferente velocidad.

b).- Para cada uno de los escaneos se adquiere una imagen digital con distintas características, siendo comparables en tamaño de archivo generado en Mega Bytes (*MB*, por sus siglas en inglés) y también por las características de imagen generada.

c).- Los valores de resolución seleccionados durante el ejercicio de escaneo fueron los siguientes: 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm, 1.00 mm, 1.25 mm, 1.50 mm, 2.00 mm, 2.50 mm (Ver Tabla 5.1).

La ejecución del ejercicio arrojó los siguientes valores:

Tabla 5.1 Valores generados al variar la resolución en el escaneo

VALOR DE RESOLUCIÓN	TAMAÑO DE ARCHIVO	TIEMPO DE EJECUCIÓN
0.25 mm	121.5 MB	98.0 min.
0.50 mm	29.30 MB	34.0 min.
0.75 mm	14.40 MB	17.0 min.
1.00 mm	8.900 MB	11.5 min.
1.25 mm	5.800 MB	9.00 min.
1.50 mm	4.000 MB	6.50 min.
2.00 mm	2.600 MB	5.00 min.
2.50 mm	1.500 MB	4.00 min.

### 5.3 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DIGITAL 3D

La técnica digital para la medición de distorsión establecida en este documento es aplicada sobre una probeta de acero *AISI-1018* en dos casos distintos, con la finalidad de establecer magnitud y dirección en los desplazamientos geométricos presentes en cada caso, como se explica a continuación:

#### 5.3.1 Aplicación de técnica, Caso I

Se realiza escaneo sobre una probeta de acero *AISI-1018* antes y después del proceso de soldadura, utilizando un valor de resolución de 0.75 mm y una plantilla de *targets* con separación entre elementos de 3.50 a 9.50 cm (1.375 a 3.750 in) aleatoriamente, tal como se ilustra en la Figura 5. 10.

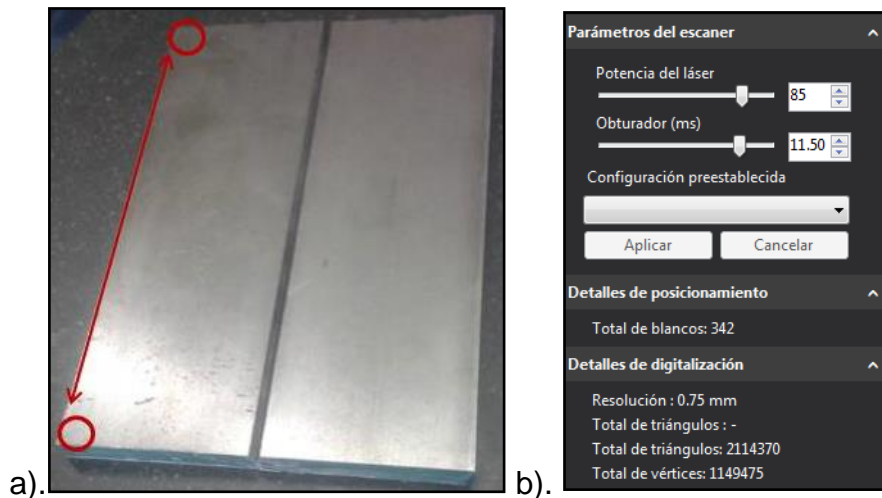


Figura 5. 10 a). Ilustración de probeta de acero AISI-1018 utilizada en ejecución de la técnica para caso I, b). Parámetros de ajuste o *SET-UP* utilizados en secuencias de escaneo durante ejecución de caso I.

### 5.3.2 Aplicación de técnica, Caso II

Se realizan escaneos sobre cada una de las secciones de la probeta de acero *AISI-1018* antes y después del proceso de soldadura, aplicando un valor de resolución de 0.75 mm sobre la sección derecha y un valor de resolución de 0.25 mm sobre la sección izquierda, utilizando una plantilla de targets con separación entre elementos de 3.50 a 9.5 cm (1.375 a 3.750 in) aleatoriamente, con la finalidad de establecer la medición de distorsión sobre uniones entre mallados con distintos valores de resolución, como se indica en la Figura 5.11.

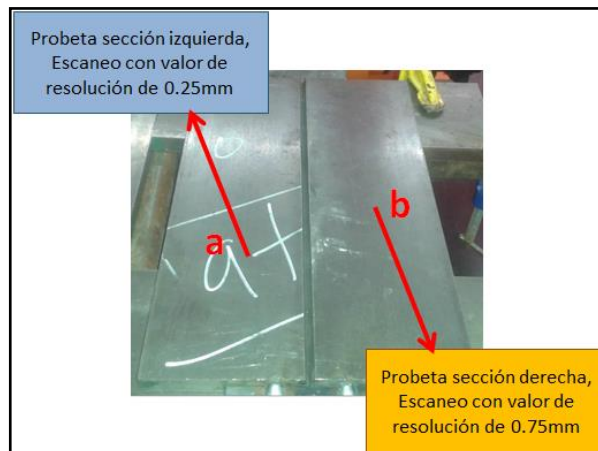


Figura 5.11 Ilustración de las secciones *a* y *b* de la probeta de acero *AISI-1018* utilizadas en la ejecución de la técnica para caso II.

## 5.4 MATERIAL Y EQUIPO UTILIZADO PARA EL PROYECTO

En este apartado se realiza una descripción de materiales, equipos y softwares utilizados para la elaboración de este proyecto, así como sus características particulares.

Las probetas empleadas para pruebas preliminares fueron diseñadas de acero *AISI-1018* con una geometría rectangular plana de 100.00 x 300.00 x 15.80 mm (Ver Tabla 5.2 y Figura 5.12).

Tabla 5.2 Composición química y propiedades mecánicas de acero *AISI-1018* (8).

<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA ACERO AISI-1018</b>			
<b>C (%)</b>	<b>Mn (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>S (%)</b>
0.15 - 0.20	0.60 - 0.90	0.04	0.05
<b>PROPIEDADES MECÁNICAS</b>			
<b>RESISTENCIA MECÁNICA</b>		<b>RESISTENCIA A LA CEDENCIA</b>	
58,000 PSI		31,900 PSI	
<b>ELONGACIÓN (%)</b>		<b>DUREZA (HBN)</b>	
25		116	

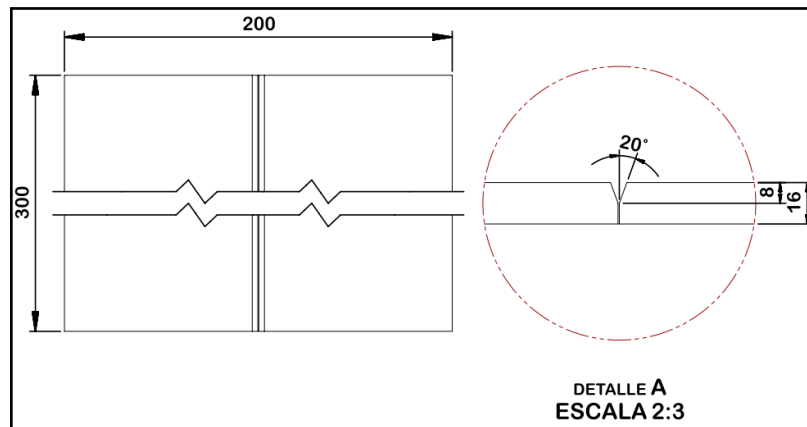


Figura 5.12 Esquema del ensamble de probeta con bisel a 20°.

La funda de eje trasero sobre la cual se realizan las pruebas finales, fue fabricada con placa de acero *AISI-1520* de 16.00 mm de espesor, los demás detalles no se pueden divulgar por la confidencialidad del diseño.

El escáner empleado es un equipo fabricado por la empresa canadiense *CREAFORM*, siendo el equipo un modelo *EXAscan-30428*, el cual se clasifica como escáner de no contacto y emplea la técnica de triangulación, este equipo opera a través del software *VXelements* versión 5.0 SR1build-1886, siendo este último sobre el cual se manipula la adquisición de datos generada por el escáner. (Ver Tabla 5.3 y Figura 5.13)

Tabla 5.3 Características de escáner modelo *EXAscan-30428* (13) (35).

Clase de láser	Profundidad de campo	Exactitud máxima
Tipo II (seguro para los ojos)	30cm (12in)	0.0016in (40 micras)

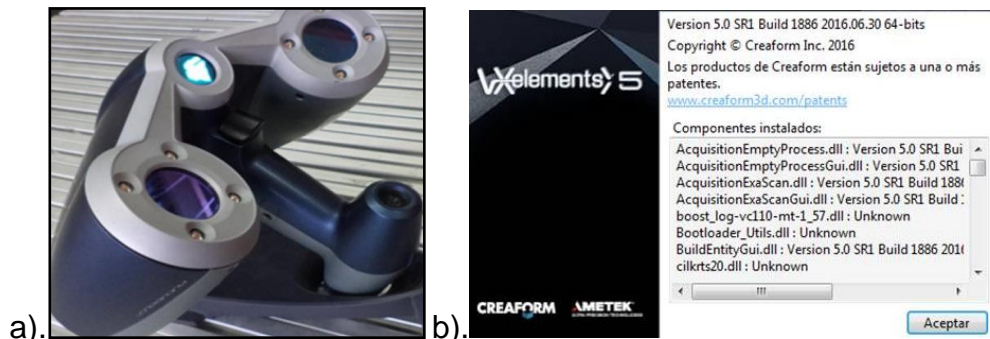


Figura 5.13 a). Ilustración de equipo de escaneo de la marca *EXAscán* modelo: 30428 (13) (35),  
b). Ilustración de características de software *VXelements 5.0*.

La herramienta utilizada para la comparación preliminar entre imágenes obtenidas a través del escáner es el software *GOMinspect* versión 7.2-0 *Rev.40731-build2010-10-20*, este realiza comparaciones digitales sobreponiendo imágenes *STL* sobre *CAD*, así el software representa la discordancia geométrica a través de una escala de colores como se muestra en la Figura 5.14.

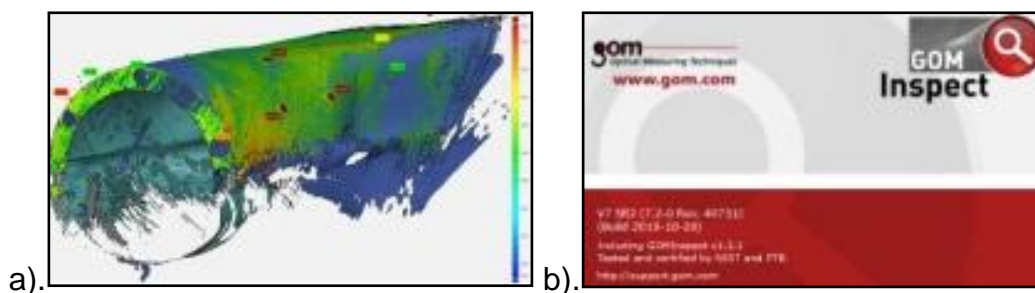


Figura 5.14 a). Ilustración de imágenes comparadas a través de software *GOMinspect*,  
b). Ilustración de las referencias del software *GOMinspect* (36).

El equipo de cómputo utilizado para operar el escáner y las imágenes obtenidas es marca *DELL* Modelo *T7500* con 6 *GB* de memoria *RAM* y Sistema de 64 *bits*.



El polvo en aerosol utilizado para eliminar el reflejo del láser sobre la superficie se denomina *SKD-S* y tiene la característica de adherirse parcialmente, una vez aplicado no presenta elementos flamables, este polvo es utilizado como revelador visual en pruebas de ensayos no destructivos. (Ver Figura 5.15)

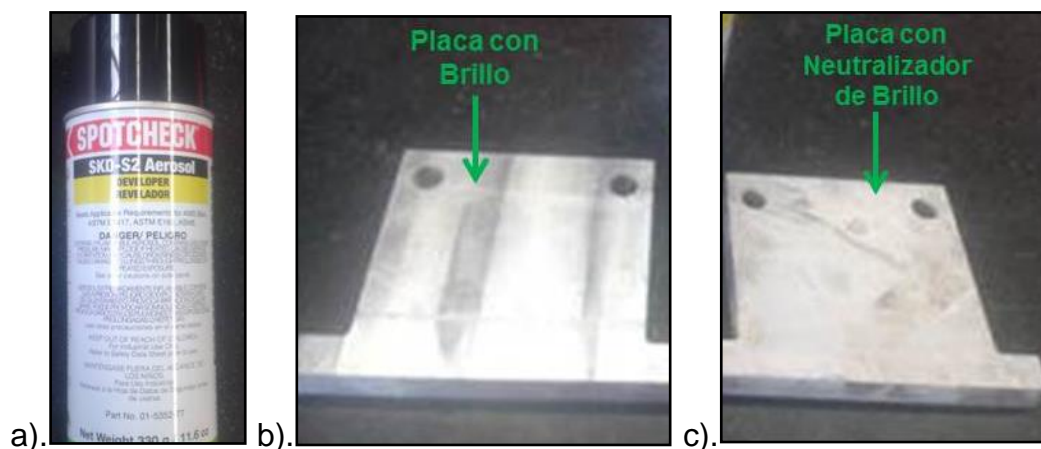


Figura 5.15 a). Ilustración de polvo revelador utilizado para eliminar brillo de la superficie escaneada,  
b). Ilustración de placa con brillo superficial antes de aplicar polvo revelador,  
c). Ilustración de eliminación de brillo superficial al aplicar polvo revelador sobre placa

Los *targets* utilizados para realizar la plantilla son fabricados por la marca CREAFORM, de código ACC-H3D-PTBCM los cuales cuentan con fijación por magnetismo, como se ilustra en la Figura 5.16.

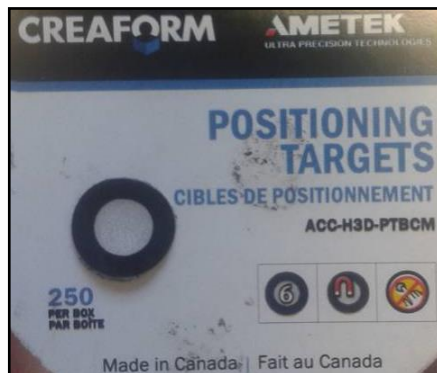


Figura 5.16 Ilustración comercial de etiquetas de posicionamiento utilizadas para el proyecto.

# **CAPITULO 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de las pruebas preliminares y del proceso de cuantificar la deformación generada tras realizar la unión de gran longitud sobre placas de espesor grueso unidas por *GMAW*.

## **6.1 RESULTADOS DE PRUEBAS PRELIMINARES**

En este apartado se hace referencia a las pruebas preliminares realizadas para relacionar algún comportamiento del equipo de escaneo, el software que este utiliza para manipular las imágenes y la superficie del material en circunstancias diversas.

### 6.1.1 Resultados al establecer punto invariante

Se realizó escaneo sobre una probeta de acero *AISI-1018* antes y después de someterse al proceso de soldadura *GMAW*. Obteniendo que los puntos invariantes requieren ser establecidos en secciones lejanas a la zona de unión y estas ubicaciones no sean cruzadas por la trayectoria del proceso de soldadura, de lo contrario, no será posible establecer el empate de las mallas de polígonos para establecer la medición.

### 6.1.2 Resultados al establecer plantilla de *targets*

Se establece que en esquinas o en secciones delgadas se requiere una plantilla de *targets* alterna con ubicación sobre secciones colindantes a dicha área en conflicto, de esta manera, es posible establecer una mejor referencia, realizándolo de igual manera sobre secciones de tamaño reducido donde los *targets* no cuentan con espacio suficiente para establecer una adecuada referencia, comprobando en esta etapa que cada *target* requiere como mínimo 2.0 cm de superficie colindante al contorno, de lo contrario, la imagen adquirida presentará huecos, es decir, la malla de polígonos presentará faltantes de datos entre algunos de sus vértices (Ver Figura 6.1).

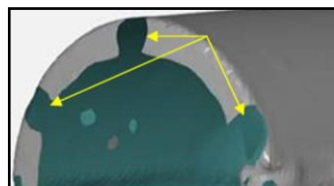


Figura 6.1 Ilustración donde se señalan huecos en la imagen por falta de superficie alrededor de los *targets*.

Respecto a la plantilla de *targets* con mejores resultados durante la adquisición de datos, fue la establecida con separación aleatoria de elementos (*targets*) entre 5.50 a 10.00 cm (2.00 a 4.00 in).

### 6.1.3 Resultados al establecer resolución de escaneo

Durante los ejercicios de escaneo realizados para establecer con qué valor se lograba adquirir una imagen que representara adecuadamente la superficie escaneada con un tamaño de archivo manipulable, se encontraron los siguientes resultados:

Tabla 6.1 Resultados de ejercicio realizado para proponer valor de resolución adecuado

<b>VALOR DE RESOLUCIÓN</b>	<b>TAMAÑO DE ARCHIVO</b>	<b>TIEMPO DE EJECUCIÓN</b>
<b>0.50 mm</b>	<b>29.30 MB</b>	<b>34 min</b>
<b>0.75 mm</b>	<b>14.40 MB</b>	<b>17 min</b>
<b>1.00 mm</b>	<b>8.90 MB</b>	<b>11.5 min</b>

De los valores mostrados en la Tabla 6.1, puede apreciarse que una resolución de 0.50 mm generó un tamaño de archivo considerablemente más pesado que los otros dos valores de resolución, mientras que una resolución de 1.00 mm se concluyó en 11.50 minutos, siendo este tiempo relativamente cercano a una resolución de 0.75 mm. Considerando lo anterior, se estableció que la resolución adecuada para realizar este proyecto será de 0.75 mm. Estableciendo una imagen como se muestra en la Figura 6.2.

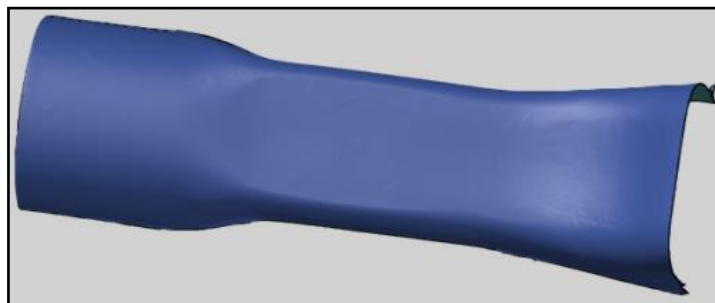


Figura 6.2 Ilustración de imagen adquirida con 0.75 mm de resolución.

## 6.2. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DIGITAL 3D

Se aplicó la técnica digital 3D para cuantificar magnitud y dirección en las deformaciones ocurridas sobre probetas de acero *AISI-1018* después del proceso de soldadura *GMAW* empleando dos casos distintos.

### 6.2.1 Resultados de aplicar técnica sobre Caso I:

Aplicación de la técnica sobre una probeta de acero *AISI-1018* antes y después del proceso de soldadura con un valor de resolución de 0.75mm, obteniendo de esta secuencia de escaneos archivos con un peso de 752 MB aproximadamente, generando mallas de polígonos con 1, 149,475 vértices, requiriendo un tiempo de ejecución de 37 minutos para la aplicación de la metodología en este caso.

Al traslapar las mallas de polígonos con configuraciones geométricas antes y después del proceso de soldadura, se estableció con precisión las diferencias geométricas generadas durante la unión de dichas placas, indicando de forma

puntual la magnitud y dirección de los desplazamientos ocurridos a través de un patrón de colores con escala de valores mediante el software *GOMinspect 7.2*, demostrando así las discordancias entre las imágenes de forma ilustrativa y cuantitativa como se muestra en la Figura 6.3.

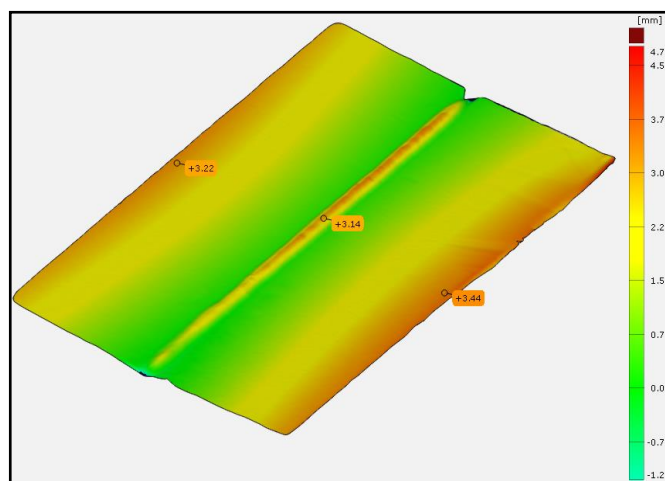


Figura 6.3 Ilustración de evaluación de la distorsión.

En la Figura 6.3 se demuestra de forma cuantificada los desplazamientos ocurridos durante el proceso de soldadura, visualizando en tonos naranja la sección central donde la unión por soldadura presenta una elevación a causa del cordón de soldadura que se presenta como desplazamiento de elevación con una magnitud de 3.14 mm y de la misma manera se muestra en los extremos externos de la probeta, desplazamientos de elevación con magnitudes de 3.22 mm en el lado izquierdo y 3.44 mm en el lado derecho respecto a la geometría original, siendo esto a causa de los esfuerzos residuales generados durante el enfriamiento de la soldadura, lo cual no presenta el mismo comportamiento en la ZAC, la cual es mostrada en tonalidades verdes, indicado este color para las secciones coincidentes o sin discordancia geométrica entre

las mallas de polígonos, es decir, estas son secciones no deformadas o con valores de desplazamiento cercanos a cero.

## 6.2.2 Resultados de aplicar técnica sobre Caso II:

El acoplamiento de dos mallas de polígonos con valores de resolución de 0.75 mm y 0.25 mm respectivamente, se realiza a través del software *VXelemnts* versión 5.0 donde este requirió establecer un valor intermedio entre 0.75 mm y 0.25 mm, resultando para este caso la elección de 0.30 mm, tal como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

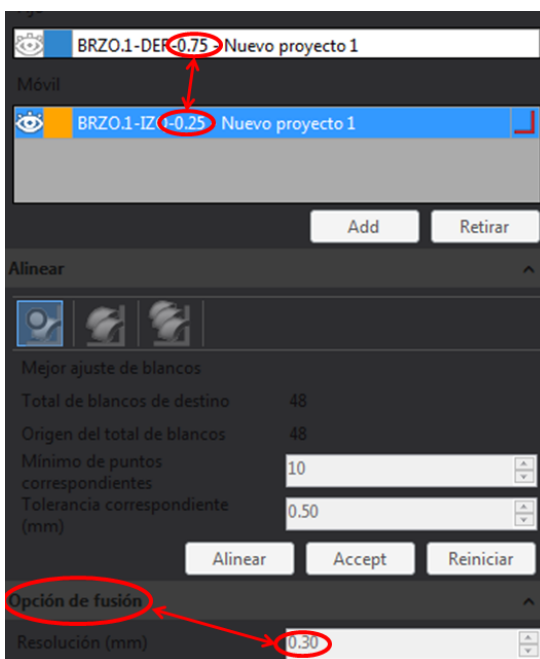


Figura 6.4 Ilustración de recuadro de opciones de software *VXelemnts* versión 5.0 para generar acoplamiento de mallados con distintos valores de resolución.



En la Figura 6.5-a se muestra cómo se identifica la diferencia de rugosidades mediante diferentes tonalidades para cada uno de los valores de resolución a través de dicho software, donde se establece una tonalidad azul para el valor de resolución de 0.25 mm y tonalidad amarilla para el valor de 0.75 mm, indicando que con valores de resolución pequeños (0.25 mm) es posible adquirir mayor cantidad de características de la superficie, mientras que con valores de resolución elevados (0.75 mm) no es posible adquirir con precisión los detalles de la superficie analizada.

En la Figura 6.5-b se muestra el acabado superficial final después de realizar el acoplamiento de los datos contenidos en cada malla de polígonos, estableciendo un nuevo mallado con separación entre vértices de 0.30 mm como se muestra en la Figura 6.5-b.

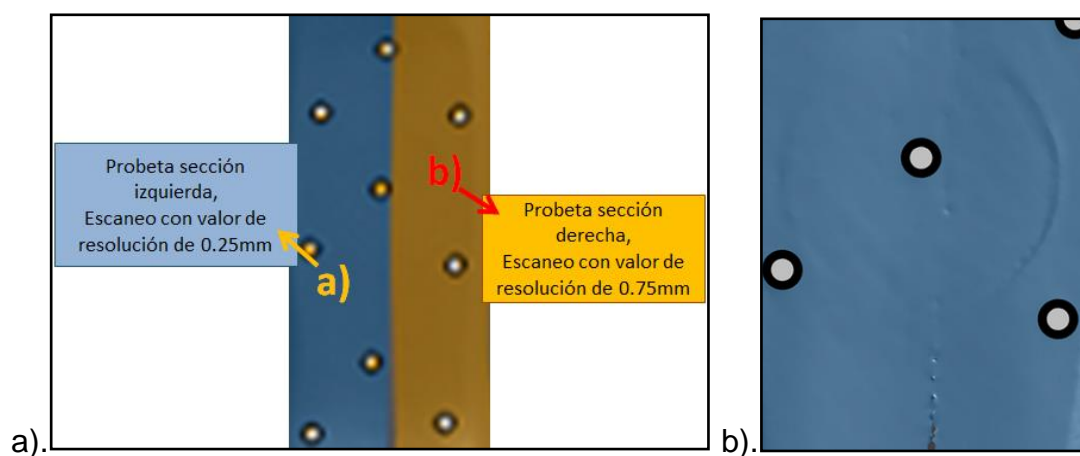


Figura 6.5 a). Ilustración de acoplamiento de mallados con distintos valores de resolución (*Secciones con valores de resolución de 0.25 y 0.75 mm*), b). Imagen de acoplamiento de mallados con valores de resolución de 0.25 y 0.75 mm respectivamente promediados a 0.30 mm.

# CONCLUSIONES

Es posible cuantificar la magnitud y la dirección de los desplazamientos generados por uniones de placas de gran longitud y de espesor grueso utilizando el proceso de soldadura *GMAW* utilizando la técnica digital *3D* que describe este documento.

Es posible establecer la medición de distorsión digital *3D* sobre mallas de polígonos con diferentes valores de resolución entre ellas al aplicar la metodología descrita en este documento.

A partir de la revisión bibliográfica se concluyó que es importante definir el valor de resolución, puntos invariantes y espaciamiento entre marcas de referencia sobre la superficie analizada. Lo anterior se comprobó en el caso de estudio, donde se pusieron a prueba dichas variables.

La metodología para la medición de distorsión descrita en este documento sirve como referencia para realizar mediciones digitales *3D* sobre los desplazamientos generados en la geometría de ensambles utilizando otros procesos de soldadura distintos a *GMAW*.

# LISTA DE ECUACIONES

$D = L \cdot C_{dil}(\Delta T)$ EC. 1.....	8
--	---

# LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1 TABLA CON VALORES DE FACTOR DE EMPAQUETAMIENTO EN ESTRUCTURAS CS, BCC Y FCC (5).....	9
TABLA 5.1 VALORES GENERADOS AL VARIAR LA RESOLUCIÓN EN EL ESCANEO.....	52
TABLA 5.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACERO <i>AISI-1018</i> (8).....	54
TABLA 5.4 CARACTERÍSTICAS DE ESCÁNER MODELO <i>EXASCAN-30428</i> (13) (35).....	55
TABLA 6.1 RESULTADOS DE EJERCICIO REALIZADO PARA PROPONER VALOR DE RESOLUCIÓN ADECUADO .....	61

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 COMPORTAMIENTO DE DILATACIÓN Y CONTRACCIÓN IMPEDIDA, A). LA DILATACIÓN IMPEDIDA GENERA CAMBIOS VOLUMÉTRICOS PERMANENTES, B).LA CONTRACCIÓN IMPEDIDA ES CAUSA DE FRACTURA POR ESFUERZOS (3).....	7
FIGURA 2.2 GRÁFICA DE LOS CAMBIOS DE VOLUMEN EN RELACIÓN AL CALENTAMIENTO DE UN ACERO ( <i>LINEA ROJA</i> ) CON ENFRIAMIENTO LENTO ( <i>LINEA SEGMENTADA AZUL</i> ) Y EL CASO DE UN ENFRIAMIENTO RÁPIDO ( <i>LINEA CONTINUA AZUL</i> ) (4).....	10
FIGURA 2.3 FENÓMENO DE DISTORSIÓN POR CALENTAMIENTO (7).....	11
FIGURA 2.4 EFECTO DE ESFUERZOS RESIDUALES POR CALENTAMIENTO, .....	11
FIGURA 2.5 A). ILUSTRACIÓN DE GEOMETRÍA DE UNA BARRA ANTES DE APLICAR CORDÓN DE SOLDADURA,.....	12
FIGURA 2.6 CLASIFICACIÓN DE LAS FORMAS BÁSICAS DE DISTORSIONES POR SOLDADURA (7). .....	13
FIGURA 2.7 ILUSTRACIÓN DE MODELO DE TRES BARRAS,.....	15
FIGURA 2. 8 ILUSTRACIÓN DE OPERACIÓN DE PROCESO DE SOLDADURA <i>GMAW</i> (7). .....	15
FIGURA 2. 9 ILUSTRACIÓN DE EQUIPAMIENTO BÁSICO UTILIZADO EN PROCESO <i>GMAW</i> (7).....	17
FIGURA 2. 10 EJEMPLOS DE ESCÁNER DE CONTACTO, .....	19
FIGURA 2.11 ILUSTRACIÓN DE ESCÁNER 3D DE CAPTACIÓN POR LÁSER (13). .....	20
FIGURA 2.12 A).ESQUEMA DE LA MALLA DE POLÍGONOS DESPUÉS DE APLICAR PROCESOS DE SOLDADURA,.....	23
FIGURA 3.1 RELACIÓN DE DESPLAZAMIENTO RESULTANTE A PARTIR DE IMAGEN DE ESCÁNER 3D POSTERIOR A LA SOLDADURA (20). .....	27
FIGURA 3.2 RELACIÓN DE DISTORSIÓN GENERADA EN UNA PIEZA FABRICADA POR UN MOLDE DE INYECCIÓN (22).....	28
FIGURA 3. 3 COMPARACIÓN DE MALLADOS EN LOS CUALES SE REALIZA EL ESTUDIO,.....	28
FIGURA 3. 4 A). ILUSTRACIÓN DE SECUENCIA DE SOLDADURAS PARA CONTROLAR LA DISTORSIÓN, .....	31
FIGURA 3. 5 ILUSTRACIÓN DE ESCANEAMIENTO MEDIANTE LUZ ESTRUCTURADA SOBRE SUPERFICIE DE GEOMETRÍA COMPLEJA (14).....	33

FIGURA 5.1 ILUSTRACIÓN DONDE SE EJEMPLIFICA CÓMO SE NEUTRALIZA EL BRILLO SUPERFICIAL CON POLVO REVELADOR PARA LLEVAR A CABO UN ESCANEADO CON EQUIPO LÁSER PORTÁTIL. ....	38
FIGURA 5.2 A).ILUSTRACIÓN DE UBICACIÓN DE TARGETS INCORRECTA, B). ILUSTRACIÓN DE HUECOS EN LA IMAGEN DIGITAL CAUSADA POR UBICACIÓN INCORRECTA DE <i>TARGETS</i> . ....	42
FIGURA 5.3 A). ILUSTRACIÓN DE BARRA HERRAMIENTAS DE SOFTWARE <i>VXELEMENTS 5.0</i> , DONDE SE UBICA EL BOTÓN DE ESCANEADO, B). ILUSTRACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE REFERENCIA SOBRE LA PLANTILLA DE <i>TARGETS</i> A TRAVÉS DE SOFTWARE <i>VXELEMENTS 5.0</i> . ....	43
FIGURA 5.4 ILUSTRACIÓN DE LA APLICACIÓN DE UNA PLANTILLA DE TARGETS EXTENDIDA. ....	44
FIGURA 5. 5 ILUSTRACIÓN DE SEÑALIZACIÓN DE SOFTWARE ANTE LA PÉRDIDA DE REFERENCIA DURANTE LA ADQUISICIÓN DE DATOS, MOSTRANDO CON PUNTOS ROJOS UNA SECCIÓN EN LA QUE FALTA INFORMACIÓN PARA TRIANGULAR LA REFERENCIA Y CON PUNTOS AZULES LA SECCIÓN DONDE EXISTE DISCORDANCIA ENTRE LA REFERENCIA INICIAL Y LA FINAL. ....	45
FIGURA 5.6 ESQUEMA DE LA MALLA DE PUNTOS QUE SE DEFINE CON EL VALOR DE RESOLUCIÓN (14). .	46
FIGURA 5.7 ILUSTRACIÓN DE GEOMETRÍA DE PLACAS DE ACERO AISI-1018 CON UBICACIÓN DE PUNTOS INVARIANTES REPRESENTADOS POR CÍRCULOS ROJOS.....	47
FIGURA 5.8 ILUSTRACIÓN DE PLANTILLA DE <i>TARGETS</i> SOBRE SUPERFICIE CON GEOMETRÍA COMPLEJA..	49
FIGURA 5.9 ILUSTRACIONES DE LAS PLANTILLAS DE <i>TARGETS</i> CON ELEMENTOS EN DIVERSAS SECCIONES: .....	50
FIGURA 5. 10 A). ILUSTRACIÓN DE PROBETA DE ACERO AISI-1018 UTILIZADA EN EJECUCIÓN DE LA TÉCNICA PARA CASO I,.....	53
FIGURA 5.11 ILUSTRACIÓN DE LAS SECCIONES A Y B DE LA PROBETA DE ACERO <i>AISI-1018</i> UTILIZADAS EN LA EJECUCIÓN DE LA TÉCNICA PARA CASO II.....	54
FIGURA 5.12 ESQUEMA DEL ENSAMBLE DE PROBETA CON BISEL A 20°.....	55
FIGURA 5.13 A). ILUSTRACIÓN DE EQUIPO DE ESCANEADO DE LA MARCA <i>EXASCAN</i> MODELO: 30428 (13) (35),.....	56
FIGURA 5.14 A). ILUSTRACIÓN DE IMÁGENES COMPARADAS A TRAVÉS DE SOFTWARE <i>GOMINSPECT</i> ,....	56
FIGURA 5.15 A). ILUSTRACIÓN DE POLVO REVELADOR UTILIZADO PARA ELIMINAR BRILLO DE LA SUPERFICIE ESCANEADA, .....	57
FIGURA 5.16 ILUSTRACIÓN COMERCIAL DE ETIQUETAS DE POSICIONAMIENTO UTILIZADAS PARA EL PROYECTO.....	58

FIGURA 6.1 ILUSTRACIÓN DONDE SE SEÑALAN HUECOS EN LA IMAGEN POR FALTA DE SUPERFICIE ALREDEDOR DE LOS <i>TARGETS</i> .....	60
FIGURA 6.2 ILUSTRACIÓN DE IMAGEN ADQUIRIDA CON 0.75 MM DE RESOLUCIÓN.....	62
FIGURA 6.3 ILUSTRACIÓN DE EVALUACIÓN DE LA DISTORSIÓN.....	63
FIGURA 6.4 ILUSTRACIÓN DE RECUADRO DE OPCIONES DE SOFTWARE <i>VXELEMNTS</i> VERSIÓN 5.0 PARA GENERAR ACOPLAMIENTO DE MALLADOS CON DISTINTOS VALORES DE RESOLUCIÓN.....	64
FIGURA 6.5 A). ILUSTRACIÓN DE ACOPLAMIENTO DE MALLADOS CON DISTINTOS VALORES DE RESOLUCIÓN ( <i>SECCIONES CON VALORES DE RESOLUCIÓN DE 0.25 Y 0.75 MM</i> ), B). IMAGEN DE ACOPLAMIENTO DE MALLADOS CON VALORES DE RESOLUCIÓN DE 0.25 Y 0.75 MM RESPECTIVAMENTE PROMEDIADOS A 0.30 MM.....	65

# BIBLIOGRAFÍA

1. **Ilman M., Kusmono, Muslih M., Subeki N., Wibowo H.** *Mitigating distortion and residual stress by static thermal tensioning to improve fatigue crack growth performance of MIG AA5083 welds.* Yogyakarta, Indonesia : Elsevier Ltd. All rights reserved., 2016.
2. **Woodhead publishing limited.** *Processes and mechanisms of welding residual stresses and distortion.* Cambridge, England : Woodhead publishing limited and CRC press LLC, 2005.
3. **Kou, S.** *Welding metalurgy, second edition.* Hoboken, New Jersey : John Wiley and sons, Inc. publication., 2003.
4. **Apraiz B.** *Tratamientos térmicos de los aceros.* Madrid, España : Editorial Dossat, S.A., 1984.
5. **Askeland, D.** *Ciencia e ingeniería de los materiales.* Madrid, España : PWP Publishing company, 1998.
6. **Goldak A., Asadi M.** *Combinatorial optimization of weld sequence by using a surrogate model to mitigate a weld distortion.* Heidelberg, Germany : Springer Heidelberg, 2011.
7. **Kalpakjian S., Schmid S. R.** *Manufacturing engineering and technology.* Cucago.Illinois : Pearson prentice hall, 2006.
8. **ASM International.** *Properties and Selection Irons, Steels and High Performance Alloys.* s.l. : ASM International, 2005. p. 181. Vol. 01.



9. **Rowe R., Jeffus L.** *Manual de soldadura GMAW (MIG-MAG)*. Madrid, España. : Paraninfo, 2008. 978-0-8273-7608-3.
10. **American Welding Society.** *Structural Welding Code*. Florida, USA : American Welding Society (AWS), 2004. pp. 5-22. Vol. 19.
11. **American Welding Society, R.L. O'Brien.** *Jefferson's Welding Encyclopedia*. 18. Florida, USA : American Welding Society (AWS), 1997.
12. **Wechsler, H.** *Reliable face recognition methods : system design, implementation and evaluation*. New York, USA : Springer US, 2009.
13. **Quiñones Muñoz M. Q., Morales Estrada C. G.** *Manual de Operación del Escáner Manual EXAscan TM*. Saltillo, Coahuila : Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A de C.V., 2015.
14. **Hugues P., Lavoie J.A.** *Differentiation of 3D scanners and their positioning method when applied to pipeline integrity*. Quebec, Canada : CREAFORM, 2013.
15. **Goldak, A.** *Computational welding mechanics*. Ottawa, Canada : Springer Science Bussines Media Inc., 2005.
16. **Liu S., Wang B., Bremer P. T., Pascucci V.** *Distortion Guided Structure Driven Interactive Exploration of High Dimensional Data*. s.l. : The Eurographics Association and John Wiley & Sons Ltd. Published by John Wiley & Sons Ltd., 2014.
17. **Quan-shi B., Liang J. y Liu Q.** *Adaptive simplification of point cloud using k-means clustering*. Jiaotong, China : Elsevier, 2011.

18. **Tamas V. A., Ralph R. Martin y Jordan Coxt.** *Reverse engineering of geometric models an introduction.* Great Britain : Elsevier Science Ltd, 1996.
19. **Geomagic-Design.** *The Fastest Path from 3D Scans to Your CAD Software.* Morrisville, NC, USA : Geomagic Design, 2013.
20. **Ngendang R., Yupiter H., Haruman M., Redza R., Ridzwan M. R., Sulaiman M.S., Yusof M.Z., Tham G., Sunhaji K., Chan Y. C.** *Angular distortion analysis of the multipass welding process on combined joint types using thermo-elastic-plastic FEM with experimental validation.* Verlag, London : Springer, 2013.
21. **Davies C. M., Ahn J., Tsunori M., Dye D. y Nikbin K. M.** *The Influence of Pre-existing Deformation on GMA Welding Distortion in Thin Steel Plates.* New York, USA : Springer, 2014.
22. **Wang D., Bo H., Liu S., Liu C. y Fe L.** *Dimensional shrinkage prediction based on displacement field in investment casting.* Shanghai, China : Springer-Verlag London, 2015.
23. **Lin G., Lin P., Hu Z. y Zhang Y.** *Improving accuracy and efficiency of stress analysis using scaled boundary finite elements.* China : Elsevier Ltd, 2016.
24. **Zhang, Xiuyang Fang & Jianxun.** *Effect of underfill defects on distortion and tensile properties of Ti-2Al-1.5Mn welded joint by pulsed laser beam welding.* London, England : Springer, 2014.
25. **You-Chul Kim, Mikihiro Hirohata, Masaki Murakami & Koutarou Inose.** *Effects of heat input ratio of laser-arc hybrid welding on welding*

*distortion and residual stress*. Osaka, Japan : Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2013.

26. **Ma N., Wang J. y Okumoto Y.** *Structures, Out-of-plane welding distortion prediction and mitigation in stiffened welded*. London, England : Springer, 2015.

27. **You-Chul Kim, Mikihiro Hirohata y Koutarou Inose.** *Verification of Possibility for Controlling Welding Distortion Generated by Laser-Arc Hybrid Welding*. Osaka, Japan : KOREAN SOC STEEL CONSTRUCTION - KSSC, 2014.

28. **Peric M., Tonkovic Z., Rodic A., Surjak M., Garašić I., Boras I., košvaic S.** *Numerical analysis and experimental investigation of welding residual stresses and distortions in a T-joint fillet weld*. Zagreb, Croatia : Elsevier SCI Ltd, 2014.

29. **Zivčák, Teodor Tóth y Jozef.** *A Comparison of the Outputs of 3D Scanners*. Zadar, Croatia : Elsevier Science BV, 2014.

30. *Calibration procedure for a laser triangulation scanner with uncertainty evaluation.* **Genta G., Minetola P. y Barbato G.** Torino, Italy : Elsevier Ltd, 2016.

31. **Tomohiro Mizoguchi, Satoshi Kanai, Hiroaki Date y Hiroyuki Tanaka.** *Robust and Exhaustive Method for Symmetry Detection from Scanned Meshes*. Tokyo, Japan : Japan SOC Mechanical Engineers, 2013.

32. **Valentina Campanelli, Stephen M. Howell y Maury L. Hull.** *Accuracy evaluation of a lower-cost and four higher-cost laser scanners*. California, USA : Elsevier Ltd, 2015.

33. **Tian Qingguo, Zhang Xiangyu, Ma Qian y Ge Baozhen.** *Utilizing polygon segmentation technique to extract and optimize light stripe centerline in line-structured laser 3D scanner.* Tianjin, China : Elsevier Ltd., 2016.
34. **Wolfgang Thaller, Ursula Augsdörfer y Dieter W. Fellner.** *Procedural mesh features applied to subdivision surfaces using graph grammars.* Berlin, Germany : Elsevier Ltd., 2016.
35. **CREAFORM-VXelements.** *Manual de usuario VXelements 5.0.* Canada : creaform, 2016.
36. **GOMinspect.** *Manual técnico GOMinspect.* ww.gom.com : GOMinspect, 2010.