



**Universidad
Tecnológica de Bolívar**
CARTAGENA DE INDIAS

**Estudio de Técnicas para la Corrección de Distorsiones por Línea de Calor en
Láminas de Espesor Delgado en la Construcción naval**

Rafael Lisandro Meza Batista

**Maestría en Ingeniería Naval y Oceánica
Facultad de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Bolívar
Cartagena, 2017**

**Estudio de Técnicas Para la Corrección de Distorsiones por Línea de Calor en
Láminas de Espesor Delgado en la Construcción Naval**
(Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Magister en Ingeniería Naval y
Oceánica)

Rafael Lisandro Meza Batista

Director
Phd. Adán vega

Universidad Tecnológica de Bolívar
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Naval y Oceánica
Cartagena, 2017

Nota de Aceptación

Cartagena de Indias, mayo de 2017

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios que por su gracia me ha permitido llegar a la culminación de este proyecto de vida, que sin duda, ha sido de gran satisfacción a nivel profesional y personal.

A mi esposa e hijos, quienes me tuvieron mucha paciencia y soportaron mi ausencia y la falta de atención que no les brinde en estos últimos meses; la constante dedicación a esta investigación, en muchas ocasiones no me permitió el compartir en familia.

A mi madre, a quien adoro y aprecio muchísimo por darme el apoyo incondicional para la realización de este proyecto.

A mis hermanos, por el aporte que me hicieron desde su experiencia empírica en las prácticas de laboratorio, para que esta meta fuera posible.

A mi asesor, a quien debo mucho por su conocimiento brindado y a su acompañamiento permanente en esta investigación.

Y finalmente, aunque no menos importante, gracias doy a mis compañeros de maestría, quienes con sus sugerencias me apoyaron para que este proyecto fuera posible.

Tabla de Contenido

0. Introducción	10
Capítulo I.	12
Aspectos Generales del Problema	12
1.1. Delimitación del Tema	12
1.2. Descripción del Problema	13
1.3. Formulación del Problema	15
1.4. Objetivos	16
1.4.1. Objetivo General.	16
1.4.2. Objetivos Específicos.	16
Capítulo II.	17
Marco Referencial	17
2.1. Antecedentes del problema	17
2.2. Estado del arte	18
2.2.1. Líneas de calor secuenciales.	25
2.3. Marco teórico	33
2.3.1. Deformaciones.	33
2.3.2. Línea de calor.	38
2.3.3. Métodos de enderezado.	39
2.3.3.1. <i>Enderezado por inducción.</i>	39
2.3.3.2. <i>Método de Enderezado en Frío.</i>	40
2.3.3.3. <i>Método enderezado en caliente.</i>	40
2.3.4. Técnicas de corrección por líneas de calor.	44
2.3.4.1. <i>Enderezado por llama con puntos de calor.</i>	44
2.3.4.2. <i>Enderezado por línea de calor en V.</i>	44
2.3.5. Líneas de calentamiento (Line heating).	46
2.3.5.1. <i>Strip Heats.</i>	48
Capítulo III.	50
Metodología y Ensayo de Laboratorio	50
3.1. Metodología	50
3.2. Desarrollo del Ensayo	55
3.2.1. Medición de los componentes de las deformaciones.	56
3.2.2. Ensayos de aplicación de líneas de calor en placas curvas.	58

3.2.3. Preparación para el ensayo.:	58
3.2.4. Ejecución del ensayo.	61
3.3. Cálculos de cada una de las variables de las pruebas de laboratorio	64
Capítulo IV.	70
Modelo experimental y Análisis de Resultados	70
5.1. Método Experimental: Software Utilizado en la Investigación	70
5.1.1. Modelo matemático del diseño de experimento	70
5.3. Hipótesis a Probar	72
5.4. Análisis de resultados: Calculo del Análisis de la varianza	74
5.4.1. Datos básicos o Atributos del Diseño de Mezclas	74
5.4.2. Análisis de varianza para cada variable de respuesta.	75
5.4.2.1. Generalidades del análisis de varianza ANOVA.	75
5.4.3. Análisis de varianza, para la variable de respuesta: Deformación	78
5.4.4. Análisis de varianza, para la variable de respuesta: Volumen de Oxígeno	81
5.4.5. Análisis de varianza, para la variable de respuesta: Volumen de gas propano.	84
Capítulo VI	93
6. Conclusiones y Recomendaciones	93
6.1. Conclusiones	93
7. Referencias Bibliográficas	95

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema de la aplicación de la llama.....	19
Figura 2. Disco Circular Modelo	32
Figura 3. Geometría de la Plata.....	32
<i>Figura 4. Tipos de distorsión presentes en piezas soldadas. a) Contracción longitudinal, b) Contracción transversal, c) Distorsión angular, d) Distorsión longitudinal o arqueado, e) Ondulado, f) Distorsión rotacional.....</i>	38
Figura 5. Clasificación de métodos o formas de calentamiento.....	42
Figura 6. Formas de calentamiento	43
Figura 7. Enderezado por puntos de calor	44
<i>Figura 8. Etapas del movimiento durante el calor en Vee</i>	46
<i>Figura 9. Esquema del mecanismo de línea de calor</i>	48
<i>Figura 10. Esquema de calor tira en la brida de una viga laminada.....</i>	49
<i>Figura 11. Trazado de la lámina en ambos lados</i>	53
Figura 12. Deformación Aparente	57
<i>Figura 13. Placas curvas con sus respectivas dimensiones</i>	60
<i>Figura 14. Tabla para la recolección de datos Placas curvas</i>	60
<i>Figura 15. Aplicación de calor por segmento de 2 pulgadas</i>	62
<i>Figura 165. Aplicación de líneas de calor en sentidos contrarios</i>	62
Figura 17. Aplicación de calor por segmento en el centro de la placa	63
<i>Figura 18. Aplicación de líneas de calor en una misma dirección.....</i>	63
Figura 19. Aplicación de calor por puntos.....	63
<i>Figura 20. Temperatura de la llama en la llama primaria, como una función de la proporción de mezcla para los diferentes gases combustibles (AGA CW-859sp 9809-2000)</i>	65
<i>Figura 21. Diseño de bloque completamente aleatoria DBCA</i>	71
<i>Figura 22. ANOVA para un diseño en bloques completos al azar</i>	73
<i>Figura 23. Significancia de las interacciones para los tiempos de entrega</i>	77
<i>Figura 24. Significancia de las interacciones para la Deformación</i>	80
<i>Figura 25. Significancia de las interacciones para el volumen de oxígeno.....</i>	83
<i>Figura 26. Significancia de las interacciones para el volumen de gas propano</i>	86
Figura 27. Análisis comparativo de las deformación por técnicas de corrección.....	89
Figura 28. Análisis comparativo de los Tiempos de entrega de un proyecto por técnicas de corrección.....	90
Figura 29. Análisis de Consumo de Oxígeno por Técnicas de Corrección	91
Figura 30. Análisis comparativo del Consumo de gas propano por técnicas de Corrección.....	92

Índice de Tablas

<u>Tabla 1. Condiciones calefacción y placas Modelos</u>	23
<u>Tabla 2. Tabla Gases combustibles utilizados para endurecimiento por llamas</u>	66
<u>Tabla 3. Análisis de Varianza para Tiempo de entrega</u>	76
<u>Tabla 4. Pruebas de Múltiple Rangos para Tiempo de entrega por técnicas de calor</u>	77
<u>Tabla 5. Diferencia significativa de tiempo de entrega</u>	78
<u>Tabla 6. Análisis de Varianza para deformación</u>	79
<u>Tabla 7. Pruebas de Múltiples Rangos para deformación por técnicas de calor</u>	81
<u>Tabla 8*. Diferencia significativa de la Deformación</u>	81
<u>Tabla 9. Análisis de Varianza para Volumen de Oxígeno</u>	82
<u>Tabla 10. Análisis de Varianza para el Volumen de Oxígeno</u>	84
<u>Tabla 11. * Diferencia significativa de Volumen de Oxígeno</u>	84
<u>Tabla 12. Análisis de Varianza para Volumen de gas propano</u>	85
<u>Tabla 13. Pruebas de Múltiple Rangos para el Volumen de gas propano</u>	86
<u>Tabla 14. * Diferencia significativa de Volumen de gas propano</u>	87
<u>Tabla 15. Resumen de los datos con relación al consumo de tiempo, deformación y gases en un proyecto de construcción naval</u>	88

Resumen

El presente trabajo experimental tiene como finalidad estudiar cuál de las técnicas existentes para corregir deformaciones en estructuras soldadas de espesor delgado, es más económica a la hora de automatizar los procesos de construcción y reparación naval en cuanto al consumo de gas y tiempo de aplicación de calentamiento. El trabajo pone de relieve el hecho de que la distorsión producida en placa de espesor delgado depende de: la velocidad del soplete, de la altura de la boquilla del soplete a la superficie del calentamiento de la placa y de la máxima temperatura que se obtiene en la placa. Entre las conclusiones más relevantes se señala que los resultados de esta investigación conducen a la utilización de técnicas manuales de medición, introduciendo incertidumbre en los resultados que sin embargo, representan la realidad de gran parte de las actividades de reparación y construcción naval de estructuras soldadas. Por lo tanto, estos resultados se pueden considerar válidos, con un cierto grado de incertidumbre.

0. Introducción

Este trabajo centra su atención en el estudio de Técnicas para la Corrección de Distorsiones por Línea de Calor en Láminas de Espesor Delgado en la Construcción naval. Su estructura obedece a una organización en dos grandes secciones. La primera se realizó en placas planas. El propósito de esta primera sección fue considerar el efecto que tiene el calor en una placa de acero naval de espesor delgado y el comportamiento de cada uno de los diferentes componentes que genera el calor una vez aplicado. Entre los componentes se tienen: el encogimiento transversal, encogimiento longitudinal, flexión transversal y flexión longitudinal. En esta primera sección, se puede ver que las tensiones residuales producidas por las líneas de calor realizadas previamente, influyen significativamente en la deformación angular producida, y que la secuencia de calentamiento no afecta significativamente a la deformación inherente producida por múltiples líneas de calor paralelas.

En la segunda sección se presenta de manera detallada el procedimiento realizado para el desarrollo del trabajo de investigación y que permite establecer de manera objetiva los resultados esperados en la misma. En esta sección se realizaron pruebas de laboratorio con placas curvas de acero naval con las mismas especificaciones de longitud y espesor. Se realizó un análisis comparativo de cinco (5) técnicas de corrección de deformaciones por líneas de calor, con el propósito de evaluar cuál de ellas es la más económica en relación al consumo de gas y tiempo de aplicación. En este segundo capítulo, se esboza de manera amplia el marco y la línea de investigación de nuestro objeto de estudio. Por otro lado, se describe la problemática que existe a nivel industrial con relación a la construcción y los mantenimientos navales en la corrección de deformaciones.

En esta sección, en el capítulo V, también se presenta el modelo matemático implementado en esta investigación, los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y su respectivo análisis, con el objetivo de seleccionar la técnica de aplicación de calor que corrige la mayor deformación en el menor tiempo de entrega y consumo de gases en un proyecto de construcción naval. Estos resultados se emplean a sí mismo para la posterior validación del método desarrollado. Finalmente, se exponen las conclusiones relevantes de todo el proceso investigativo y las respectivas recomendaciones.

Capítulo I.

Aspectos Generales del Problema

1.1. Delimitación del Tema

Esta propuesta se enmarca dentro del campo de la Ingeniería Naval y Oceánica, y se inscribe en la línea de investigación correspondiente a la construcción naval, asumiendo como eje temático los procesos de construcción y reparación naval, específicamente aquellos relacionados con los procesos de soldadura. Esto último, remite al área en la cual se suscribe el tema de la corrección de las deformaciones en estructuras soldadas, objeto de estudio de la presente propuesta de investigación.

El estudio indaga el tema de la eficacia de las técnicas utilizadas actualmente en los procesos de construcción y reparación naval para corregir las deformaciones en estructuras metálicas, especialmente en láminas de espesor delgado. Para ello, se tendrán en cuenta las técnicas existentes. La finalidad consiste en validar el nivel de efectividad de cada técnica conocida, asumiendo como variables principales: tiempo y consumo de gases, es decir, se buscará determinar el comportamiento de estas variables a la hora de seleccionar una técnica específica por parte de los especialistas que ejecutan los procesos de reparación y construcción naval.

Ajila, De este modo, esta investigación asume como punto de partida las muchas investigaciones que se han realizado sobre el estudio de los múltiples fenómenos generados por efecto de los mecanismos de calentamiento – enfriamiento que ocurre cuando se suelda un metal (2008).

Muchos otros han estudiado el problema de las distorsiones generadas por el proceso de calentamiento - enfriamiento (González, 2006). Sin embargo, como conclusión, podemos decir

que aún no existe un método de soldadura libre de deformaciones y mucho menos máquinas que garanticen un trabajo altamente eficiente, por lo cual, es importante señalar que las deformaciones y sus correcciones se constituyen respectivamente en fenómenos y procesos inherentes al oficio de soldadura en estructuras navales (Ajila, 2008). Un factor incidente en el proceso de corrección de deformaciones, es el desconocimiento y la falta de registros en relación al tema, lo cual se hace evidente en la calidad de los trabajos de reparaciones y construcciones navales (Johnson y Chirilo, 1979).

1.2. Descripción del Problema

Uno de los procesos más utilizados en la industria naval es la soldadura, la cual se caracteriza por ser compleja. Frecuentemente, genera dificultades asociadas con las propiedades metalúrgicas y metalográficas de los metales, los esfuerzos y las tensiones residuales que se generan en el proceso (Lewis, et. al., 2009).

Una de estas dificultades particularmente interesante por los retos y efectos que plantea a los ejecutantes del proceso de construcción naval, son las denominadas “*deformaciones en sus diversas manifestaciones*” (por ejemplo, por pandeo, encogimiento transversal, encogimiento longitudinal, etc.), hecho que tiene lugar por los esfuerzos térmicos producidos por las altas temperaturas en dicho proceso.

Estas deformaciones, suelen ser más frecuentes cuando se sueldan estructuras metálicas en láminas de espesores delgados. Un ejemplo de esto son las embarcaciones de recreo, barcos de pesca artesanal, así como también en las cubiertas de los buques Ro-Ro y superestructuras de todos los buques. Aunque a través de la historia se han desarrollado métodos

que buscan minimizar esta problemática, aun no se ha encontrado un método validado que garantice estructuras soldadas libre de deformaciones (Vega, 2009). De acuerdo a esto, se hace necesario desarrollar investigaciones orientadas a los procesos de corrección de deformaciones en placas.

Es preciso señalar que las acciones de corrección de deformaciones no constituyen procesos simples y homogéneos con resultados óptimos, pero si se espera que lleguen a generar resultados eficaces en relación a tiempo y consumo de gases. En la práctica, los profesionales utilizan estas técnicas de corrección de deformaciones cuando las estructuras lo requieren, pero esta acción no siempre es guiada por parámetros que garanticen la eficacia de estas técnicas, llegando a impactar los tiempos y costos de la producción.

Lo anterior, se convierte en un problema que requiere acciones de investigación y análisis orientado hacia la comprensión profunda del comportamiento en términos de la relación entre el calor aplicado y la deformación corregida, buscando siempre la disminución del tiempo y los costos (cantidad de gases requeridos para la corrección) de las técnicas de corrección de deformaciones. Dicho de otro modo, se trata de generar una propuesta investigativa que plantee alternativas y criterios acerca de la viabilidad que éstas técnicas ofrecen en el contexto de ejecución del proceso.

En ese sentido, esta investigación concibe como problema central la necesidad de investigar el comportamiento de las técnicas que actualmente se utilizan en el campo de la construcción y reparación naval para la corrección de las deformaciones producidas en estructuras soldadas, a partir del concepto de efectividad, entendido como la relación entre los recursos utilizados para reparar una distorsión dada y los logros conseguidos. En otras palabras, se entiende que la técnica más eficaz es aquella donde se utilizan menos recursos para lograr un

mismo objetivo, o al contrario, cuando se logran más objetivos con los mismos o menos recursos.

De acuerdo a lo anterior, desde esta propuesta se intenta realizar un análisis comparativo que permita determinar cuál técnica corrige una determinada deformación en menos tiempo y gastando menos energía (gases). Llegando a determinar las condiciones de mayor eficacia obtenidas al momento de aplicar estas técnicas en la ejecución de trabajos de reparación y construcción naval. Por lo tanto, se trata de establecer mediante pruebas de laboratorio y de análisis matemáticos, la eficacia que ofrece cada técnica de corrección de deformaciones desde una perspectiva comparativa.

De este modo, se espera que la ejecución del proceso de investigación genere criterios y lineamientos que permitan orientar la toma de decisión acerca de la escogencia y la pertinencia de cada técnica utilizada, especialmente desde su impacto a nivel de costos de producción, tiempo y calidad del trabajo. Es preciso señalar que al momento del estudio, no existen investigaciones que validen la teoría y la práctica con respecto a la eficacia de los procesos y técnicas de corrección de deformaciones.

1.3. Formulación del Problema

¿Cuál de las técnicas existentes para corregir distorsiones en estructuras soldadas de espesor delgado es más económica en cuanto al consumo de gases y tiempo de entrega de un proyecto en procesos de construcción y reparación naval?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General. Evaluar y seleccionar técnicas usadas en procesos de corrección de distorsiones por línea de calor en láminas de espesor delgado de estructuras navales, que optimicen el tiempo de entrega y consumo de gases en un proyecto de construcción.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Identificar los parámetros (diámetro de la boquilla, velocidad de avance, temperatura y altura de la boquilla del soplete), que afectan el proceso de corrección de distorsiones de estructuras soldadas de espesor delgado mediante la aplicación de calor.
- Comparar las técnicas existentes para la corrección de distorsiones en estructuras navales de espesor delgado, utilizando calor que minimice el consumo de gases y tiempo de entrega de un proyecto de construcción naval.
- Estimar los parámetros que caracterizan las diferentes técnicas de corrección de distorsiones, para identificar y determinar cuál de ellas genera menor consumo de gases y tiempo de entrega de un proyecto de construcción naval.

Capítulo II

Marco Referencial

2.1. Antecedentes del problema

La soldadura es uno de los procesos de manufactura más utilizado en la industria. Sin embargo, las estructuras soldadas están expuestas a múltiples defectos propios del mecanismo de calentamiento – enfriamiento que ocurre cuando se suelda un metal (Mandal, 2009).

Aunque mucho se ha trabajado para desarrollar métodos de soldadura que minimicen estos efectos negativos, todavía se está lejos de poder soldar una estructura libre de deformaciones. Por esto, se hace necesario desarrollar técnicas para corregir este tipo de defectos y así poder construir estructuras metálicas que cumplan con los requisitos mínimos de calidad e integridad estructural (Vega, *et. al.*, 2008).

Desde hace décadas se han hecho un gran número de investigaciones en esta área de la ingeniería. Algunas de ellas enfocadas al entendimiento del proceso de corrección de deformaciones, otras a la obtención de técnicas novedosas más eficientes y menos costosas. Por otra parte, y más recientemente, otros han buscado la automatización del proceso. Sin embargo, todavía no se evidencia el desarrollo de un método de soldadura libre de deformaciones, ni de una máquina automática capaz de realizar el trabajo eficientemente (Vega, *et. al.*, 2008). Nuestra indagación sobre la revisión bibliográfica, nos deja ver que en Colombia no se han publicado trabajos relacionados con esta temática.

2.2. Estado del arte

En la industria naval existen múltiples métodos y técnicas de corrección de deformaciones de estructuras navales, y entre los métodos encontramos la aplicación de líneas de calor, que nos remite a nuestro objeto de estudio sobre encontrar cuál de las técnicas es la más eficiente (tiempo-consumo de gases) a la hora de corregir deformación producida por los procesos de soldadura, que es donde se encuentra la mayor dificultad y más cuando estas, dependen en gran parte de la experiencia del operador, sin tener en cuenta los pro y contra de dicha técnica.

Por lo anterior, se hará mención de lo que hasta el momento se ha venido trabajando en esta materia y algunos resultados encontrados en la misma. Si bien es cierto, que existen diversas técnicas de corrección por líneas de calor, no se ha encontrado un estudio experimental y comparativo de las diferentes técnicas que nos permita determinar o elegir cuál de las diversas técnicas de corrección es la más eficiente (tiempo- consumo de gases). Por otra parte, la mayor aplicación de líneas de calor en la industria naval para el caso de barcas y otros artefactos navales, de acuerdo con Vega, está orientada en conformar placas o piezas navales de acuerdo con las necesidades existentes en los diferentes astilleros (Vega, Rashed, Serizawa, y Murakawa, 2007a).

Otro aspecto a considerar, radica en que las investigaciones donde se utilizan líneas de calor, simulan sus programas para placas planas de diámetros y dimensiones mayores de 10mm, mientras que en el presente trabajo se realizan con espesor delgado, entendiendo como espesor delgado máximo 7mm. El departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, de la Universidad de Cantabria, en Santander (España), realizó un estudio de aplicación de líneas de calor, con el propósito de ilustrar el procedimiento y examinar las consecuencias de la aplicación de calor sobre las propiedades mecánicas y micro-estructurales de cinco aceros

(García *Et. al.*, 2010). En este estudio, se calentaron por líneas de calor cinco (5) láminas de aceros de 500mm x 600mm x 20mm, ampliamente utilizados en la industria general.

La técnica de aplicación de calor se ilustra en la figura 1, a lo largo de la placa, con velocidad lineal para garantizar y asegurar que en la cara del metal se obtuvieran las temperaturas recomendadas por los expertos en enderezado. Otro elemento importante es que las placas están sujetas para permitir una libre expansión en todas las direcciones.

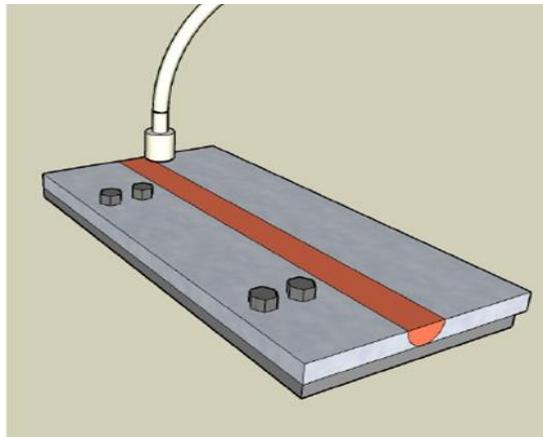


Figura 1: Esquema de la aplicación de la llama (García, J. *et. al.*, 2010).

Los aceros ensayados fueron S235JR, S355J2, SA460ML, S690QL y S890QL. Lo importante de estos aceros, radica en que recogen un amplio espectro de aceros en cuanto a diversidad de propiedades resistentes y sus características. De acuerdo a esta referencia: “la aplicación de líneas de calor sobre los aceros S235JR y S355J2 permite conocer las consecuencias del enderezado por llama en aceros dúctiles de bajo límite elástico de baja aleación.

El acero SA460ML, representa la oportunidad de conocer cómo afecta el enderezado a un acero laminado termo mecánicamente. Las posibles desventajas o limitaciones de la técnica en

templados y revenidos de alta resistencia se analizan a través del ensayo de los aceros S690QL y S890QL. Los aceros S235JR, S355J2 y SA460ML fueron calentados hasta una temperatura máxima de 850°C, mientras que los aceros de alta resistencia S690QL y S890QL, hasta una temperatura máxima de 750°C”. En la fase post-calentamiento de las placas, se analizaron sus propiedades y se comparó la microestructura, la dureza, el comportamiento de tracción y la resistencia al impacto mediante ensayos Charpy, del material calentado y el material base. Se arrojaron los siguientes resultados:

Primero, existe indiscutiblemente un cambio microestructural, en función de las características y naturaleza del acero. (2) Se evidenció pérdida de homogeneidad en la dirección del bandeo de la perlita en los aceros ferrítico-perlíticos. (3) Los aceros de alto contenido en carbono, presentan una transformación de la microestructura de ferrita en la zona calentada. Estos indican una baja en la dureza del material en la zona de aplicación de calor en cada uno de los casos. (4) En cuanto a las propiedades de tracción, el calor aplicado influyó una pequeña baja en el límite elástico y en la tensión de rotura. (5) Con relación al ensayo de impacto no presenta características comunes, es decir, el acero S235JR presenta un desplazamiento de la temperatura de transición hacia la derecha, así como una baja en el Upper Shelf, mostrando síntomas de fragilización. (6) Los aceros S355J2 y S690QL no evidencian cambios en sus curvas Charpy. Pero en el caso de los aceros SA460ML y S890QL, si evidencian una leve mejoría en sus propiedades ante el impacto.

Por otro lado, se han propuestos métodos para predecir de manera real deformaciones inducidas por líneas de calor en placas de gran tamaño, utilizadas en diversos astilleros y también, métodos prácticos que buscan la conformación de placas con procesos automatizados.

De acuerdo con Vega, podemos decir que presentan un primer reporte donde describen los factores que afectan a la deformación de una placa formada por línea de calor a través de un análisis finito térmico elástico - plástico 3D, utilizando un método iterativo sub-estructural (Vega, *et. al.*, 2007a). Adicionalmente, se investiga y se explica el efecto de la longitud de la placa, el ancho de la placa y la proximidad al borde (efecto de borde) de la deformación.

En relación con lo anterior, se presenta un esquema del procedimiento aplicado para el cálculo de deformación de la placa utilizada. En todos los casos de análisis, se utilizaron placas planas rectangulares como se muestra en la figura 2. Cuyas medidas son 80 x 40 x 10 mm. (Es la referencia más próxima a la nuestra). Además, se emplean modelos de elementos finitos como se muestra en la Figura 3. Con respecto al calor, este es aplicado sobre una zona móvil que consta de dos elementos en la dirección longitudinal (movimiento), cuatro elementos en la dirección transversal y un elemento en la dirección del espesor. En cada caso, la distribución de temperatura transitoria resultante de la fuente de calor móvil se calcula utilizando un análisis de FE térmica 3D.

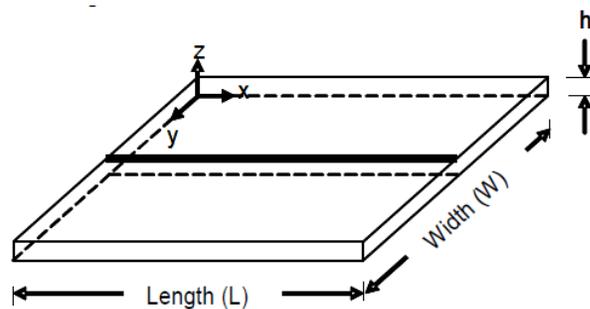


Figura 2. Esquema del modelo de placa

(Vega, *et. al.*, 2007a).

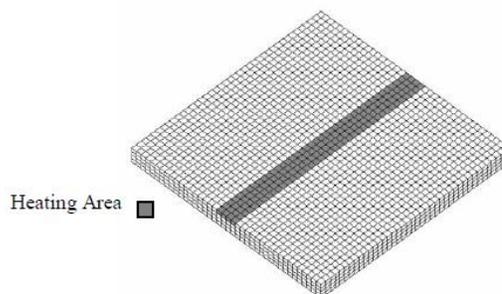


Figura 3. Ejemplo del modelo de elementos finitos (Vega, *et. al.*, 2007a).

La entrada de calor por unidad de longitud de la línea de calentamiento, se mantiene a la temperatura más alta en la superficie o en la zona de calentamiento a 800°C , con un enfriamiento al aire natural. La placa se calienta a lo largo de la dirección de X en la superficie superior. Después del análisis térmico, se realizó un análisis mecánico transitorio, agregando algunas restricciones necesarias para eliminar el movimiento del cuerpo rígido. En esto, se utilizó una relación de las propiedades mecánicas del acero dulce en relación a la temperatura, tal como se muestra en la figura 4.

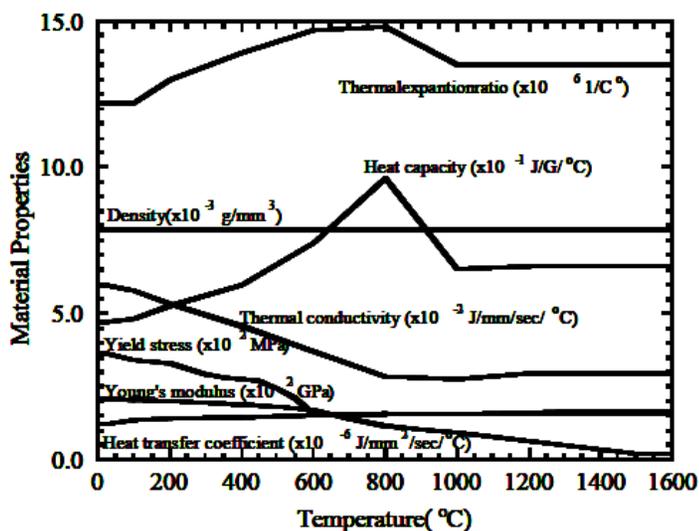


Figura 4. Propiedades mecánicas del acero dulce (Vega, *et. al.*, 2007a)

Se aplica la historia de la distribución de temperatura transitoria obtenida en el análisis térmico y se evalúan las tensiones y los desplazamientos, para aclarar la influencia de la longitud de la placa. Para la comprensión de la influencia de la longitud de la placa, el ancho de la placa y la proximidad del borde (efecto de borde) en la deformación inherente, se analizaron 8 casos según la tabla 1. Los casos del 1 al 4, se utilizaron para estudiar la influencia de la longitud de la placa. Por otra parte, los casos del 5 al 8 se utilizaron para analizar la influencia de la anchura de la placa. De acuerdo con la cita en consideración, en todos los casos analizados, se obtuvieron desplazamientos nodales, los componentes de los elementos de tensión y de la deformación elástica y plástica.

Tabla 1. Condiciones calefacción y placas Modelos (Vega, *et. al.*, 2007a).

Heating Conditions			
Heat Input (J/mm)	Traveling Speed (mm/s)	Surface Temperature (°C)	Back Surface Temperature (°C)
5,000	3.0	800	260
Plate Models Used to Study the Plate Length Effect			
CASE	L (mm)	W (mm)	h (mm)
1	400	800	40
2	800	800	40
3	1400	800	40
4	3000	800	40
Plate Models Used to Study the Plate Width Effect			
CASE	L (mm)	W (mm)	h (mm)
5	800	400	40
6	800	800	40
7	800	1400	40
8	800	3000	40

La deformación de la placa se expresa utilizando el método de deformación inherente. Este consiste en la integración de la deformación plástica sobre la sección transversal de la placa. La deformación inherente se puede dividir en cuatro componentes: (1) contracción longitudinal, (2) contracción transversal, (3) flexión longitudinal y (4) la flexión transversal. A manera de

conclusión, teniendo en cuenta los factores influyentes en la deformación de una placa, tales como la longitud, el ancho y el efecto borde, podemos decir que:

(1) En placas de 200-300 mm., la deformación inherente aumenta a lo largo y ancho; cuando las dimensiones son aproximadamente 800 mm., (para una placa gruesa de 40 mm) los efectos de lo largo y ancho, arrojan que la deformación se hace insignificante. Podemos decir entonces, que en placas de gran tamaño, tales efectos no influyen apreciablemente en la deformación inherente. (2) En la Figura 5, se muestra la contracción transversal inherente que varía a lo largo de la línea de calentamiento, tanto en la entrada como en la salida de calor (regiones L1 y L3), mientras que en la zona media de la placa la deformación inherente es menor (L2). Este mismo comportamiento se puede observar en los otros tres componentes de la deformación inherente, es decir, en la contracción longitudinal, la flexión longitudinal y en la flexión transversal.

(3) El efecto de borde de entrada (región L1) no cambia con la longitud de la placa, ni con la anchura de la placa. (4) El efecto de borde, en el borde de salida (región L3) cambia levemente con la longitud de la placa. Sin embargo, para las placas más grandes de 800 mm., aproximadamente, el cambio es pequeño y puede ser despreciable. (5) Para placas mayores de 800 mm., la distribución de deformaciones inherentes para una placa de menor longitud (igual espesor), puede obtenerse superponiendo la distribución de la deformación inherente de la entrada y el borde de salida (L1 y L3), obtenidos a partir del análisis de una placa más grande. El valor de la tensión inherente en la región central (L2), se mantiene casi sin cambios.

En un segundo reporte, siguiendo a Vega, Tajima, Rashed y Murakawa, (2007b), hacemos uso del mismo esquema de procedimiento aplicado para el cálculo de deformación de la

placa, utilizando un análisis finito térmico elástico - plástico 3D, se analizó el comportamiento de líneas de calor superpuestas y a la vez cuando las líneas de calor son paralelas.

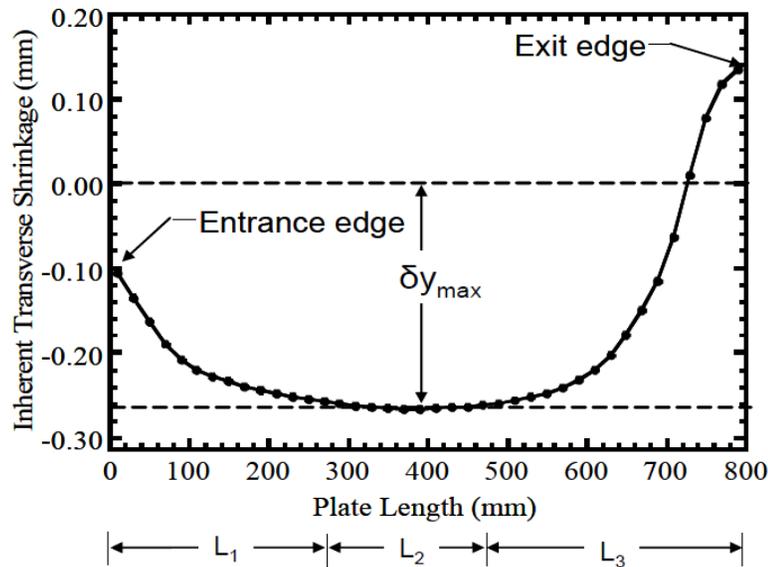


Figura 5. Esquema de la distribución de encogimiento transversal (Vega, *et. al.*, 2007a)

2.2.1. Líneas de calor secuenciales. De acuerdo con la Fig. 6, Estas líneas se aplican en la dirección X en el centro de la placa. Después de la primera línea de calor se enfría a temperatura ambiente y se aplica una segunda línea de calor superpuesta con las mismas condiciones de calentamiento y enfriamiento como la primera. En la Fig. 6., se compara la deformación inherente producida por la primera línea de calor con la segunda línea aplicada (secuencial). De acuerdo con estas gráficas, las variaciones observadas de la deformación, es debido a las tensiones residuales producidas por la primera línea de calor (Vega, Tajima, Rashed y Murakawa, 2007c).

También, En esta gráfica, se observa la distribución de la deformación inherente Producida por líneas de calor superpuesta: a) Inherente Transversal contracción, b) Inherente Transversal Doblado, c) Inherente Longitudinal contracción, d) Inherente Longitudinal Doblado (Vega. *et. al.*, 2007 b). Este esfuerzo residual de tracción produce una disminución de los

componentes transversales de deformación inherente producidos por la segunda línea de calentamiento, tal como se muestra en la Fig. 6 (a) y (b). En ambos bordes de entrada y salida de la placa, la tensión residual en la dirección X es pequeña, mientras que existe la alta tensión residual a la tracción en la región central de la placa. Debido a esta alta tensión residual a la tracción, el incremento de los componentes longitudinales de deformación inherente en la región central de la placa producida por la segunda línea de calor (superpuesta) es pequeño; a diferencia de las figuras 6 (c) y (d), en estas el incremento es mayor en ambos bordes.

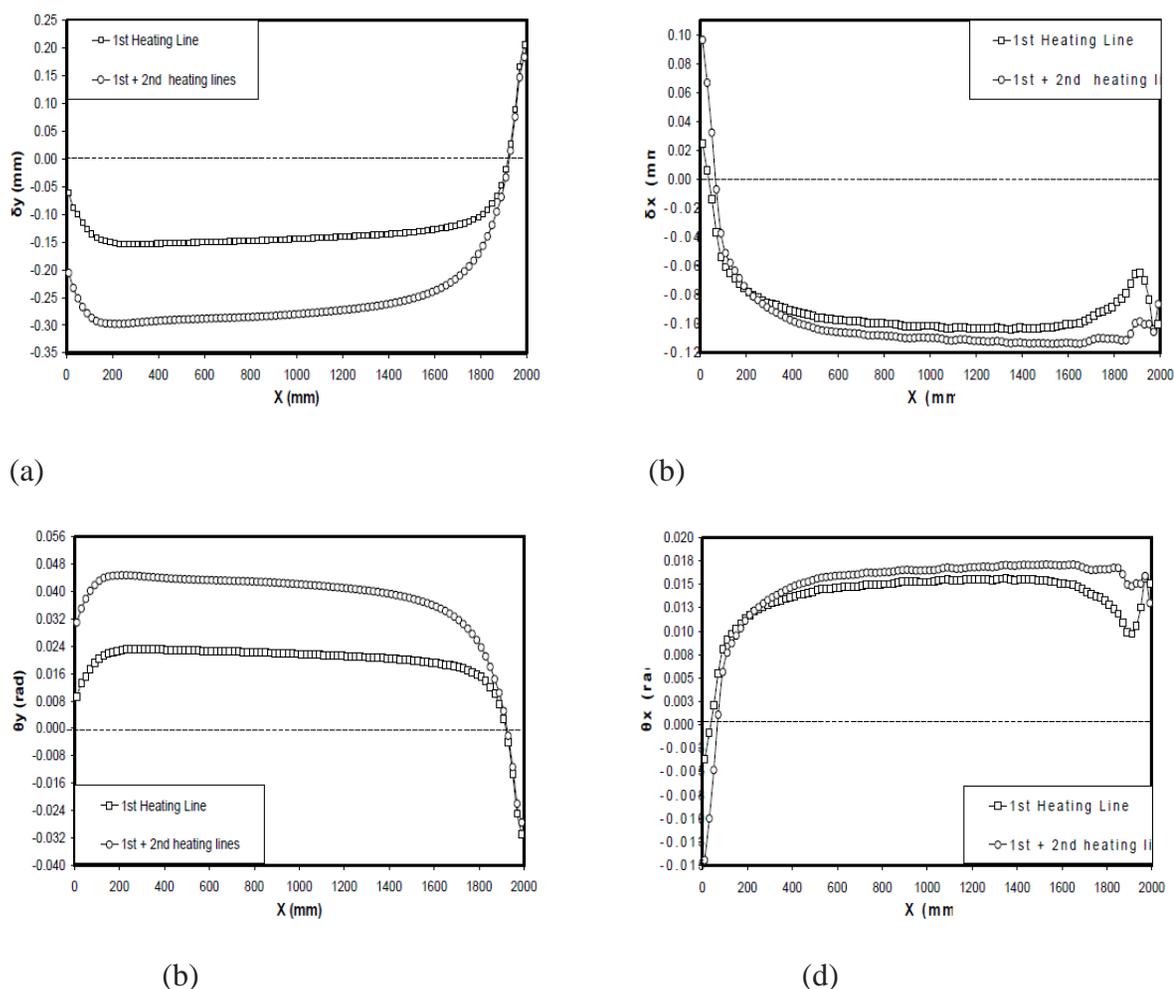


Figura 6. Distribución de la deformación inherente producida por líneas de calor superpuesta: a) Inherente Transversal contracción. b) Inherente Transversal Doblado. c) Inherente Longitudinal contracción. d) Inherente Longitudinal Doblado

Podemos en principio decir, que la variación de la deformación total es debido a las tensiones residuales producidas por la primera línea de calor y que estas tensiones aumentan ligeramente con líneas adicionales de calentamiento. Esto significa que el aumento de la deformación varía con el número de líneas de calor aplicada secuencialmente, como se muestra en la Fig. 7. La Deformación inherente después de 1, 2 y 3 se superponen líneas de calefacción: a) Inherente transversal de contracción, b) Inherente contracción longitudinal (Vega. *et. al.*, 2007b).

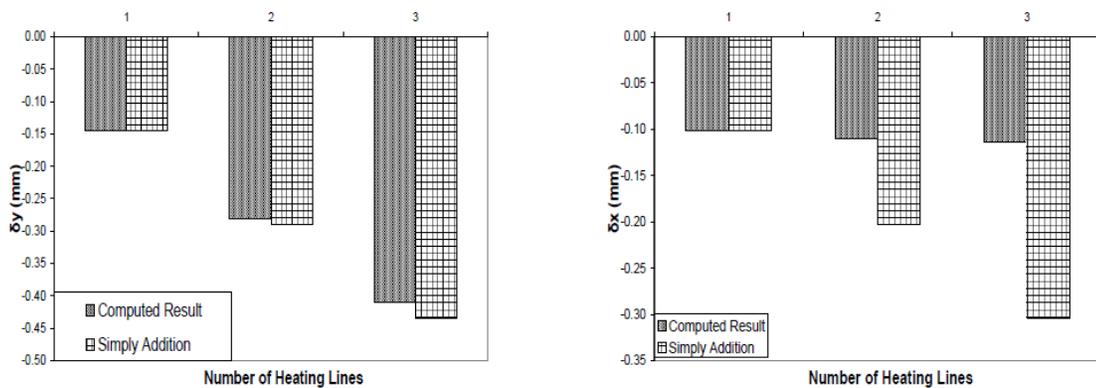


Figura 7. Deformación inherente después de 1, 2 y 3 se superponen líneas de calefacción: a) Inherente transversal de contracción b) Inherente contracción longitudinal

2.2.2. Líneas de Calor Paralela. La Fig. 8 muestra que la distancia entre las líneas de calor debe ser lo suficientemente grande para que las tensiones residuales producidas por la línea de calentamientos anteriores sean pequeñas y no afecten a la deformación inherente de la siguiente línea de calor. La deformación puede ser predicha por la simple adición de las deformaciones producidas por líneas paralelas de calor individuales (Vega. *et. al.*, 2007c). Sin embargo, cuando las líneas de calor paralelas están cerca la una de la otra, las tensiones residuales producidas por las líneas de calor previas afectan la deformación producida por la siguiente línea de calor.

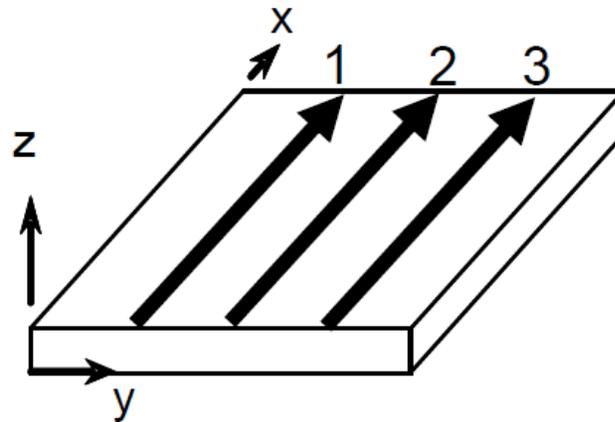


Figura 8. Esquema de las líneas paralelas Calefacción
(Vega. *et. al.*, 2007b)

De este reporte, podemos concluir que: en primer lugar, las tensiones residuales producidas por las líneas de calor anteriores, influyen significativamente en la deformación inherente de la línea de calor posterior. La influencia aumenta con el número de líneas de calefacción. Segundo, en la zona central de la placa, la línea de calor previa a la línea de calor, se nota que el efecto en la deformación reduce los componentes longitudinales y de manera ligera en los componentes transversales. Tercero, en la región central de la placa, el efecto de una línea de calentamiento previa en la deformación inherente de una siguiente línea en paralelo, es para aumentar los componentes longitudinales de deformación inherente y reducir los componentes transversales. Y cuarto, la secuencia de calentamiento no afecta significativamente a la deformación inherente producida por múltiples líneas de calor paralelas.

Otra investigación desarrollada, hace mención al estudio analítico y numérico de placas curvas por líneas de calor, trabajo realizado por la universidad Federal de Rio de Janeiro (Vaz y da Silva, 2010). Este trabajo es una continuación de la propuesta de Jang, Seo y Ko (1997), cuyo objetivo es ampliar la comprensión del tema sobre líneas de calor. La metodología utilizada en esta referencia se basó en herramientas de análisis, proporcionado por artículos y tesis sobre el

tema y por análisis numérico a través del Método de los Elemento Finito. Por lo tanto, el trabajo se desarrolló en dos campos:

Primero, *el Análisis Numérico Thermo-estructural*: El análisis es puramente térmico (flujo calor) y se hace considerando la deformación con la aplicación de calor, de modo que las deformaciones de la placa en virtud al calor aplicado se pueda calcular simultáneamente con el campo de temperatura resultante. El segundo, *el Análisis Analítico Estructural*: En lugar de realizar análisis numérico termomecánico, se realiza el análisis puramente mecánico, a través de formulaciones analíticas obtenidas de la literatura. Fundamentados en la teoría de la elasticidad, se realizan integraciones de la deformación residual resultando en fuerzas y momentos mecánicos. En virtud a las cargas, la placa sufre deformaciones, cuyos valores se comparan con los valores experimentales. La ventaja de este análisis es disminuir los tiempos computacionales requeridos por termo estructural.

Se realizaron experimentos con el propósito de comparar y validar el método de Análisis Numérico Termo-estructural (que es un MEF) con el método analítico estructural, y de esta manera comprobar la exactitud del modelo propuesto por Jang et al. (1997). De este modo, se contribuye a un mejor entendimiento del método de análisis termo-elasto plástico y a su aplicación en la industria de la construcción naval. Además, se destaca la comprensión acerca de la distribución de la temperatura en una placa bajo un mecanismo de línea de calor y la deformación causada por esta. Los análisis antes mencionados, se realizaron a través de programas de elementos finitos Nastran y Abaqus, respectivamente.

2.2.3. Análisis Estructural Termo-Elasto- Plástica Simplificada. Jang *et al.*, (1997) desarrollan un método para predecir la deformación de la placa por la acción de una línea de calor. El método propuesto se basa en supuestos racionales para simplificar el proceso complejo

calculando las deformaciones causadas por las tensiones residuales. Este método ofrece una ventaja y es la de aumentar la eficiencia computacional y permitir la visualización en tiempo real de la placa deformada. Además de esto, también se presenta un método indirecto para estimar el flujo de calor.

El modelo mecánico simplificado propuesto por Jang et al. (1997), se basa en los siguientes supuestos: (1) El proceso Elástico-plástico es concentrado en un disco circular bajo la fuente de calor y la placa se considera en dos dimensiones. (2) El proceso térmico elasto-plástico se lleva a cabo dentro de una pequeña región circular con simetría axial y la región elástica restante de la placa resiste la expansión y contracción de la región plástica circular. La resistencia de la región plástico elástico en la zona se modela como un conjunto de resorte alrededor, por ejemplo, como se ilustra en la Figura 9. (3) La constante elástica K del resorte es calculada derivando el desplazamiento radial a un agujero circular con una placa sin fin sometido a la presión uniforme P , como se muestra en la Figura 9. (4) El aumento de temperatura del proceso, que resulta en la expansión térmica, puede ser considerado como un encogimiento Plástico mecánica en la región plástica. Por otra parte, la disminución de temperatura puede ser considerada como una descarga mecánica de plástico. Este proceso de descarga plástico es la causa de deformación residual que, en última instancia, resulta en la deformación angular de la placa. (5) El resultado final de la deformación angular es la integración de las deformaciones, debido a la tensión Residual en cada disco.

Los límites de la integración se definen por la región de la deformación residual producida durante la calefacción, tomada como una distribución elíptica en el plano perpendicular de la placa a la línea de calefacción. Esta distribución se basa en los resultados experimentales y en la Solución de Rosenthal (1946). Los experimentos muestran que la

mayoría de las tensiones y deformaciones se encuentran en la zona afectada por el calor que produce la fuente de calor, mientras que otras regiones de la placa permanecen en el estado elástico. El límite exacto de la región donde las deformaciones plásticas predominan depende de propiedades térmicas y mecánicas de la placa. Sin embargo, la región de alta temperatura junto a la fuente de calor siempre experimenta un estado plástico y ocupa la mayor parte de la región plástica.

Aunque el flujo de calor es asimétrico, en la práctica, los efectos de movimiento hacen no asimétrica la distribución de temperatura de la placa alrededor de la antorcha. Como es de esperarse, suministrando agua durante el proceso de calentamiento se observa la región isotérmica alrededor de la antorcha, similar a un círculo. Durante el proceso de aumentar temperatura en el disco, se aplican cargas resultantes de la expansión térmica del material. Como a alta temperatura las propiedades de resistencia tienden a ser casi nula, la mayor parte de expansión térmica se convierte en deformación plástica. Sin embargo, cuando las cargas térmicas son eliminadas, ocurren alivios en la Deformación plástica.

La figura 9 representa el proceso Termo- Elástico-plástico basado en los supuestos anteriores. El disco circular se muestra en la Figura 9 (a). Es la región alrededor de la antorcha la que experimenta el calentamiento y enfriamiento rápido, y los resortes de todo el disco representan el efecto de la resistencia de la región elástica. La placa con un orificio, mostrada en la Figura 9 (b), es la región elástica y puede ser utilizada para calcular la constante de los resortes.

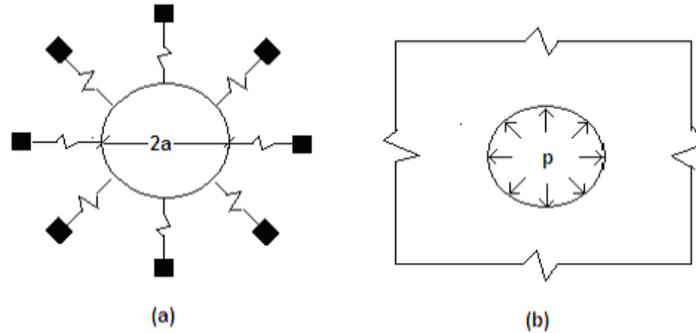


Figura 92. Disco Circular Modelo
(Vaz y da Silva, 2010)

Jang *et al.*, (1997) llevaron a cabo experimentos con placas cuyas dimensiones son $L = 700$ mm, $B = 500$ mm, y $h = 12$ mm (Figura 10), usando un soplete de calentamiento con mezcla de oxígeno y gas propano, en el cual la velocidad está dada por $v = 3,8$ mm/s. Se constató que, con las dimensiones y velocidades anteriores, se presenta una deflexión del centro Placa de $D = 2,96$ mm.

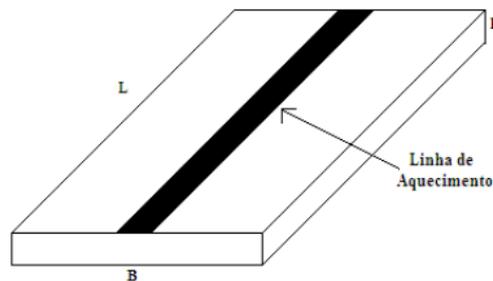


Figura 3. Geometría de la Placa
(Vaz y da Silva, 2010)

En este estudio se demostró y validó por experimentos el análisis simplificado termo-elasto-plástico y el modelo térmico estructural. Con base en esto, puede decirse que el método propuesto reduce significativamente la complejidad del proceso de análisis termo-elasto-plástico, así como el tiempo computacional de simulación. La evaluación del flujo de calor fue satisfactoria, por lo que el método propuesto para predecir deformaciones debidas a la línea de

calor, puede ser utilizado en el control y simulación de conformación de superficies de cascos de embarcaciones (Vaz y da Silva., 2010).

Como se ha podido apreciar, todos los trabajos realizados por líneas de calor han sido realizados utilizando programas de elementos finitos y analíticos, con validación experimental del trabajo de Jang, pero ninguno de ellos muestra propiamente un trabajo experimental comparativo de las diversas técnicas de calentamiento. Todo lo anterior nos permite dar cuenta de la importancia de nuestro objeto de estudio. En este sentido, nuestra investigación toma relevancia, porque no ha habido investigaciones a este nivel, específicamente no se ha abordado un trabajo que busque seleccionar la mejor técnica de corrección de deformaciones por líneas de calor.

2.3. Marco teórico

En esta sección determinaremos algunos componentes fundamentales en nuestra investigación, a saber: qué es una deformación, miraremos las clases de deformaciones, los diferentes métodos de enderezado y las técnicas de corrección de deformaciones por líneas de calor.

2.3.1. Deformaciones. En las últimas décadas la soldadura se ha convertido en el método de unión de metales más utilizado y de mayor demanda, debido a que su desarrollo se lo debe al gran avance tecnológico y a la implementación de metales de aporte, de tal forma, que se puedan unir muchos metales de diferentes composiciones. La soldadura permite la fusión de metales o unión metalúrgica debido a que es un proceso de aporte de metal fundido, el cual, produce excesivo calor y es depositado de forma puntual en los elementos a soldar, lo que crea

calentamientos y enfriamientos no uniformes, que ocasiona dilataciones, contracciones y distorsiones (Ajila, 2008).

La deformación en una soldadura se debe a la expansión no uniforme y a la contracción tanto del metal adyacente, como del metal de aporte durante el ciclo de calentamiento/enfriamiento. Muchos factores están involucrados, tornándose complicado realizar predicciones exactas de las deformaciones (González, 2006). Los esfuerzos resultantes por las deformaciones producen fuerzas internas causando contracción del material, la cual se le conoce como distorsión de elementos soldados. Estas distorsiones son un problema experimentado comúnmente en la fabricación de estructuras de espesor delgado. Son varios los factores que influyen en las estrategias de control de distorsiones y se pueden clasificar en: las relacionadas al diseño y las relacionadas al proceso.

Las variables significantes relacionadas al diseño, incluyen: detalle de las juntas, espesores de las placas, espesores de transición en juntas (consisten en placas de diferentes espesores), espaciamento entre refuerzos, condiciones de restricción mecánica, secuencia de ensamble y planificación de construcción total. Por otra parte, las variables importantes en el proceso, incluyen: calor de entrada, velocidad de desplazamiento y secuencia de la soldadura. (González, 2006).

En un principio, las prácticas de control de distorsión en la soldadura para estructuras de espesor delgado, se podían clasificar usando prácticas de diseño para tratar de hacer estructuras libres de deformaciones y fáciles de producir. Estos diseños incluían: elección de las placas con su espesor apropiado, reducción del espaciamento entre refuerzo, optimización en la secuencia de ensamble y aplicación correcta de plantillas. En cuanto al mejor control de las variables que contribuyen a eliminar las condiciones que producen distorsión, se incluía: la reducción del

número de filetes de soldadura y el largo, uso de altas velocidades de soldadura, uso bajo de calor en la entrada del proceso, uso de soldadura intermitente y un balance de calor sobre el eje neutro de la soldadura y en el ensamble de la junta soldada.

Por último, el uso de programas de soldadura incluía entrenamiento de personal para control de calidad de las prácticas de control, para reducir la distorsión a través del conocimiento, utilizando placas planas y refuerzos rectos para el control, además de las condiciones iniciales. En esta medida, la implementación de técnicas de corrección de soldadura contrarresta el efecto de contracción durante el proceso de soldado y su posterior enfriamiento.

En ese sentido, estas técnicas incluyen controlar el precalentamiento, las tensiones térmicas, mecánicas y las condiciones de fronteras, entre otras. Del tal modo, todas estas técnicas son un balance a las fuerzas de contracción de la soldadura y al calor sobre el eje neutro. Por consiguiente, el control de la expansión y contracción, es aplicado satisfactoriamente a una plancha con una llama-contracción. Con respecto a contraer la porción central de una plancha deformada, se dirige la llama de un soplete a una pequeña área localizada en el centro. El área se calienta rápidamente y se expande. Pero alrededor de la plancha (que esta fría) impide que la zona calentada se expanda en el plano de la plancha. La única alternativa es que la zona se expanda en el espesor.

En esencia, es en el espesor donde se aplica el calor. Al enfriarse, tiende a contraerse uniformemente en todas las direcciones. Realizándose cuidadosamente, la zona calentada, produce contracciones que son eficaces en la corrección de distorsiones provocadas por los previos ciclos. Con base en la noción de Ajila (2008), el ciclo térmico presentado en el proceso de soldadura produce una modificación geométrica, específicamente, en el volumen alrededor del cordón de soldadura o en la zona afectada por el calor. Esto, porque su calentamiento y

enfriamiento no son uniformes, produciéndose esfuerzos y cambios tanto en la dimensión como en la forma de la pieza. Estos cambios afectan las propiedades del metal soldado y su función para la cual fue diseñada, incrementando los costos de producción. Esto es a lo que denominamos distorsiones.

Por otro lado, como la mayoría de los procesos de soldadura implican calor, este proceso a altas temperaturas causa distorsiones, combado y esfuerzos residuales en la soldadura y además, el material calentado a una temperatura considerable por debajo del punto de fusión, se expande en todas las direcciones. Por eso, al enfriarse se contrae de igual manera en todas las direcciones. Según ciertas investigaciones, un metal se expande o se contrae en una misma cantidad al calentarse o al enfriarse a las mismas temperaturas sin restricción. Si el calentamiento de una pieza es uniforme y si no hay restricción, no hay deformación. En las aplicaciones prácticas no existen dilataciones ni contracciones libres, ni mucho menos calentamiento uniforme.

Por lo anterior, puede decirse que en soldadura desde el momento en que empieza el proceso de soldeo, se forma el charco de fusión que resulta de metal base y metal de aporte, creando así el metal de soldadura que presenta una alta temperatura en las zonas adyacentes al cordón, expandiéndose en función del coeficiente térmico y el resto permanece relativamente frío, contrayéndose y reduciéndose a través de lo ancho y lo largo de la soldadura.

La mayor parte de los elementos en las juntas soldadas en el proceso de soldeo, pocas veces genera calor uniforme a través de las secciones transversales de la junta, porque existen restricciones y estas siempre han de estar presentes para que las partes que se calientan y las que no alcanzan a calentarse tiendan a restringir la parte calentada a una temperatura mayor; así pues, los esfuerzos residuales toman lugar en forma longitudinal en el metal de soldadura solidificado

y en las regiones a los límites del metal se generan esfuerzos transversales, provocando encogimiento del cordón.

Hay que considerar que si estos esfuerzos no están en equilibrio en el enfriamiento hasta una temperatura ambiente, ellos buscan el equilibrio dando lugar a las distorsiones (Piñón, 2008). Cuando una pieza está sujeta por medio de bridas se producen distorsiones, principalmente en soldaduras de espesor delgado, donde la secuencia de soldeo no es adecuada y donde la soldadura no es simétrica. A modo de resumen, podemos decir, de acuerdo con Piñón (2008) que en la aplicación de procesos de soldadura se presentan algunas de las siguientes situaciones:

Primeramente, el metal de aporte y el metal base se dilatan y el metal aumenta de volumen, la dilatación no es uniforme cuando existen restricciones laterales en la pieza de trabajo, sino que es más perpendicular al plano de soldadura (tanto del metal base y el material de aporte) cuando existen restricciones laterales del metal base, esto genera esfuerzos internos de compresión en la HAZ (A mayor restricción, mayor esfuerzo; a menor restricción, bajos esfuerzos y la deformación es libre).

En el proceso de enfriamiento se presenta lo siguiente: el metal calentado tiende a recobrar su volumen a temperatura ambiente, aparecen esfuerzos residuales de tensión y compresión, que traen como efecto deformación al material. Según Piñón (2008), la deformación permanente se presenta cuando los esfuerzos residuales por el efecto de la dilatación y contracción del material sobrepasan el límite de fluencia y se generan como resultado los diferentes tipos de deformaciones:

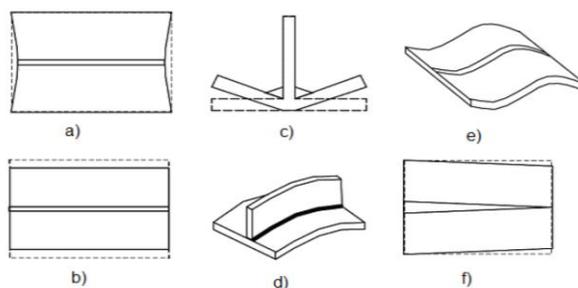


Figura 4. Tipos de distorsión presentes en piezas soldadas. a) Contracción longitudinal, b) Contracción transversal, c) Distorsión angular, d) Distorsión longitudinal o arqueo, e) Ondulado, f) Distorsión rotacional (Piñón, 2008)

En su orden, estos tipos de deformaciones son: (a) *Contracción longitudinal*: Es la contracción del metal en la dirección de la línea de la soldadura. (b) *Contracción transversal*: Es la contracción del metal que se produce en la dirección perpendicular a la línea central de la soldadura. (c) *Distorsión angular*: Cuando una placa gira en torno a la otra alrededor del cordón de soldadura, debido a la contracción del metal. (d) *Doblado longitudinal o arqueo*: Distorsión en el plano a través de la línea de soldadura y perpendicular a la placa soldada. (e) *Buckling u ondulado*: Distorsión causada por los esfuerzos de compresión que inducen inestabilidad. (f) *Distorsión rotacional*: Es una distorsión angular en el plano del metal base, como consecuencia de la expansión o contracción térmica.

2.3.2. Línea de calor. La técnica desarrollada consiste en la aplicación de líneas de calentamiento conforme con los diferentes métodos de corrección de deformaciones en láminas de espesores delgados (6,35 mm). Esta consiste en ubicar un foco de calor, el cual busca producir tanto dilataciones como contracciones en las placas de acero, con el objetivo de enderezar la estructura a lo deseado. En esta técnica se utiliza un soplete que es maniobrado por un especialista que inicia el movimiento del soplete en forma manual, a lo largo de la zona central de la placa o de la zona a calentar y posteriormente el refrigerante.

El éxito del proceso dependerá de la correcta aplicación del calor y del enfriamiento, por lo que es un procedimiento manual. Es por ello, que se requiere un personal calificado para lograr el objetivo, es decir, para mantener las características mecánicas del material. Esto representa ciertas desventajas, teniendo en cuenta que el movimiento de la fuente, el enfriamiento y la distancia de la antorcha a la placa no son uniformes, aumentando así, el número de horas de trabajo.

2.3.3. Métodos de enderezado. Una vez dado el proceso de soldadura, las diferentes técnicas de corrección juegan un papel importante en la corrección de dichas deformaciones. En esta sección, comentaremos sobre la aplicación de cada una de las técnicas de corrección más utilizadas en la industria naval y usada también en otros campos. El objetivo es revertir o modificar los componentes metálicos de las estructuras navales a una geometría adecuada. En nuestro caso particular, --la corrección de deformaciones-- abarcará la causa por tensiones liberadas, por enfriamiento irregular, o ya sea por causas externas como colisiones o tensiones liberadas después de trabajar unilateralmente, además de las tensiones de contracción actuantes irregularmente y de la aplicación de procesos de soldadura.

El propósito del enderezado es revertir, introducir o eliminar la deformación permanente no deseada en estructuras soldadas, a través de la aplicación de calor, utilizando diversas técnicas de corrección y llevar las piezas de trabajo que no se pueden elaborar de otra forma. En ambos casos los metales se contraen o se dilatan. Por otra parte, existen diferentes métodos para corregir deformaciones, entre los cuales tenemos: el enderezado por inducción, el método de enderezado en frío y el método de enderezado en caliente.

2.3.3.1. Enderezado por inducción. El enderezado por inducción utiliza una bobina para generar un calor localizado en zonas previamente definidas, las cuales al enfriarse se contraen y

la placa metálica se alarga hasta alcanzar la óptima condición deseada, lo más plana posible. Este método se utiliza para enderezar mamparos y cubiertas de buques, también es usado en la industria de la construcción y en la industria automotriz, entre otras.

De acuerdo con EFD Induction (s.f), la empresa líder mundial en técnicas de inducción, el método de enderezado por inducción se caracteriza porque es muy rápido, fácil y seguro, aumentando la productividad y reduciendo el tiempo en un 50% en comparación con los enderezados tradicionales. En este sentido, la inducción de calor es tan precisa que deja sin afectar las zonas del material adyacente y no se requiere quitar accesorios sensibles al calor; además, preserva las propiedades metalúrgicas.

2.3.3.2. Método de Enderezado en Frío. De manera general, este método de enderezado es aquel que se hace por medios mecánicos. En el *enderezado en frío* se aplican dos métodos: (1) *Enderezado manual:* es donde la estructura, pieza o perfil se lleva a la forma deseada a temperatura ambiente, dilatándose el elemento por medio del martilleo u otra técnica. (2) *Enderezado con máquinas:* este tiene que ver con las estructuras o planchas enteras que no se pueden reparar por lo complicado de las mismas estructuras y del tamaño de estas. Por ello, se hace necesario utilizar máquinas para lograr el objetivo y porque a menudo se hacen trabajos de rectificación (Bridges & Structures [s.f])

2.3.3.3. Método enderezado en caliente. Las deformaciones causadas por la soldadura u otros medios, se pueden corregir por el método de la llama, restableciendo las formas de componentes o estructuras deformadas y usando llama de calentamiento. Este es un método de reparación donde se aplica calor de manera localizada en las zonas deformadas plásticamente, en placas curvas o dañadas, utilizando el principio de dilatación y contracción térmica de los materiales metálicos, lo que lo hace un proceso asimétrico. La aplicación del calentamiento es

repetitiva y se usa un sistema de refrigeración que permite corregir de manera gradual el material, logrando un mayor rendimiento y mayor productividad en el ahorro de tiempos.

De cierto modo, si aplicamos una línea de calor se origina la dilatación y una leve tendencia a abultar; mientras que la contracción produce un leve exceso de espesor y el material se contrae transversalmente, siendo esta mayor en la cara calentada que en la opuesta. Esto lo hace diferente a otros métodos de corrección, por la característica de ser un proceso asimétrico, donde la corrección por calentamiento es gradual y no utiliza la fuerza. Puede afirmarse que una vez aplicada correctamente la técnica, garantiza seguridad y economía.

En esa medida, este método debe garantizar la integridad de los aceros y su rendimiento. Por lo tanto, debe cumplir las siguientes condiciones: a) Los efectos de la temperatura deben generar cambios micro-estructurales, lo que implica que al aplicar calor en el acero, este último no debe sobrepasar la temperatura crítica mínima. b) Por otro lado, la aplicación de líneas de calentamiento producen esfuerzos residuales, los cuales no deben exceder el límite elástico del acero en su estado caliente. Las líneas de calentamiento solo se deben aplicar alrededor de las zonas deformadas plásticamente.

Desde un panorama más amplio, se controlan las siguientes variables: velocidad de avance, la separación de la boquilla de la chapa, el control de temperaturas y la refrigeración adecuada. De estas variables depende el éxito en todas y cada una de las operaciones. De manera relevante, se hace necesario mencionar dos aspectos importantes en relación con las técnicas de corrección: (1) Éste procedimiento de corrección de deformaciones, se fundamenta en los principios de dilatación y contracción de los materiales metálicos, dependiendo de la dirección de la fuerza aplicada originalmente. (2) Cuando la zona de calentamiento ha alcanzado una temperatura entre los 600°C o 700 °C, es decir, cuando el acero adquiere un color rojo oscuro,

significa que ha alcanzado el límite aparente de elasticidad. Esto suele ser para acero común y a partir de estas temperaturas tendrá lugar la deformación plástica, sin regresar a su forma original, produciéndose una tensión de compresión.

Teniendo en consideración estos dos aspectos, describiremos el principio de enderezado por líneas de calor de la siguiente manera: la barra se calienta y a medida que se calienta, la barra intenta expandirse (figura 12a). Por su parte, el calor fluye siempre desde el área caliente hacia el área fría y durante el enfriamiento, el calor fluye dentro del área previamente fría, calentándola, pero encontrará otras fuerzas contrarias en las zonas frías. Por consiguiente, una protuberancia se producirá en la zona calentada por causa de la zona fría.

Posteriormente, en la medida en que el área dilatada comienza a enfriarse, se contrae, revirtiéndose la dirección de las fuerzas de deformación (figura 12b), que finalmente causa que la longitud de la zona superior de la barra se acorte y los extremos se levanten, dándole a la pieza un perfil cóncavo cuando se enfría, tal como se muestra en la Figura 12c.

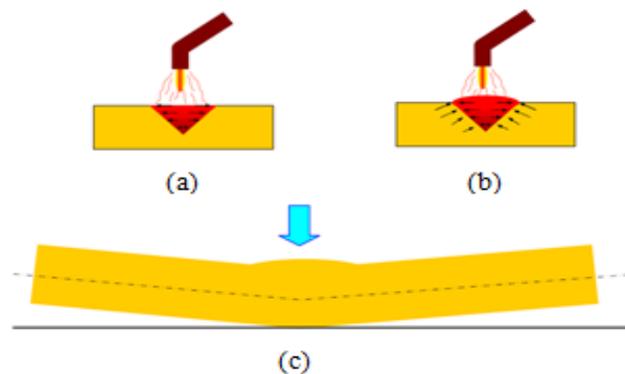


Figura 5. Clasificación de métodos o formas de calentamiento (Sampedro, 2010)

Los principios fundamentales y la metodología básica en relación con las técnicas básicas utilizadas en enderezamiento por llama, requieren de habilidad, práctica y experiencia de expertos. Así pues, exige de parte del operario aplicación de secuencia de calor, control de

temperatura y las fuerzas de apoyo que a criterio del experto se requieran. Para las diferentes formas de calentamiento se deben tener presente tres aspectos muy básicos: primero, seleccionar formas de calentamientos y su respectiva secuencia de aplicación de acuerdo a la necesidad.; segundo, controlar correctamente la temperatura de calentamiento, como la velocidad de calentamiento y enfriamiento; y tercero, proporcionar sistemas de seguridad adecuados durante el ciclo de calentamiento que puede ser relajado o modificarse durante el ciclo de refrigeración.

Existen múltiples formas de aplicar calor como lo podemos apreciar en el figura 13.

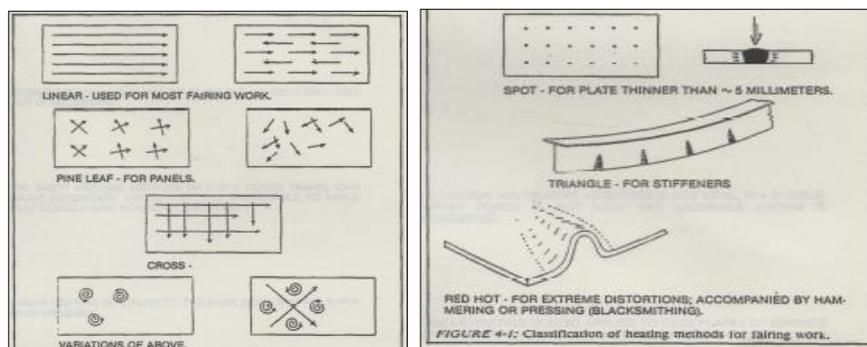


Figura 6. Formas de calentamiento

El *enderezado por llama*, también conocido como enderezado en caliente o a llama, es una técnica que requiere de un operario hábil, diestro y con experiencia, ya que las estructuras o planchas donde se ha aplicado calor (como en nuestro caso, aplicado en la soldadura), así lo requieren. El calor debe ser aplicado localmente y de manera rápida, con el propósito de evitar la dilatación; por otro lado, en la zona afectada por el calor se produce contracciones y al enfriarse se dilata en la misma zona en el proceso de enfriamiento, logrando así el objetivo de enderezado.

Existen tres formas de *enderezado por llama*: (1) Enderezado recto de perfiles y construcciones soldadas o torcidas; (2) enderezado de forma, donde la plancha o piezas en construcción rectas reciben un arqueo deseado; y (3) aflojar las tensiones de soldadura que se reducen.

2.3.4. Técnicas de corrección por líneas de calor. Entre las técnicas de corrección por llamas tenemos:

2.3.4.1. *Enderezado por llama con puntos de calor.* Esta técnica consiste en hacer calentamientos por punto, de forma redondeada desde el borde de la plancha hacia el centro, siendo estos individuales y no cercanos el uno del otro. Se empieza a calentar en la cima de la abolladura, donde el material se dilatará, pero se temple de manera inmediata colocando una esponja húmeda, donde las fuerzas de contracción tiran la abolladura en forma pareja desapareciendo la deformación. Así, pues, se utiliza para reparar daños localizados, tales como protuberancias, hendiduras, vientres o platos en un elemento de placa.

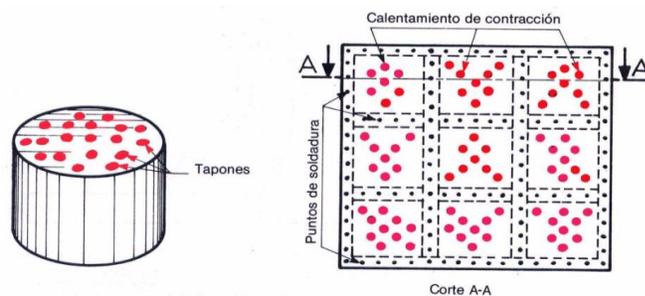


Figura 7. Enderezado por puntos de calor (Sampedro, 2010).

2.3.4.2. *Enderezado por línea de calor en V.* Debido al tamaño y al corto tiempo que se dispone para obtener fuerzas de contracciones óptimas en el enderezado de estructuras navales y perfiles de aceros, se requieren de sopletes de alta eficiencia. Estas fuerzas se pueden aumentar aprovechando su peso propio, colocándoles peso y haciendo un calentamiento simultáneo con

varios sopletes. El método más elemental para generar grandes esfuerzos de contracción son los triángulos. Enderezar planchas de acero con curvado, consiste en utilizar un soplete oxí-combustible para aplicar calor en forma de V, comenzando con calor localizado en el vértice de la zona en V.

Cuando alcanza la temperatura adecuada (entre 650 °C a 750 °C para el acero dulce al carbono), se hace avanzar el soplete hacia la base de la V de arriba abajo, realizando movimientos ondulados, lo cual hace el método más efectivo. El efecto mostrado según la figura 15a, es que la chapa dobla hacia arriba producto de la expansión longitudinal del metal por encima de la fibra neutra. La zona fría limita la expansión en dirección longitudinal, lo que hace que se abulte el espesor de la placa dando lugar a la deformación plástica. Una vez terminado el calentamiento, el calor aplicado es relativamente uniforme y es en este punto donde la chapa ha sufrido un desplazamiento hacia abajo como lo muestra la figura 15b, debido a la dilatación longitudinal por debajo de la fibra neutra.

Como el acero se enfría, el material se contrae longitudinalmente en mayor grado que la expansión durante el calentamiento. Por lo tanto, se produce una contracción neta. La afección neta es proporcional a la anchura a través de la “VEE”, por lo que la cantidad afectada aumenta desde arriba hacia abajo de la “VEE”. La contracción será mayor que la dilatación y el efecto curvado será menor cuando la velocidad de calentamiento es baja y la penetración del calor es mayor. (Sampedro, 2010).

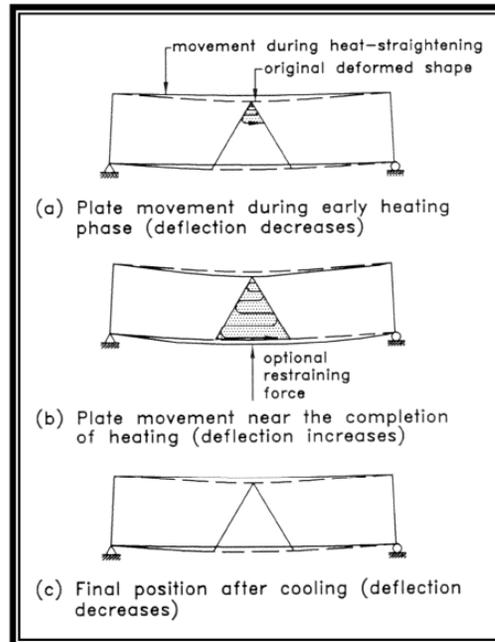


Figura 8. Etapas del movimiento durante el calor en Vee
(U.S. Department of Transportation. *Guide for Heat-Straightening*)

2.3.5. Líneas de calentamiento (Line heating). Este método consiste en aplicar líneas de calor con un soplete de una sola pasada y se utiliza para reparar curvas en una placa de acero. El procedimiento de corrección de deformaciones, se fundamenta en el principio de dilatación y contracción de los metales, originados por el calentamiento y enfriamiento o la combinación de las dos. Le aplicamos una línea de calor a una chapa soldada, la penetración del calor es importante y más porque el calor penetrado debe sobrepasar y en algunos casos también a la fibra neutra, aunque esto no afecta sustancialmente la eficacia del proceso. Empezar por aplicar calor por debajo de dicha fibra es lo recomendable para el técnico que ha de llevar a cabo la técnica.

Ahora bien, las fuerzas externas producen momentos de flexión al momento de aplicar líneas de calor por la parte inferior de la placa (Figura 16a), conforme se va avanzando con el soplete a través de la placa. Sin embargo, la distribución de la temperatura disminuye en el

espesor de la misma (figura 16b). Por ello, la zona fría encontrada por delante de la aplicación de la línea de calor, limita la expansión térmica aun cuando las restricciones externas estén presentes o ausentes. Debido al gradiente térmico, más protuberante o más caliente se hace en el lado de la aplicación del calor, contrayéndose durante el enfriamiento y generando un movimiento cóncavo en el lado de la placa donde se aplica el calor con el soplete (figura 16d).

Así que, para la corrección de la estructura doblada alrededor de su eje neutro, el calor se debe aplicar a la cara convexa de la placa deformada, ampliando el movimiento a través de las fuerzas aplicadas que dan lugar a los momentos de flexión en la línea de aplicación del calor. De acuerdo con la figura 16c, se nota que la sección transversal de la placa de la línea de calor y la expansión transversal de debajo de la plancha se reducen por los momentos de restricción, algo similar ocurre con el método de calor en V.

De manera que el metal tiende a dilatarse o alterarse a través del espesor y en el proceso de enfriamiento las restricciones tiende a incrementar la contracción transversal (figura 16d). En este proceso la velocidad de avance del soplete es muy crítica, por eso, determina la temperatura de fusión. En este sentido, con una velocidad de avance apropiada y las limitantes del proceso, la rotación se producirá sobre la línea de calor.

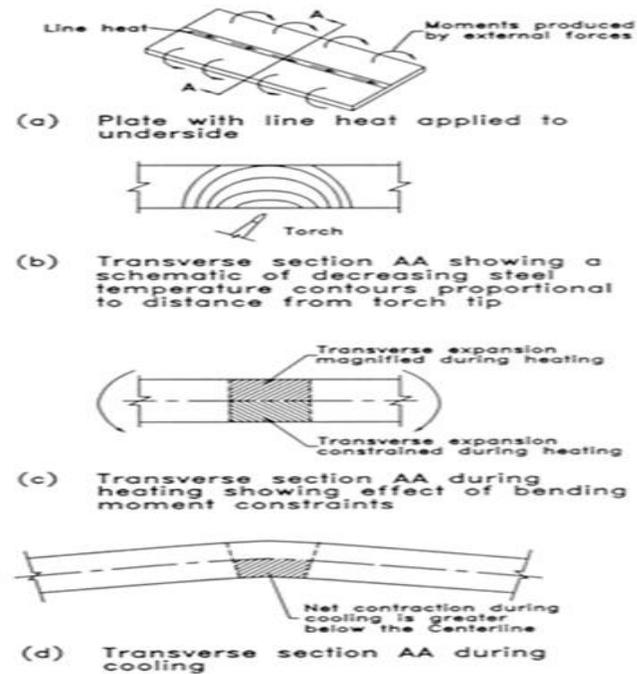


Figura 9. Esquema del mecanismo de línea de calor
(U.S. Department of Transportation. *Guide for Heat-Straightening*)

2.3.5.1. *Strip Heats.* Este procedimiento es similar al calentamiento en V y se puede hacer en varias alternativas: (1) Figura 17a: el soplete se mueve hacia atrás y hacia delante en forma de serpentina a través de la longitud deseada para lograr de manera secuencial la temperatura deseada. Este procedimiento es de gran importancia debido a que el calor puede ser iniciado en el centro de la franja a calentar acercándose a los bordes, pero con dos antorchas, con el propósito de minimizar la flexión alrededor del eje débil de la estructura o la viga. (2) Figura 17b: En este procedimiento se utiliza un solo soplete iniciando de un lado, dependiendo de la configuración estructural. (3) Figura 17c. La zona de calentamiento o del rectángulo se inicia en un borde libre, sin restricciones. La dirección tiene el efecto de producir algún eje débil de flexión, porque alterna el punto de iniciación a los bordes opuestos en los ciclos de calentamiento sucesivos y el eje débil de flexión puede ser minimizado.

De manera práctica y para efectos de nuestro estudio, seleccionamos el método enderezado en caliente, cuyas técnicas utilizadas en el proceso de enderezado fueron: las técnicas enderezadas con llama con puntos de calor y el método de enderezado por líneas de calor.

Lo anterior nos ofrece ventajas importantes para el alcance de los objetivos propuestos, por ejemplo, permiten: la precisión y una mayor productividad en la calidad de los trabajos, mayor expansión térmica, enfriamiento rápido y poca sensibilidad a la llama. De esta manera, obtenemos mejores resultados.

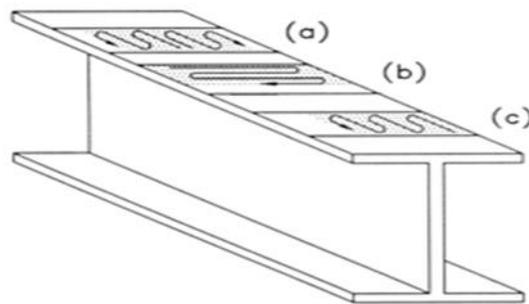


Figura 10. Esquema de calor tira en la brida de una viga laminada
(U.S. Department of Transportation. *Guide for Heat-Straightening*)

Capítulo III.

Metodología y Ensayo de Laboratorio

En este capítulo presentamos de manera detallada el procedimiento realizado para el desarrollo del trabajo de investigación, que permite establecer de manera objetiva los resultados esperados en la misma.

3.1. Metodología

Para el logro de los resultados u objetivos planteados en el trabajo, se realizó una serie de diferentes actividades enumeradas a continuación:

- 1.** Se realizó una extensa revisión bibliográfica sobre las técnicas existentes para la corrección de deformaciones producidas por soldadura.
- 2.** Se desarrolló un conjunto de pruebas de laboratorios de carácter comparativo, para determinar los parámetros que definirían cuál de las técnicas de corrección de deformaciones, sería la más económica, en función de las variables tiempo y cantidad de gas.
- 3.** Se caracterizó el comportamiento de cada una de las técnicas analizadas a partir de los resultados arrojados en las pruebas de laboratorios.

Para un mayor entendimiento del trabajo de investigación, hay que considerar que después de la revisión bibliográfica proseguimos en: (1) determinar las deformaciones o distorsiones y su clasificación. (2) se tuvo en cuenta los diferentes métodos de enderezado y las técnicas existentes para la corrección de deformaciones producidas por soldadura, con el objeto de determinar los efectos negativos de la soldadura en las estructuras metálicas de espesor

delgado y las distorsiones producidas por soldadura (cómo se producen las distorsiones debido a la soldadura, cómo se disminuyen y cómo se corrigen).

En consecuencia, se procedió a desarrollar un conjunto de pruebas de laboratorios de carácter comparativo para determinar en función de las variables tiempo y cantidad de gas, cuál de las técnicas es la más económica. Para ello, la metodología que se utilizó se realizó en dos secciones, una con aplicación de línea calor en placas planas y la segunda sección en placas curvas de igual dimensión.

El alcance del presente trabajo circunscribe sus límites al estudio de técnicas para la corrección de distorsiones por Línea de Calor en láminas de espesor delgado en la construcción naval. Es decir, los resultados evidenciados corresponden a estudio comparativo donde se ofrecen diferentes técnicas de aplicación de calor para corregir deformaciones. Los criterios optimización de tiempo y consumo de gas en placas curvas deben abordarse dentro de los límites temáticos y metodológicos correspondiente. Sin embargo, como estudio previo a este, aplicamos líneas de calor en placas planas para determinar el comportamiento o la relación entre las deformaciones, los parámetros de calor, el calor aplicado, la velocidad de la fuente y el espesor de la placa.

3.1.1. Ensayos de aplicación de líneas de calor en placas planas. Respecto a preparación para el ensayo cabe anotar que para el desarrollo de los experimentos se ejecutaron varias tareas previas a las pruebas de laboratorio en ambas secciones, con el propósito de medir los diferentes componentes de las distorsiones y las variables fundamentales del proceso. Así pues, se realizaron las siguientes actividades previas al desarrollo de los ensayos:

1. Corte de las láminas en un pantógrafo para garantizar la exactitud y la calidad del corte en cada una de las láminas, con las siguientes especificaciones: 300 mm de largo por 300 mm de ancho y con un espesor de 6,35 mm (1/4 pulgadas).

2. Se realizó un trazado de la lámina a distancias iguales, tanto transversal como longitudinal (dirección de aplicación de la línea de calor), en ambos lados de la placa. Tal y como se aprecia en la figura 18a. La distancia entre cada una de las líneas es de 60 mm.

3. Se punteó cada intersección con un granete, con punta de 45 grados, para garantizar la medición de cada punto (ver figura 3.18b), estableciendo una referencia para la toma de medidas. La distancia longitudinal y transversal entre cada par de puntos es de 40 y 20 mm, respectivamente; estas dimensiones se establecieron en común acuerdo con el asesor de tesis, para optimizar al máximo el área de la probeta. Las distancias establecidas permiten determinar la expansión o encogimiento que genera la aplicación de calor en cada una de las líneas y de esta manera calcular los cuatro componentes de la deformación (encogimiento transversal y longitudinal, y la flexión transversal y longitudinal). Por ello, quedó la línea de calor equidistante a los puntos de intersección de la medida mayor.

4. En el siguiente paso, preparamos los registros para tabular los datos que se tomarían en cada uno de los ensayos de las placas planas, conforme a la figura 19, donde PL significa los puntos de medición longitudinal y transversal.

A continuación se presentan las imágenes que ilustran tanto el trazado de las láminas por ambos lados como la planilla para el registro de los datos. Veamos:

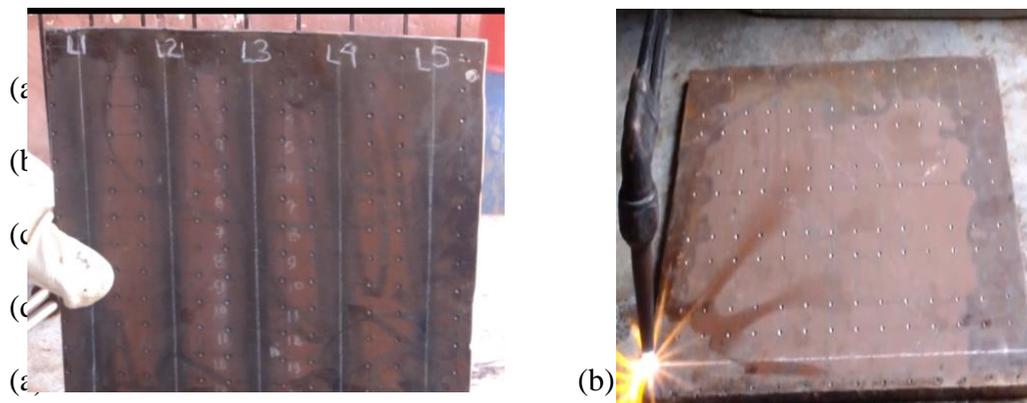


Figura 11. Trazado de la lámina en ambos lados

puntos de referencia transversal	Antes de aplicar calor	Despues de aplicar calor. Línea 1	Antes de aplicar calor	Despues de aplicar calor. Línea 2	Antes de aplicar calor	Despues de aplicar calor. Línea 3	Antes de aplicar calor	Despues de aplicar calor. Línea 4	Antes de aplicar calor	Despues de aplicar calor. Línea 5
P0 - P1										
P1 - P2										
P2 - P3										
P3 - P4										
P4 - P5										
P5 - P6										
P6 - P7										
P7 - P8										
P8 - P9										
P9 - P10										
P10 - P11										
P11 - P12										
P12 - P13										
P12 - P14										
P14 - P15										
P15 - P16										

Figura 19. Planilla para tabulación de medición

Un dato importante es que se hace necesario, que para la aplicación del calor, el personal técnico tenga la habilidad y la destreza, y que domine la técnica de aplicar calor por debajo de la fibra neutra, para así poder alcanzar los resultados esperados. Esto debido a que si la velocidad de avance es muy lenta no se produce la deformación por pandeo en la lámina, solo se contrae; y de otro modo, si la velocidad es muy rápida, la penetración de calor es menor, por lo que la

contracción se reduce exponencialmente y el metal no logra calentarse como corresponde.

Podemos decir entonces, que la velocidad recomendada está entre 5 y 15 mm/seg.

Por lo anterior, el procedimiento de aplicación de líneas de calentamientos en placas planas se llevó acabo de la siguiente manera: inicialmente se tomó una placa plana de dimensiones de 300 mm x 300 mm x 6 mm, en la cual se trazaron de manera equidistante cinco líneas rectas en toda la lámina, como se muestra en la Figura 18a. Teniendo la probeta debidamente trazada y antes de aplicar la primera línea de calor se definieron los parámetros de trabajo del gas carburante y del gas combustible. Así que, para el oxígeno la presión de trabajo en el regulador fue a razón de 40 psi, la presión de trabajo en el regulador del gas propano fue de 7 psi, así como la Velocidad de calentamiento, y el tiempo empleado en cada técnica (segundos), nos permitió medir cada uno de los componentes de las deformaciones generadas por las líneas de calor.

Entre los materiales utilizados para la realización de estos experimentos tenemos, las láminas de acero naval, según la clasificación ASTM A-131 GRADO A (se utilizaron alrededor de (20) veinte probetas de acero, según especificación antes mencionada, totalmente planas y bien cortadas). En relación con los equipos se utilizó un equipo de oxicorte marca Víctor, con sus respectivos accesorios como reguladores de presión, sopletes y los cilindros de gas propano de 40 lbs y oxígeno de 6 m³, además de una boquilla N° 5, de la misma marca del soplete.

Entre los instrumentos de medición utilizamos el Calibrador Vernier o Pie de Rey, para medir las distancias entre puntos tanto transversal como longitudinal, medidor de temperatura, un flexómetro, un martillo de bola de 3 lbs, una tiza industrial y un granete, con el fin de remarcar los puntos de trazado

3.2. Desarrollo del Ensayo

Iniciamos tomando todas las medidas tanto longitudinal, como transversal antes de aplicar la primera línea de calor, (la técnica para medir las distancias entre puntos fue un calibrador Vernier o pie de rey) y las registramos en las planillas antes mencionadas figura 19; y con la secuencia para cada línea de calentamiento registrada en la figura 20. Es decir, longitudinalmente desde los puntos P0-P1, P1-P2 y así sucesivamente hasta P14-P15; y transversalmente desde los puntos P0-P1, P1-P2 y así sucesivamente hasta P15-P16. Esta medición se hace tanto en la zona o cara de aplicación del calor como en el dorso de la placa de acero.

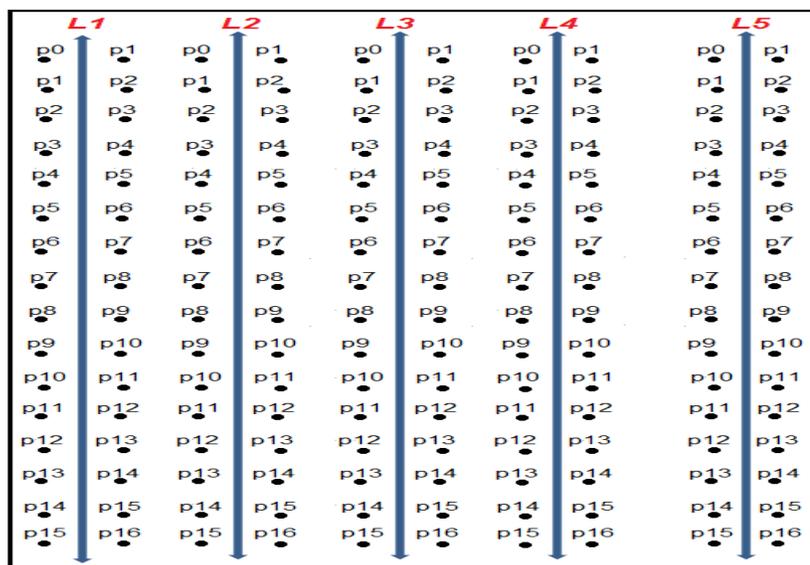


Figura 20. Guía para registros de información de los experimentos

Teniendo estas especificaciones se procede aplicar la primera línea de calor. El calentamiento se origina por una fuente de calor, con una llama carburante, (más gas combustible, cuya flama es de color amarillo) colocando la boquilla del soplete en el borde de la lámina de acero y a una altura de 10 mm de la placa, se calienta el borde esperando una

determinada temperatura de 600 °C, una vez la chapa se calienta presentando un color rojizo en el borde, pero sin fundirse, se empieza a avanzar a razón de 10 mm/seg, desplazando el soplete a lo largo de la línea trazada, manteniendo el punto rojo que se inició en todo el recorrido, sin regresar en ningún momento, la aplicación de la línea de calor en su recorrido es sin vaivenes ni zigzag, y sin movimiento en otra dirección que no sea la de la línea marcada.

Una vez aplicada la primera línea de calor se deja enfriar a temperatura ambiente por un tiempo de 2 horas, estando fría la placa se toman nuevamente todas las medidas tanto a lo largo como a lo ancho de la misma placa, en cada uno de los puntos trazados tanto en la superficie donde se aplicó el calor como al respaldo, y se registra cada dato en la planilla antes mencionada, convirtiéndose estas nuevas medidas en el referente para las nuevas líneas de calor a aplicar, para así calcular los diferentes componentes de las deformaciones generadas por cada línea de calor.

Este procedimiento se realiza para cada una de las líneas de calor trazadas en la lámina. Para nuestro estudio por láminas son cinco (5). Una vez aplicada la línea de calentamiento y enfriada la placa, vemos que la lámina experimenta deformaciones transversal y longitudinalmente, debido a que la deformación “óptima” se origina siempre que la penetración del calor alcance la fibra neutra. Si no se produce la deformación angular es porque la velocidad de avance fue muy lenta o muy rápida.

3.2.1. Medición de los componentes de las deformaciones. Posterior al registro de la información arrojada por la aplicación de cada una de las líneas de calor, se realizan los cálculos de cada uno de los componentes, producto de la deformación generada por las líneas de calor tales como: el encogimiento transversal, flexión transversal, encogimiento longitudinal y la flexión longitudinal.

El cálculo de la deformación aparente, lo realizamos basándonos en la figura. 20. Este consiste en seleccionar dos filas de nodos en la parte central de la superficie de calentamiento y la posterior a ella, tanto en la dirección “x” (transversal) como en “y” (longitudinal) con un ancho de 40 mm y 20 mm respectivamente, teniendo en cuenta que a esta distancia se ha incluido en la parte elástica del material. Luego se procede a calcular las deformaciones por medio de las siguientes ecuaciones (1), (2), (3) y (4) (Vega, 2009).

$$1. \text{ Encogimiento transversal} \quad \delta_i = \frac{(X_1 + X_2)}{2}$$

$$2. \text{ Flexión transversal} \quad \delta_i = \frac{(X_3 - X_4)}{2}$$

$$3. \text{ Encogimiento longitudinal} \quad \theta_i = \frac{(Y_1 + Y_2)}{2}$$

$$4. \text{ Flexión longitudinal} \quad \theta_i = \frac{(Y_3 - Y_4)}{2}$$

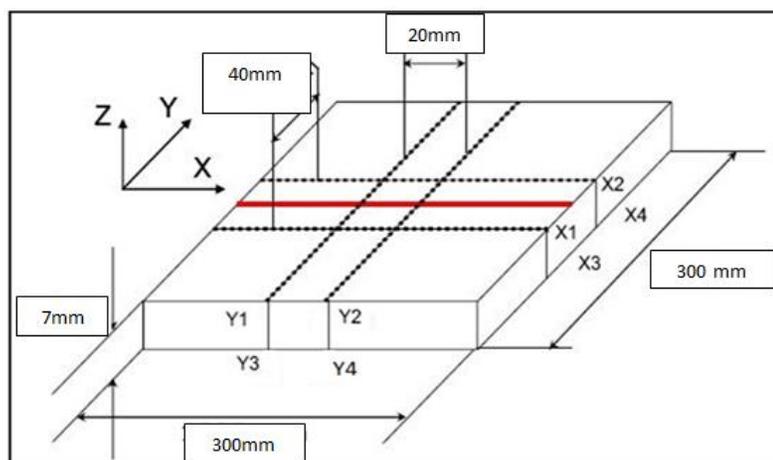


Figura 12. Deformación Aparente

Dónde: δ_i : es la deformación transversal o longitudinal, v : toma el valor de los nodos ya sea en x o en y ; θ_i es la deformación angular transversal o longitudinal. En nuestro caso se realizó el análisis por el método de deformaciones aparentes, tomándose dichas deformaciones en la

frontera o límite entre la región plástica y elástica, de tal manera que los datos tuvieran el comportamiento de deformación inherente que incluye las deformaciones plásticas, lo cual es aún más complicada de calcular tanto en modelado como en experimentos.

3.2.2. Ensayos de aplicación de líneas de calor en placas curvas. En la segunda sección, relacionada con las placas curvas como lo indica la figura 22, se desarrolló un conjunto de pruebas de laboratorios de carácter comparativo para determinar en función de las variables tiempo y cantidad de gas, cuál de las técnicas de aplicación de calor representaba menor costo entre los procesos. Así, para desarrollar estos experimentos nos apoyamos en las técnicas mencionadas en el capítulo 2 de la investigación y de esta forma caracterizamos el comportamiento de cada una de las técnicas analizadas a partir de los resultados arrojados en las pruebas de laboratorios.

3.2.3. Preparación para el ensayo. Al igual que en la sección para placas planas, también se ejecutaron varias tareas previas a las pruebas de laboratorio, con el propósito de determinar cuál de las técnicas de aplicación de calor era la más económica en tiempo y consumo de gas, estas como parte del conjunto de las variables fundamentales del proceso. Por tanto, se realizaron las siguientes actividades previas al desarrollo de los ensayos:

Primero: se realizó un corte de las láminas en un pantógrafo para garantizar la exactitud y calidad del corte en cada una de ellas, teniendo en cuenta las siguientes especificaciones: 300 mm de largo por 300 mm de ancho y con un espesor de 6,35 mm (1/4 pulg.). *Segundo:* Se hizo un doblado de las láminas en una plegadora con el propósito de obtener una curvatura de 5 mm de alto, tal como se indica en la figura 22. Tercero: También se llevó a cabo el trazado de las diferentes láminas correspondiente a cada técnica en particular. El trazado se hizo a distancias iguales tanto transversal como longitudinalmente (dirección de aplicación de

la línea de calor) en el lado de la superficie, zona donde se aplicó el calor (ver figuras, 24, 25, 26, 27 y 28). *En cuarto lugar*, se prepararon los registros para tabular los datos que se tomarían en cada uno de los ensayos a realizar en placas curvas, conforme se muestra en la figura 23, donde P significa los puntos de medición longitudinal y transversal.

Ahora bien, de acuerdo a cada técnica se tomó una placa curva cuyas dimensiones fueron ya descritas, en cada una de estas se trazaron de manera equidistante cinco (5) líneas rectas en toda la lámina, como se muestra en la Figura 22. Esto último como referencia al trazo de cada una de las técnicas a aplicar.

Para el caso de la 1ª técnica titulada “*Técnica de aplicación de calor por segmentos pequeños*” (placa A), se trazaron 15 segmentos de 2 pulgadas de longitud, cada una distribuida equidistantemente en dirección longitudinal y transversal. Así también, para la 2ª Técnica referida con el nombre de “*Técnica de aplicación de líneas de calor en sentidos de Vaivén*” (placa C), se trazaron cinco (5) líneas equidistantes. Luego para la 3ª técnica de “*Aplicación de calor por segmento en el centro de la placa*” (Placa L), se trazaron cinco (5) líneas con una longitud de 200 mm a 50 mm del borde de la placa en dirección longitudinal. En el caso de la 4ª técnica, denominada “*Técnica de líneas de calor en una misma dirección*” (placa G), se trazaron cinco (5) líneas equidistantes. Finalmente, con la 5ª “*Técnica de aplicación de calor por punto*” (placa J), se trazaron 25 puntos equidistantes con un radio de 5 mm (ver figura 22).

Consecuentemente, teniendo la probeta debidamente trazada y antes de aplicar la primera línea de calor, se tomaron las diferentes medidas registrándolas en el formato de la figura 19. Así pues, se procedió a establecer las siguientes condiciones de trabajo: presiones de trabajos del gas carburante y del gas combustible para el oxígeno, la presión de trabajo en el regulador que fue a razón de 40 psi, la presión de trabajo en el regulador del gas propano que fue

de 7psi, así como la Velocidad de calentamiento y el tiempo empleado en cada técnica (segundos), que nos permitió realizar los cálculos respectivos de cada una de las variables que intervinieron en el proceso.

Entre los materiales utilizados para la realización de estos experimentos tenemos láminas de acero naval, según la clasificación ASTM A-131 GRADO A, se utilizaron alrededor de quince de estas totalmente curvas y bien cortadas. En relación con los equipos se utilizó uno de oxicorte marca Víctor, con sus respectivos accesorios: reguladores de presión, sopletes y los cilindros de gas propano de 40 lbs y oxígeno de 6 mts³, y una boquilla N° 5 de la misma marca del soplete. Entre los instrumentos de medición utilizamos el Calibrador Vernier o Pie de Rey, para medir las distancias entre puntos tanto transversal como longitudinal, medidor de temperatura, un flexo metro, un martillo de bola de 3 lbs, una tiza industrial y un granete, con el fin de remarcar los puntos de trazado, una mesa de trabajo nivelada y un nivel de gotas.

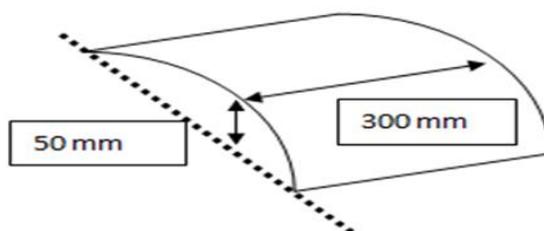


Figura 13. Placas curvas con sus respectivas dimensiones

PLACA			
No de puntos	Después de aplicar calor	Antes de aplicar Calor	Diferencias

Figura 14. Tabla para la recolección de datos Placas curvas

3.2.4. Ejecución del ensayo. Una vez dispuesto el material y teniendo las especificaciones de trabajo se procedió a hacer la llama, utilizando también una fuente de calor con una llama carburante (más gas combustible, cuya flama es de color amarillo), colocando la boquilla del soplete a una altura de 1cm de la placa, se aplicó calor a una temperatura de 600 °C, una vez la chapa se calienta presentando un color rojizo sin fundirse, se empieza a avanzar, desplazando el soplete a lo largo de la línea de acuerdo a las respectivas técnicas.

Durante el procedimiento se regula la velocidad de avance del soplete a razón de 5 mm/seg, se verifica el consumo de oxígeno y gas propano al final de la aplicación del calor y se enfría a temperatura ambiente aproximadamente 2 hrs., hasta que esté completamente fría la probeta, tomando nuevamente las medidas y estos datos se tabularon en la planilla (la figura 23). Es importante observar que las características de la llama se mantuvieron hasta realizar cada una de las técnicas para garantizarles las mismas condiciones a todas. El procedimiento se realizó en el siguiente orden y con las siguientes características:

Técnica 1. Técnica de aplicación intermitente (Placa A). Para esta técnica, las líneas de calor se realizaron en longitud de 2 pulgadas en la misma dirección, la velocidad de avance fue de 5 mm/seg. Y el tiempo de aplicación fue de aproximadamente de 15 segundos y la distancia entre líneas fue de 2,5 pulgadas (ver figura 24).

Técnica 2. Técnica de aplicación de líneas de calor Strip Heats en sentidos de Vaivén (Placa C), titulada en la presente investigación como Strip Heats. En esta las líneas de calor se aplicaron a todo lo largo en direcciones opuestas, la velocidad de avance fue de 5 mm/seg, el tiempo de aplicación de calor en cada línea fue de 60 seg y la distancia entre líneas fue de 2,5 pulgadas (ver figura 25).

Técnica 3. Aplicación de calor en el centro de la placa (Placa L). Al igual que las anteriores, en esta técnica las líneas de calor se aplicaron en la misma dirección y de manera alternada, la longitud de cada línea fue de 8 pulgadas, a partir de 2 pulgadas del borde de la placa según evidencia, la velocidad de avance fue de 7 mm/seg aproximadamente y el tiempo de aplicación de calor en cada línea fue de 45 segundos (ver figura 26).

Técnica 4. Líneas de calor (Line heating) (Placa G). En esta técnica, la aplicación del calor se realizó en la misma dirección, a todo lo largo y alternada, el tiempo de aplicación de calor por línea fue de 60 segundos, la distancia entre las 5 líneas fue de 2.5 in y la velocidad de avance fue de 5 mm/seg aproximadamente (ver figura 27).

Técnica 5. Técnica de aplicación de calor por puntos (Placa J). Por último, en esta el tiempo de calentamiento de cada punto fue de 5 segundos, la distancia entre puntos es de 2 in y el calentamiento se realizó de manera salteada. (ver figura 28).



Figura 15. Aplicación de calor por segmento de 2 pulgadas



Figura 165. Aplicación de líneas de calor en sentidos contrarios



Figura 17. Aplicación de calor por segmento en el centro de la placa



Figura 18. Aplicación de líneas de calor en una misma dirección



Figura 19. Aplicación de calor por puntos
(Placa T5-J)

Una vez aplicada cada técnica y después de haber ejecutado varias pruebas de laboratorio, se procedió a realizar los cálculos respectivos con el fin de obtener la técnica más

económica (tiempo y consumo de gas), que garantizará la mayor reducción de la deformación inducida en las placas.

3.3. Cálculos de cada una de las variables de las pruebas de laboratorio

En el proceso de enderezado por llama existe una serie de variables y elementos que deben conocerse para obtener resultados satisfactorios cuando se desea corregir deformaciones en una placa de acero, estas variables y elementos determinarán la técnica más económica en la corrección de deformaciones. En este sentido, podemos decir que las principales variables de operación son: a) Gases combustibles; b) Presión de gas; c) Consumo de gas; d) Velocidad de avance de la boquilla; e) Velocidad de la flama; f) Tiempo de calentamiento

1. *Tiempo de calentamiento.* Tiempo total de aplicación de calor [seg] = No líneas / de puntos calentadas* X Longitud de cada línea calentada [mm] (5).

2. *Longitud total de aplicación de calor.* Longitud Total de aplicación de calor [mm] = No líneas / de puntos calentadas* X Longitud de cada línea calentada [mm] (6).

3. *Área total y volumen de acero calentado.* Área de acero calentado [mm²] = Diámetro de la Boquilla No 5 [mm] X Longitud Total de aplicación de calor [mm] (7).

4. *Volumen de acero calentado* [mm³] = Espesor de la placa [mm] X área de acero calentado [mm²](8).

3.3.1. Gases combustibles. Una variable importante dentro del enderezado son los gases; los aspectos a tener en cuenta son: su velocidad de calentamiento, el costo del gas, costo inicial del equipo y costo de mantenimiento. Para obtener una llama de calentamiento para el enderezamiento se requiere usar oxígeno con cualquier gas combustible que nos permita lograr

un rápido calentamiento localizado, que por lo general está determinado por la temperatura y la intensidad de la llama.

El acetileno es el gas combustible más utilizado, debido a que proporciona la llama más caliente y concentrada, según indican las figuras 29 y 30. Para nuestro trabajo de investigación hemos utilizado el gas propano por ser el más económico (AGA CW-859sp 9809-2000).

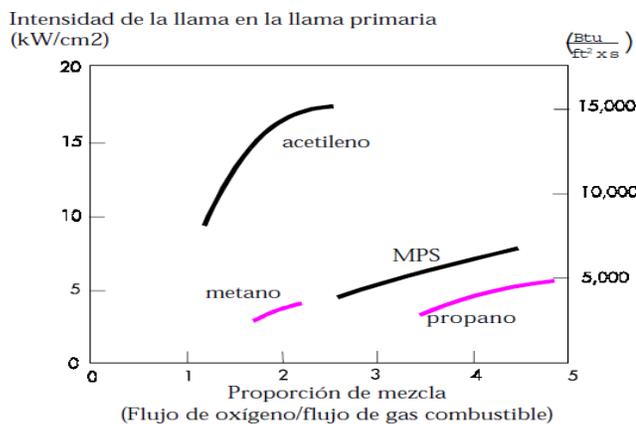


Figura 29. Intensidad de la llama en la llama primaria, como una función de la proporción de mezcla para los diferentes gases combustibles (AGA CW-859sp 9809-2000)

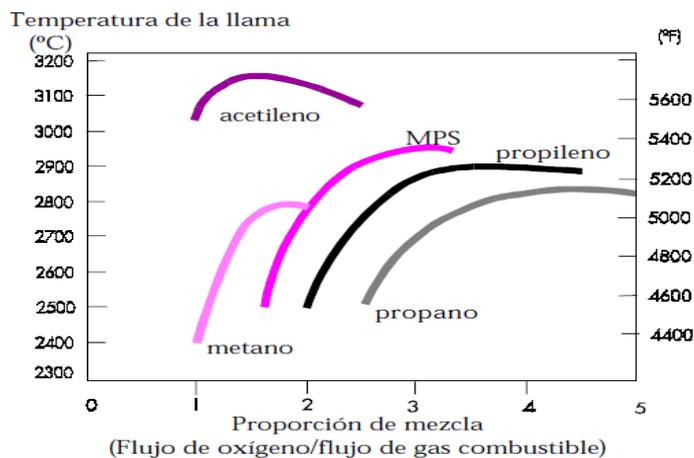


Figura 20. Temperatura de la llama en la llama primaria, como una función de la proporción de mezcla para los diferentes gases combustibles (AGA CW-859sp 9809-2000)

Los gases de mayor interés comercial clasificados por su intensidad de combustión o salida de llama específica (estos gases están mezclados con oxígenos a razones metalúrgicas útiles), así como los valores de velocidades normales de quemado y valores caloríficos de mezcla se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Gases combustibles Utilizados para Endurecimiento por Llamas (Reproducida del ASM Handbook, Heat Treating 1996)

Gas	Valor calorífico		Temperatura de la flama				Razón usual	Valor calorífico de mezcla oxi-combustible		Velocidad de la flama		Intensidad de combustión		Razón usual aire-comb
			Con oxígeno		Con aire									
	j/m ³	tu/ft ³	C	F	C	F		j/m ³	Btu/ft ³	m/se g	ulg/s eg	mm/seg X Mj/m ³	Pulg/seg X Btu/ft ³	
Propano	3,9	520	635	775	925	925	8,8	504	305	12	5734	6048	25	

(Méndez y Valdez, 2005).

La intensidad de combustión se puede calcular matemáticamente multiplicando la velocidad de la llama normal por el valor calorífico de la mezcla de oxígeno y gas combustible, según se muestra en la tabla 2: Intensidad de combustión = $V_q \times Q_{cal}$ (9)

Dónde:

V_q : Velocidad de la llama normal

Q_{cal} : Valor calorífico de la mezcla de oxígeno y gas combustible

Un factor importante para seleccionar un combustible tiene que ver con la proporción de oxígeno, debido a que define la máxima eficiencia de calentamiento del combustible, así es como esta proporción nos permite determinar la temperatura de la llama (Méndez y Valdez, 2005).

3.3.2. Presión de Gas. Las presiones del oxígeno y del propano que son obtenidas por la cantidad de calor administrado, deberán ser controladas exactamente para la entrega uniforme de calor, porque este factor influye mucho en la profundidad del calentamiento. La experiencia del técnico experto es muy fundamental para cuantificarla, ya que no puede especificarse un valor único de presión para ambos gases, sino más bien, se debe manejar un intervalo de presión de trabajo. Así también, ajustar la presión de trabajo de acuerdo al tipo o calibre de boquilla que se utilice siempre es más seguro, debido a que debemos seguir recomendaciones del fabricante para el soplete particular que se utiliza.

3.3.3. Consumo de gas. El consumo de gas tiene que ver con la velocidad de la llama, el tamaño de los orificios de la llama o boquilla y el tiempo de calentamiento. El consumo de gas en el enderezado por llama varía con el espesor de la placa a corregir. El consumo de gas es proporcional al espesor de la placa. La combinación de gases para nuestro trabajo de investigación es el Gas Propano y oxígeno, cuya temperatura de la llama es normalmente entre 2700 °C (4900°F) a una razón de 5:1; 2540 °C (4600 °F), a una razón de 4:1; y 2730 °C(4300 °F) a razón de 3:1; De acuerdo con (Méndez y Valdez, 2005). Las fórmulas utilizadas para el cálculo de caudal y volumen de gas consumido son las siguientes:

3.3.3.1. Información del caudal.

1. Caudal de la mezcla oxi-propano $[\text{mm}^3/\text{seg}] = \text{Velocidad de la llama} [\text{mm}/\text{s}] \times \text{Área del diámetro de la boquilla N}^\circ 5 [\text{mm}^2]$ (10).
2. Caudal de la Proporción de Propano en la mezcla $[\text{mm}^3/\text{seg}] = \text{Caudal de la mezcla oxi-propano} [\text{mm}^3/\text{seg}] / 5$ (11).
3. Caudal de la Proporción de Oxígeno en la mezcla $[\text{mm}^3/\text{seg}] = \text{Caudal de la Proporción de Propano en la mezcla} [\text{mm}^3/\text{seg}] \times 4$ (12).

3.3.4. Cálculos de volumen áreas y longitudes calentadas.

1. Volumen de Oxígeno por línea de calor [mm³] = Caudal de la Proporción de Oxígeno en la mezcla [mm³/seg] X Tiempo de aplicación de calor por puntos o líneas de calor [seg] (13)
2. Volumen de Gas Propano por línea de calor [mm³] = Caudal de la Proporción de Propano en la mezcla [mm³/seg] X Tiempo de aplicación de calor por puntos o líneas de calor [seg] (14)
3. Volumen Total de Oxígeno consumido [mm³] = N° líneas / de puntos calentadas* X Volumen de Oxígeno por línea de calor [mm³] (15)
4. Volumen Total de Gas Propano consumido [mm³] = N° líneas / de puntos calentadas* X Volumen de Gas Propano por línea de calor [mm³] (16)

3.3.5. Velocidad de Avance en el Calentamiento. Depende de la capacidad de calentamiento de la boquilla, de las velocidades de avance (suministro) de la boquilla sobre la superficie, además, de la capacidad de calentamiento de la misma, de la profundidad de la llama requerida, de la composición, de la forma de la pieza y del tipo de enfriamiento usado. Normalmente el promedio utilizado en el experimento fue de 5 mm/s (12 pulg/min).

La velocidad de avance de la boquilla, deberá ser constante para obtener resultados uniformes calentando gradualmente la placa para asegurar que la línea de calor mantenga la temperatura y la profundidad de calentamiento apropiada.

3.3.6. Velocidad de la Llama La velocidad de la llama o velocidad de combustión la podemos definir como la velocidad a la cual se propaga una llama en un conducto. La velocidad de combustión depende de variables como: (1) proporciones de oxígeno y de gas combustible

(ver figura 29); (2) temperatura y presión de la mezcla de los gases; (3) turbulencia en el flujo de gas. La velocidad de salida del gas es el caudal en el orificio de la boquilla. Cuando una llama se está quemando de forma estable en la abertura de la boquilla, hay un equilibrio complicado entre la velocidad de combustión de la mezcla de gases y la velocidad de salida del gas (AGA AB, 1993).

Capítulo IV.

Modelo experimental y Análisis de Resultados

En el presente capítulo presentamos el modelo matemático implementado en esta investigación, los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y su respectivo análisis, con el objetivo de seleccionar la técnica de aplicación de calor que corrige la mayor deformación en el menor tiempo de entrega y consumo de gases en un proyecto de construcción naval. Estos resultados se emplean a sí mismo para la posterior validación del método desarrollado.

5.1. Método Experimental: Software Utilizado en la Investigación

Para la realización del análisis de los datos de nuestro experimento, utilizamos un software llamado STATGRAPHICS CENTURION XVII. Este software de computadora (herramienta CASE, Análisis Estadístico Asistido por Computadora) nos permite realizar operaciones, graficaciones estadísticas, y algunas operaciones avanzadas para ejecutar y llevar finalmente a la toma de decisiones en el recorrido de la investigación. A través de este software, pretendemos de acuerdo a los resultados y al análisis de los mismos, seleccionar la mejor técnica de corrección de distorsiones, que minimice el tiempo de entrega, el consumo de gases en un proyecto de construcción naval y minimice la deformación en placas curvas.

5.1.1. Modelo matemático del diseño de experimento. Nuestro modelo matemático, se expresa de la siguiente forma:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

Y corresponde a un diseño de experimentos en bloques aleatorizado, manifestado como DBCA de efectos fijos.

Dónde:

Y_{ij} = Medición de la variable de respuesta (tiempo de entrega, el consumo de gases y deformación en placas curvas) en la i -ésima de corrección de calor con la j -ésima líneas de calor.

μ = Media global poblacional o de todas las mediciones Y_{ij} .

τ_i = Efecto medio sobre la variable respuesta (Y_{ij}), debido a la i -ésima Técnicas de corrección de calor ($i=1, 2, 3, 4, 5$).

γ_j = Efecto medio sobre la variable respuesta (Y_{ij}), debido a la j -ésima líneas de calor ($j=1, 2, 3, 4, 5$).

ε_{ij} = Error aleatorio atribuible a la medición de las variables de respuestas, bajo el supuesto de normalidad, independientes e idénticamente distribuidas.

5.2.Tratamientos

Los datos se recogen en la siguiente tabla \tilde{Y}_{11}

Técnicas de calor						Total	Líneas de calor
1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}	Y_{15}	Y_{1j}	Y_{1j}
2	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	Y_{25}	Y_{2j}	Y_{2j}
3	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	Y_{35}	Y_{3j}	Y_{3j}
4	Y_{41}	Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}	Y_{45}	Y_{4j}	Y_{4j}
5	Y_{51}	Y_{52}	Y_{53}	Y_{54}	Y_{55}	Y_{5j}	Y_{5j}
Total	Y_{I1}	Y_{I2}	Y_{I3}	Y_{I4}	Y_{I5}	Y_{IJ}	
Media Técnicas	\tilde{Y}_{i1}	\tilde{Y}_{i2}	\tilde{Y}_{i3}	\tilde{Y}_{i4}	\tilde{Y}_{i5}		\tilde{Y}_{ij}

Figura 21. Diseño de bloque completamente aleatoria DBCA (Gutiérrez y De la Vara, 2008)

En este diseño DBCA de efectos fijos se consideran tres *fuentes de variabilidad*: el *factor de tratamientos*, el *factor de bloque* y el *error aleatorio*.

5.3. Hipótesis a Probar

Para este diseño comparativo se requiere el planteamiento de algunas hipótesis, la primera llamada *hipótesis nula* y la otra *hipótesis alternativa*, las cuales se expresan de la siguiente manera:

$$\text{Hipótesis Nula } \mathbf{H}_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_5 = \mu$$

$$\text{Hipótesis alternativa } \mathbf{H}_A: \mu_i \neq \mu_j = \text{para algún } i \neq j$$

La Hipótesis Nula nos dice que a priori no existen diferencias en las cinco técnicas de corrección en los niveles medios de la variable respuesta Y_i (tiempo de entrega, el consumo de gases y deformación en placas curvas). Por su parte, la hipótesis alternativa nos afirma que al menos una par de técnicas difieren en cuanto a sus niveles de respuesta media. Estas hipótesis, también se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\text{Hipótesis Nula } H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_5 = 0$$

$$\text{Hipótesis alternativa } H_A: \tau_i \neq 0 = \text{para algún } i$$

La hipótesis nula nos dice que a priori los efectos de las cinco técnicas de corrección sobre la variable respuesta Y_i (tiempo de entrega, el consumo de gases y deformación en placas curvas) son cero; en cambio, la hipótesis alternativa afirma que al menos una de las técnicas tiene un efecto diferente de cero.

De cierto modo, para la realización de esta prueba se ha utilizado la técnica estadística *ANOVA* (Análisis de Varianza), la cual es usada para probar igualdad de tres o más medias poblacionales. Por medio del análisis de variabilidades muestrales se calcula un estadígrafo llamado la razón F (cociente de las varianzas entre tratamientos y dentro de tratamientos), que se

compara con una razón F crítica (correspondiente a un nivel de confianza de 95%), la cual es obtenida de una tabla F. El NOVA que examina que el grado de variabilidad *dentro* de los grupos, sea de alguna forma menos al grado de variabilidad que existe *entre* los grupos. Es decir, que el efecto de pertenencia al grupo sea suficientemente grande como para establecer con un grado de confianza de 95% que las medias en las poblaciones son diferentes.

Para el Diseño de Bloque Completamente al Azar (DBCA), el ANOVA viene dado por:

Análisis de varianza DBCA

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado medio	F_0	Valor-p
Tratamientos	SC_{TRAT}	$k - 1$	CM_{TRAT}	$F_0 = \frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Bloques	SC_B	$b - 1$	CM_B	$F_0 = \frac{CM_B}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Error	SC_E	$(k - 1)(b - 1)$	CM_E		
Total	SC_T	$N - 1$			

Figura 22. ANOVA para un diseño en bloques completos al azar (Gutiérrez y De la Vara, 2008)

Las fórmulas para el cálculo de las sumas de cuadrado son:

$$SC_T = \sum_{j=1}^b \cdot \sum_{i=1}^k Y_{ij}^2 - \frac{Y_{**}^2}{N} \quad (6)$$

$$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \cdot \frac{Y_{i*}^2}{b} - \frac{Y_{**}^2}{N} \quad (7)$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \cdot \frac{Y_{*j}^2}{k} - \frac{Y_{**}^2}{N} \quad (8)$$

El error se obtiene por sustracción como:

$$SC_E = SC_T - SC_{TRAT} - SC_B \quad (9)$$

5.4. Análisis de resultados: Cálculo del Análisis de la Varianza

Para nuestro análisis de varianza se plantearon las siguientes hipótesis frente a la pregunta de estudio: *¿Existe diferencia estadísticamente significativa en el promedio de las técnicas de corrección de distorsiones en estructuras soldadas de espesor delgado en la construcción naval?*

De este modo, la hipótesis general está planteada de la siguiente manera:

Hipótesis nula e hipótesis alternativa, las cuales se expresan así:

Hipótesis Nula $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_5 = \mu$

Hipótesis alternativa $H_A: \mu_i \neq \mu_j = \text{para algún } i \neq j$

La Hipótesis nula nos dice que a priori no existen diferencias en las cinco técnicas de corrección en los niveles medios de la variable respuesta Y_i (tiempo de entrega, el consumo de gases y deformación en placas curvas). Por su parte, la hipótesis alternativa afirma que al menos un par de técnicas difieren en cuanto a sus niveles de respuesta media. Por otro lado, se utilizó un nivel de confianza del 95%. Es decir, 0,05 probabilidades para valor crítico.

5.4.1. Datos básicos o Atributos del Diseño de Mezclas

Datos Básicos del DBCA					
Número de factores experimentales	Número de Bloques	Número de variables respuestas	Número de corridas	Grados de libertad	Factores que afectan la variable
1	5	4	25	16	5

<i>Factores</i>	<i>Niveles</i>	<i>Unidades</i>
técnicas de calor	5	

<i>Respuestas</i>	<i>Unidades</i>
Tiempo de entrega	s
Deformación	mm
Volumen de Oxígeno	mm ³
Volumen de gas propano	mm ³

El presente diseño consiste de 25 corridas. El diseño deberá ser corrido en 5 bloques. El orden de los experimentos no ha sido aleatorizado. Si hay variables ocultas presentes, ellas pueden distorsionar los resultados.

5.4.2. Análisis de varianza para cada variable de respuesta.

5.4.2.1. Generalidades del análisis de varianza ANOVA. El procedimiento que se ejecutó en el análisis de varianza de varios factores para cada una de las variables de respuestas (tiempo de entrega, deformación, volumen de oxígeno y volumen de gas), realiza varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre dichas variables. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores, si es que hay suficientes datos. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permiten identificar los factores significativos. Por lo tanto, para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples dicen cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

Por lo anterior, para cada uno de los análisis se plantearon hipótesis de acuerdo al estudio de la variable a considerar: *Tiempo de entrega de un proyecto*

- *Hipótesis:*

La hipótesis nula y la hipótesis alternativa, se expresan como siguen:

Hipótesis Nula $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_5 = \mu$

Hipótesis alternativa $H_A : \mu_i \neq \mu_j = \text{para algún } i \neq j$

La Hipótesis Nula nos dice que a priori no existen diferencias en las cinco técnicas de corrección en los niveles medios de la variable respuesta Y_i (tiempo de entrega), la hipótesis alternativa afirma que al menos una par de técnicas difieren en cuanto a sus niveles de respuesta media.

Tabla 3. Análisis de Varianza para Tiempo de entrega

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:tecnicas de calor	4092,56		1023,14	596,58	0,0000
B:BLOQUE	4,96		1,24	0,72	0,5888
RESIDUOS	27,44	6	1,715		
TOTAL (CORREGIDO)	4124,96	4			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual. Según el análisis de varianza para el tiempo de entrega, observamos en la tabla 3 que Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Tiempo de entrega con un 95,0% de nivel de confianza. Es decir, al menos un par de técnicas tienen tiempos de entregas diferentes, lo que nos permite rechazar la hipótesis nula.

Por otra parte, en la gráfica de barras de Herro en la figura 33, observamos las medias para los tratamientos, donde los intervalos están contruidos con el método LSD. Podemos apreciar como los intervalos de confianza se traslapan, lo que significa que las respuestas medias de los tratamientos son iguales estadísticamente, es decir, las técnicas T2 y T4 son homogéneas según nos muestra el grafico. Mientras que en las técnica restantes T5, T3 y T1 existen diferencias significativas que indican que la media o medias son distintas entre las técnicas de corrección de distorsión.

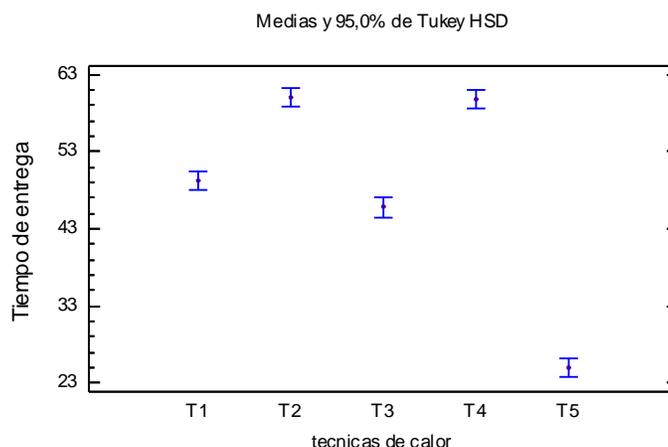


Figura 23. Significancia de las interacciones para los tiempos de entrega

Para la verificación en la que existen diferencias significativas entre las diferentes técnicas de corrección de distorsiones, tenemos las pruebas de Tukey (tabla 4). En la tabla de resultados, se identifican 4 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's, es decir, las técnica T2 y T4. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tabla 4. Pruebas de Múltiple Rangos para Tiempo de entrega por técnicas de calor

<i>técnicas de calor</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T5	5	25,0	0,585662	X
T3	5	45,8	0,585662	X
T1	5	49,2	0,585662	X
T4	5	59,8	0,585662	X
T2	5	60,0	0,585662	X

Tabla 5. Diferencia significativa de tiempo de entrega

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
T2 T1 -	*	-10,8	2,53857
T3 T1 -	*	3,4	2,53857
T4 T1 -	*	-10,6	2,53857
T5 T1 -	*	24,2	2,53857
T3 T2 -	*	14,2	2,53857
T4 T2 -		0,2	2,53857
T5 T2 -	*	35,0	2,53857
T4 T3 -	*	-14,0	2,53857
T5 T3 -	*	20,8	2,53857
T5 T4 -	*	34,8	2,53857

Esta la tabla 5, se aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 9 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95, 0% de confianza. En conclusión, podemos decir que las técnicas que minimizan el tiempo de entrega de un proyecto de construcción naval en orden decreciente son las técnicas T1, T3 y T5, ya que existen diferencias significativas entre ellas, situación que no presentan las técnicas T2 y T4. Ahora bien, para nuestro estudio la técnica que se ajusta a los requerimientos es la técnica T1.

5.4.3. Análisis de varianza, para la variable de respuesta: Deformación

Hipótesis

La hipótesis nula y la hipótesis alternativa, se expresan como siguen:

Hipótesis Nula $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_5 = \mu$

Hipótesis alternativa $H_A: \mu_i \neq \mu_j = \text{para algún } i \neq j$

La Hipótesis nula nos dice que a priori no existen diferencias en las cinco técnicas de corrección en los niveles medios de la variable respuesta Y_i (deformación en placas curvas); de otro modo, la hipótesis alternativa afirma que al menos un par de técnicas difieren en cuanto a sus niveles de respuesta media.

Tabla 6. Análisis de Varianza para deformación

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:tecnicas de calor	12,071	4	3,01775	11,98	0,0001
B:BLOQUE	0,573	4	0,14325	0,57	0,6891
RESIDUOS	4,031	16	0,251937		
TOTAL (CORREGIDO)	16,675	24			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla 6. ANOVA descompone la variabilidad de deformación en contribuciones debidas a varios factores: Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre Tiempo de entrega con un 95,0% de nivel de confianza. Es decir, al menos un par de técnicas tienen tiempos de entregas diferentes, lo que nos permite rechazar la hipótesis nula.

Por otra parte, en la gráfica de barras de Herro, figura 34, observamos las medias para los tratamientos, donde los intervalos están construidos con el método LSD. Podemos apreciar como los intervalos de confianza se traslapan, lo que significa que las respuestas medias de los tratamientos son iguales estadísticamente, es decir, se observan tres grupos de técnicas que son

homogéneas según nos muestra el gráfico. Además, si observamos la técnica de calor que más deformación genera es la técnica T1.

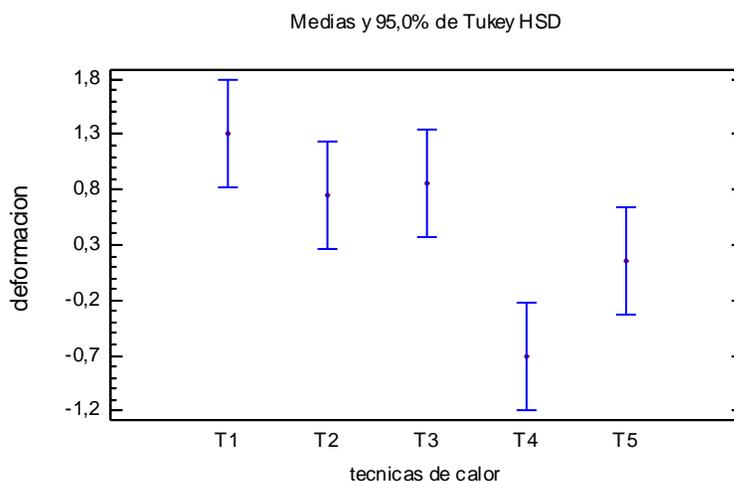


Figura 24. Significancia de las interacciones para la Deformación

Para la verificación que existe diferencias significativas entre las diferentes técnica de corrección de distorsiones, tenemos las pruebas de Tukey, tabla 7. En esta tabla de resultados, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's, es decir, las técnica T1-T2; T1-T3; T2-T3; T2-T5; T3-T5 y T4-T5. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 7. Pruebas de Múltiples Rangos para deformación por técnicas de calor
Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

<i>Técnicas de calor</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T4		-0,71	0,224472	X
T5		0,15	0,224472	XX
T2		0,75	0,224472	XX
T3		0,86	0,224472	XX
T1		1,3	0,224472	X

Tabla 8*. Diferencia significativa de la Deformación

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
T1 - T2		0,55	0,972979
T1 - T3		0,44	0,972979
T1 - T4	*	2,01	0,972979
T1 - T5	*	1,15	0,972979
T2 - T3		-0,11	0,972979
T2 - T4	*	1,46	0,972979
T2 - T5		0,6	0,972979
T3 - T4	*	1,57	0,972979
T3 - T5		0,71	0,972979
T4 - T5		-0,86	0,972979

En la tabla 8, se muestra un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 4 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95, 0% de confianza. En conclusión, podemos afirmar que las técnicas que corrigen la máxima deformación en un proyecto de construcción naval es la técnica T1.

5.4.4. Análisis de varianza, para la variable de respuesta: Volumen de Oxígeno

Hipótesis

La hipótesis Nula y la Hipótesis Alternativa, se expresan como siguen:

Hipótesis Nula H_0 : $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_5 = \mu$

Hipótesis alternativa $H_A : \mu_i \neq \mu_j =$ para algún $i \neq j$

La Hipótesis nula nos dice que a priori no existen diferencias en las cinco técnicas de corrección en los niveles medios de la variable respuesta Y_i (consumo de gases, oxígeno). Por su parte, la hipótesis alternativa afirma que al menos una par de técnicas difieren en cuanto a sus niveles de respuesta media.

5.4.4.1. Análisis de la tabla de ANOVA

Tabla 9. Análisis de Varianza para Volumen de Oxígeno

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:tecnicas de calor	2,53275E12	4	6,33188E11	2231,79	0,0000
B:BLOQUE	1,27729E9	4	3,19322E8	1,13	0,3793
RESIDUOS	4,53941E9	16	2,83713E8		
TOTAL (CORREGIDO)	2,53857E12	24			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual.

La tabla 9 del ANOVA nos indica que los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Y puesto que un valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el Volumen de Oxígeno con un 95,0% de nivel de confianza.

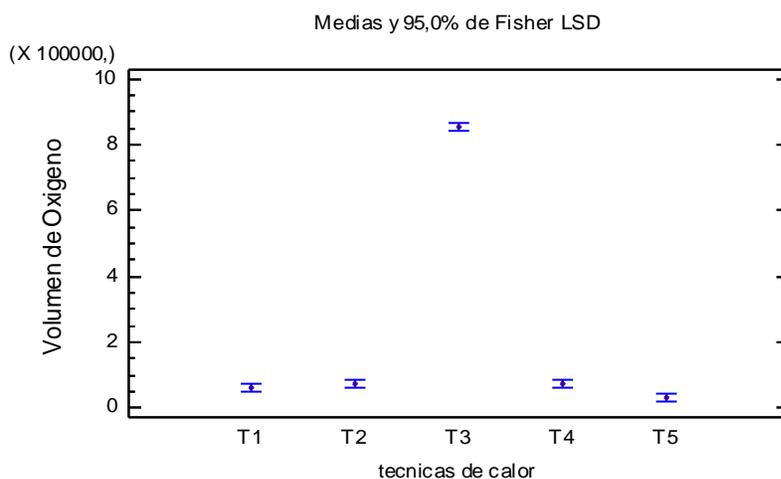


Figura 25. Significancia de las interacciones para el volumen de oxígeno

En el figura 35 de la barra de hierro observamos que las técnicas T1 y T5 son las que minimizan el consumo de volumen de oxígeno en un orden decreciente. Por otro lado, para la verificación en la que existen diferencias significativas entre las diferentes técnicas de corrección de distorsiones, tenemos las pruebas de Tukey, tabla 10. En esta tabla de resultados, en la parte superior de la página, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's, es decir, las técnicas T1, T4 y T2, entretanto las técnica T5 y T3 son completamente diferentes. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0 % al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla 10. Análisis de Varianza para el Volumen de Oxígeno

<i>técnicas de calor</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T5	5	31090,0	7532,77	X
T1	5	61224,5	7532,77	X
T4	5	74415,1	7532,77	X
T2	5	74664,0	7532,77	X
T3	5	855089,	7532,77	X

Método: 95,0 porcentaje LSD

Tabla 11. * Diferencia significativa de Volumen de Oxígeno

<i>Contraste</i>	<i>ig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
T1 - T2		-13439,5	22583,3
T1 - T3	*	-793865,	22583,3
T1 - T4		-13190,6	22583,3
T1 - T5	*	30134,5	22583,3
T2 - T3	*	-780425,	22583,3
T2 - T4		248,88	22583,3
T2 - T5	*	43574,0	22583,3
T3 - T4	*	780674,	22583,3
T3 - T5	*	823999,	22583,3
T4 - T5	*	43325,1	22583,3

La tabla 11, muestra la aplicación de un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 7 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza.

5.4.5. Análisis de varianza, para la variable de respuesta: Volumen de gas propano

Hipótesis

La hipótesis nula y la hipótesis alternativa, se expresan como siguen:

Hipótesis Nula H_0 : $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_5 = \mu$

Hipótesis alternativa H_A : $\mu_i \neq \mu_j$ = para algún $i \neq j$

La Hipótesis nula nos dice que a priori no existen diferencias en las cinco técnicas de corrección en los niveles medios de la variable respuesta Y_i (consumo de gases, gas propano), la hipótesis alternativa afirma que al menos una par de técnicas difieren en cuanto a sus niveles de respuesta media.

5.4.5.1. Análisis de la tabla de ANOVA

Tabla 12. Análisis de Varianza para Volumen de gas propano

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:tecnicas de calor	3,95194E8	4	9,87985E7	3,68	0,0262
B:BLOQUE	9,68488E7	4	2,42122E7	0,90	0,4859
RESIDUOS	4,29457E8	6	2,68411E7		
TOTAL (CORREGIDO)	9,215E8	4			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla 12 del ANOVA nos indica que los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Y puesto que un valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el Volumen de gas propano con un 95,0% de nivel de confianza. Por otra parte, en la figura 35, de barras de Herro observamos las medias para los tratamientos, donde los intervalos están construidos con el método LSD. Podemos apreciar como los intervalos de confianza se traslapan, lo que significa que las respuestas medias de los tratamientos son iguales estadísticamente, es decir, se observan que las T1 y T5 son las que minimizan el consumo de gas propano en orden creciente.

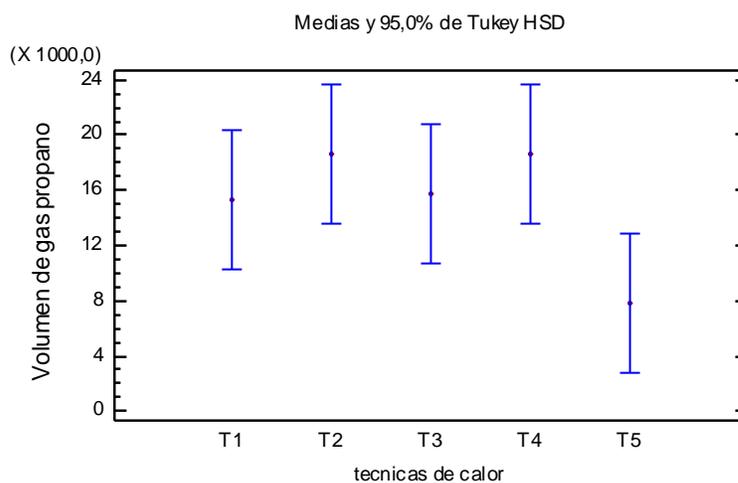


Figura 26. Significancia de las interacciones para el volumen de gas propano

Tabla 13. Pruebas de Múltiple Rangos para el Volumen de gas propano
Método: 95,0 porcentaje LSD

<i>Técnicas de calor</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T5	5	7777,5	2316,94	X
T1	5	15306,1	2316,94	X
T3	5	15782,1	2316,94	X
T4	5	18603,8	2316,94	X
T2	5	18666,0	2316,94	X

En la tabla 13 de Tukey, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

Tabla 14. * Diferencia significativa de Volumen de gas propano

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
T1 - T2		-3359,88	6946,2
T1 - T3		-475,984	6946,2
T1 - T4		-3297,66	6946,2
T1 - T5	*	7528,62	6946,2
T2 - T3		2883,9	6946,2
T2 - T4		62,22	6946,2
T2 - T5	*	10888,5	6946,2
T3 - T4		-2821,68	6946,2
T3 - T5	*	8004,6	6946,2
T4 - T5	*	10826,3	6946,2

Esta tabla 15, también aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 4 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. Para concluir con nuestro análisis de varianza, de acuerdo a nuestro modelo matemático, observamos cada una de las gráficas de las medias de tratamientos para las posiciones que ocupa cada técnica en relación a las variables de respuestas estudiadas. En este sentido, retomamos un poco nuestro objeto de estudio sobre: ¿Qué técnica de corrección de distorsiones minimizan el tiempo de entrega y consumo de gases en un proyecto de construcción naval y al mismo tiempo corrigen la mayor deformación?

De acuerdo con los resultados arrojados en cada análisis de varianza, seleccionamos en orden ascendente las tres primeras técnicas que cumplen con los requerimientos antes mencionados, para así determinar qué técnicas cumplen con el objetivo antes propuesto. El resultado se registra en la tabla 16 donde podemos apreciar que la técnica que cumple cada uno de los requerimientos especificados es la Técnica de corrección de distorsiones número uno (T1).

Tabla 15. Resumen de los datos con relación al consumo de tiempo, deformación y gases en un proyecto de construcción naval

		Tiempo de entrega	Deformación	Volumen de Oxígeno	Volumen de Gas Propano
<i>técnicas</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>			
T5	5	25,0	0,15	31090,0	7777,5
T3	5	45,8	0,86	855089	15782,1
T1	5	49,2	1,3	61224,5	15306,1
T4	5	59,8	-0,71	74415,1	18603,8
T2	5	60,0	0,75	74664,0	18666,0

5.5. Conclusiones iniciales sobre el análisis

Finalmente, con el objetivo de evidenciar los resultados desde un enfoque comparativo entre la técnica seleccionada (técnica de calentamiento por puntos), en relación con las otras técnicas estudiadas en cuanto a la Corrección de Distorsiones por Línea de Calor en Láminas de Espesor Delgado en la Construcción Naval. Dado que desde este estudio se analizaron las diferentes técnicas de corrección de distorsión y se determinó que la técnica 5 es la que minimiza las distorsiones, el tiempo de entrega y consumo de gases. A continuación se presenta el análisis comparativo abordando el Análisis de resultado deformación, el Análisis de resultado tiempos de entrega y el Análisis de resultado consumo de gases:

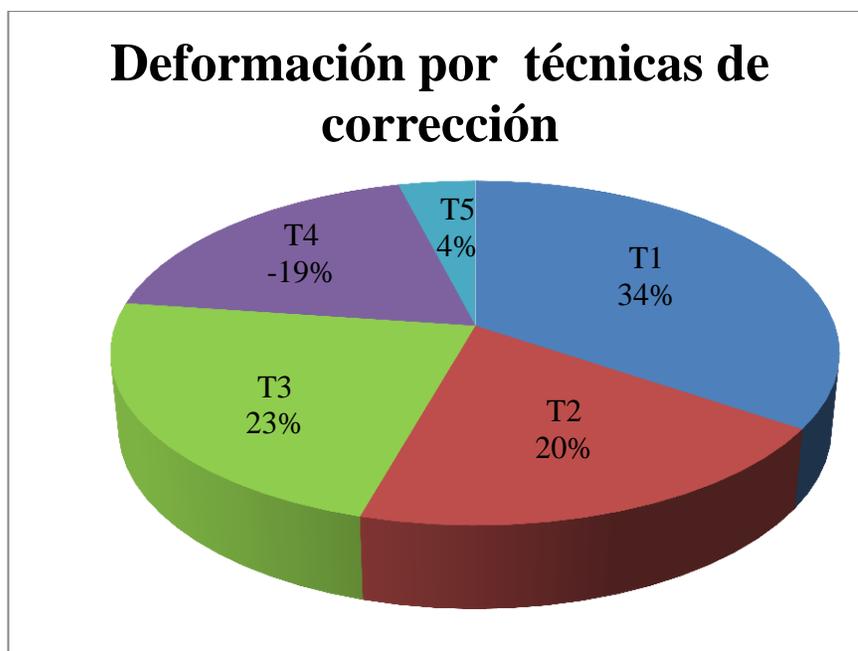


Figura 27. Analisis comparativo de las deformacion por técnicas de corrección

5.5.1. Análisis de resultado deformación. De acuerdo con las técnicas de corrección de deformación, la técnica cinco (5) (calentamiento por puntos) es la que más se acerca al valor óptimo, minimizando cinco (5) veces la deformación que la técnica dos, tres, y cuatro. Y ocho (8) veces la Técnica uno.

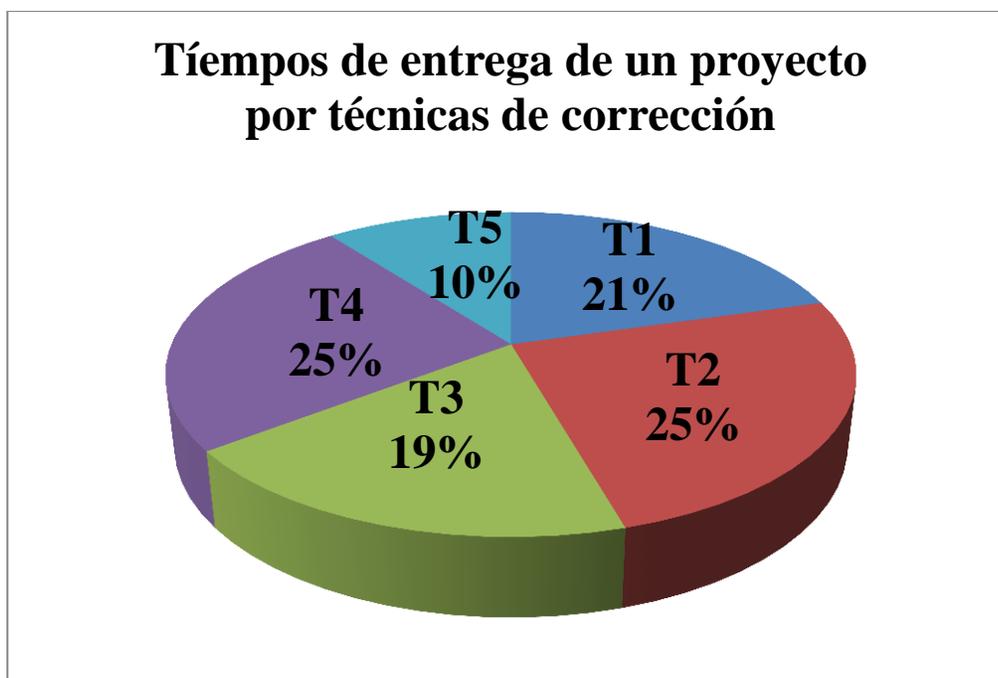


Figura 28. Análisis comparativo de los Tiempos de entrega de un proyecto por técnicas de corrección

5.5.2. Análisis de resultado tiempos de entrega:

De acuerdo con la figura 28, la técnica en la que se minimiza el tiempo de entrega de un proyecto, es la técnica cinco (5) que reduce a la mitad el tiempo de aplicación del calor en la entrega de un proyecto. Las restantes técnicas consumen con pequeñas diferencias entre ellas, el tiempo de aplicación en una placa de espesor delgado.

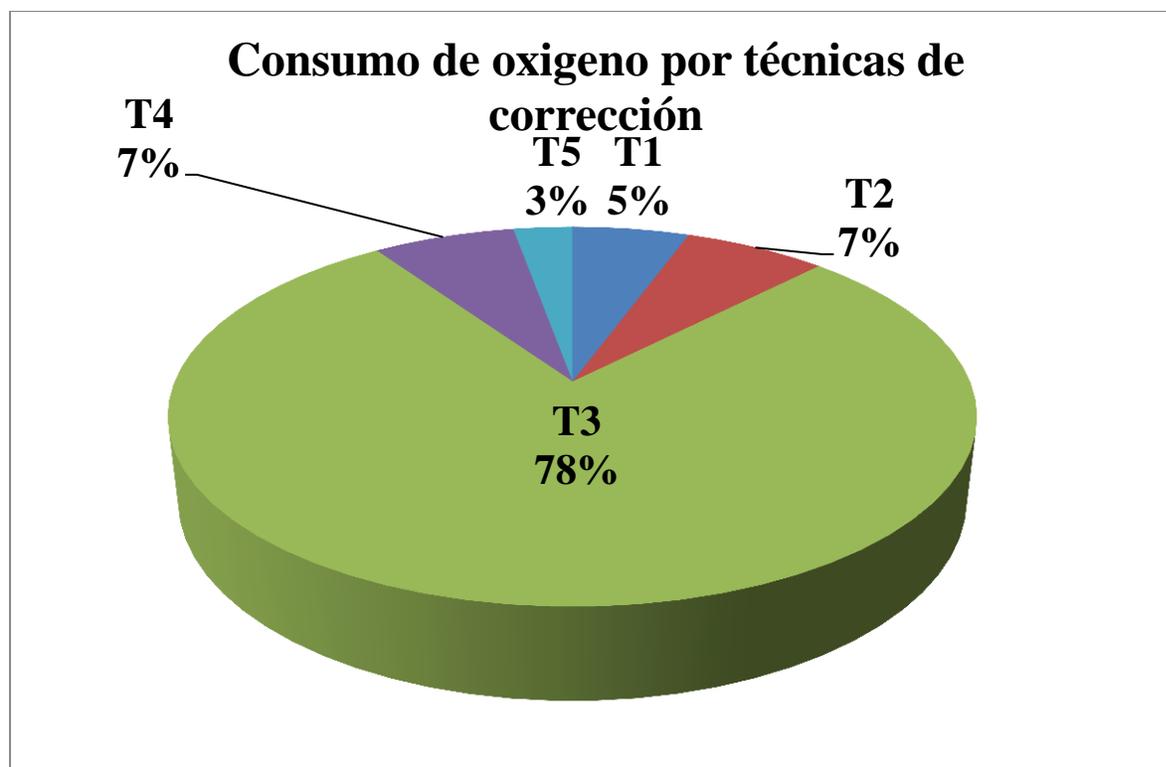


Figura 29. Análisis de Consumo de Oxígeno por Técnicas de Corrección

5.5.3. Análisis de resultado consumo de oxígeno:

En la figura 29. del consumo de oxígeno, observamos de igual forma que la técnica cinco (5) sigue siendo la que más se acerca a valor óptimo, siendo la que minimiza al doble el consumo de oxígeno con relación a las técnicas dos y cuatro y en relación a la técnica tres es veintiséis (26) veces más económica. Y en relación a los costos resulta dos veces más económica que las técnicas uno, dos y cuatro. Y veinte veces más económica que la técnica tres.

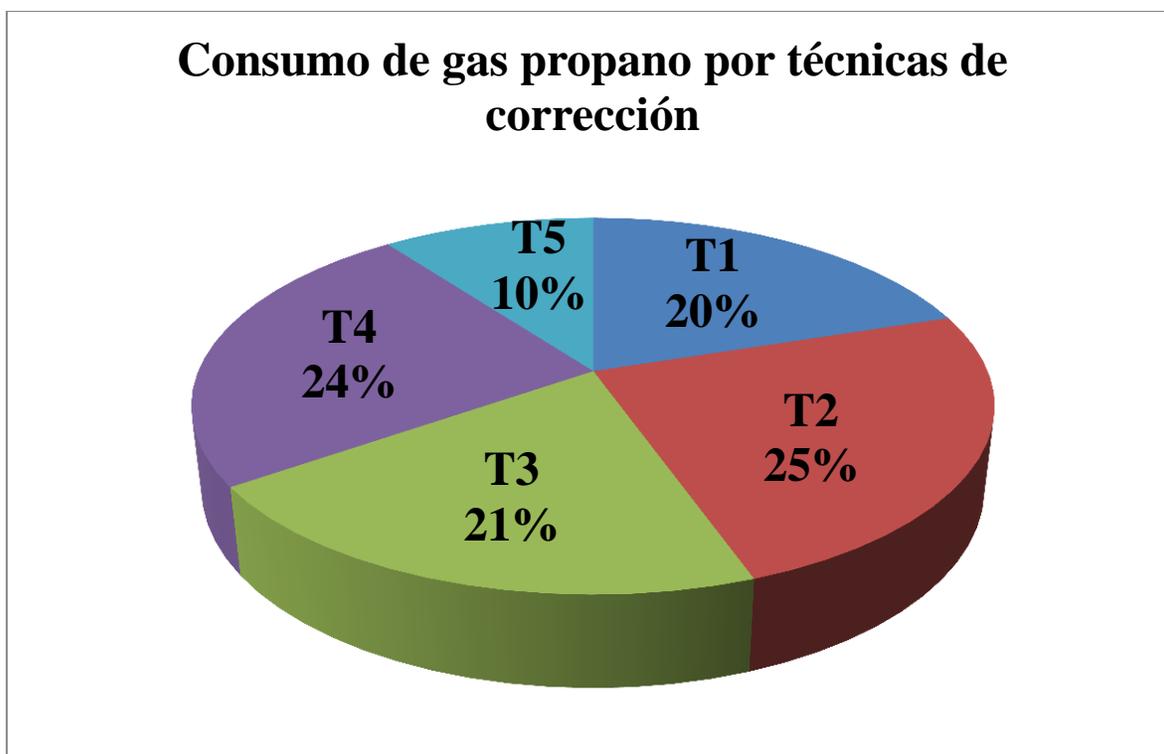


Figura 30. Análisis comparativo del Consumo de gas propano por técnicas de Corrección

En cuanto al consumo de gas propano representado en la figura 4.0, la técnica cinco (5) muestra el consumo mínimo en relación a las otras técnicas y el consumo es dos veces menor que las demás y en relación a la parte económica es más económica que las técnicas restantes.

Capítulo VI

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

En esta tesis se desarrollaron experimentos de corrección de distorsiones en placas de espesor delgado, para ello se utilizaron diferentes técnicas de aplicación de calor. De este estudio se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Se puede obtener deformación en una placa experimental con solo aplicar calor, siempre y cuando éste sea controlado en cantidad y en tiempo de aplicación.
2. La distorsión producida en placa de espesor delgado depende de: la velocidad del soplete, de la altura de la boquilla del soplete a la superficie del calentamiento de la placa y de la máxima temperatura que se obtiene en la placa.
3. Se demostró que la distorsión en las placas planas difiere de la deformación de las placas curvas, por el efecto que tiene la curvatura inicial o por los esfuerzos residuales generados por el calor.
4. Se analizaron las diferentes técnicas de corrección de distorsión y se determinó que la técnica 5 es la que minimiza las distorsiones, el tiempo de entrega y consumo de gases.
5. En el desarrollo de esta investigación se utilizaron técnicas manuales de medición, introduciendo incertidumbre en los resultados, sin embargo, representan la realidad de gran parte de las actividades de reparación y construcción naval de estructuras soldadas. Por lo tanto, estos resultados se pueden considerar válidos, con un cierto grado de incertidumbre.

6.2. Recomendaciones

1. Realizar un banco de pruebas experimentales que garanticen las mediciones automáticas de las variables: la velocidad del soplete, la altura de la boquilla del soplete a la superficie del calentamiento de la placa y de la temperatura.

2. Incluir en las mediciones el parámetro de temperatura, debido a su relación con la deformación de la placa. Esto porque las variaciones dimensionales producidas por el efecto del calor son mínimas, requiriendo atención para evitar errores considerables.

7. Referencias Bibliográficas

- Ajila C., (2008). *Estudio y Control de Distorsiones en Estructuras de Acero Soldadas* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Bridges & Structures [s.f]) Tomado de: <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/>
- Deformation of Thick Plates Undergoing Line heating. International Society of Offshore
- Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Santander, España: Universidad de Cantabria.
- EFD Induction, (2009). *Aplicaciones de calentamiento por inducción*. Recuperado de
- *Forming of Thick Steel Plates by line Heating Considering Complex Heating Patterns*. (Tesis doctoral). Japón: Osaka University
- García, J., Lacalle, R., Ferreño, D., Álvarez, J & Gutiérrez-Solana, F., (Marzo de 2010).
- González F., Francisco J., (2006) *Guía Práctica para Prevenir Deformaciones por Soldadura*. (Tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile.
- Gutiérrez, H., De la Vara R. (2008), *Análisis y diseño de experimentos*. (Segunda edición). México: Mc Graw Hill, 117-125
- <http://www.efd-induction.com/es/Download/Brochures.aspx>
- Inherent deformation during plate forming by line heating (report 1). *Transactions of JWRI*, 36 (1), 57-64.
- Jang, C., Seo, S., Ko, D. (1997). A Study on the Prediction of Deformations of
- Jonson, C., Chirillo, L. (1979). *Outfit planning*. British Maritime Technology
- Lewis, S., Alizadeh, H., Gill, C., Vega, A., Murakawa, H., El-Ahmar, W. Truman, C., (2009).

- Mandal, N., (2009). *Welding Techniques, Distortion Control and Line Heating*. Dept. of
- Méndez N. y Valdez, V., (2005) *Diseño, construcción y pruebas de una boquilla de temple por flama acoplada a un torno, con fines didácticos*. (Tesis de pregrado). San Salvador. Universidad del Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Modeling and measurement of residual stresses in autogenously welded stainless steel plates: Part 1 –Fabrication and modeling. doi:10.1016/j.ijpvp.2009.12.003
- Ocean Engineering & Naval Architecture Indian Institute of Technology Kharagpur, India.
- *Optimización del proceso de enderezado por llama e impacto sobre las propiedades del material*. XXVII Encuentro del Grupo Español de Fractura. Porto, Portugal.
- Piñón A., (2008). *Distorsión y Esfuerzos Residuales En Un Acero al Carbón*”. (Tesis de Pregrado). Escuela Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo. Morelia, Michoacán.
- Plates Due to Line Heating Using a Simplified Thermal Elasto-Plastic Analysis. *Journal of Ship Production*, 13 (1), 22-27
- Recuperado de www.aga.se. (Beskriv Teknik AB/CW-179sp-9412-5000)
- Rosenthal, D. (1946). *The Theory of Moving Sources of Heat and its Application to Metal*
- Sampedro, J. (2010). *Conformado por líneas de calor*. España: Fundación Metal Asturias
- *Straightening of Damaged Steel Bridge Members*. Chapter 2: Heat Straightening Basics. Recuperado de <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/steel/index.cfm>

- Treatments, *Trans. ASME*, 68, 3515 – 3528. EFD Induction Worldwide (s.f). Tomado de <http://www.efd-induction.com/es>
- U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. *Guide for Heat-*
- Vaz, M. y Da Silva, R., (Octubre de 2010). *Estudo Analítico e Numérico do Processo de Curvatura de Chapas Através da Aplicação de Linhas de Aquecimento*. 23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro.
- Vega, A., Osawa, N., Tango, Y., Ishiyama, M., Serizawa, H., Rashed S., Murakawa H., (2008). Effect of the Heating Model on the Prediction of Inherent Deformation of Plates Formed by Induction Heating. *Transactions of the 8th International Symposium of the Japan Welding Society (8WS)*.
- Vega, A., Rashed, S., Serizawa, H. y Murakawa, H. (2007a). Influential factors affecting and Polar Engineers: Lisbon, Portugal. id: ISOPE-I-07-185), 4, 3472 - 3479.
- Vega, A., Tajima, Y., Rashed, S., Murakawa, H. (2007b). Influential Factors Affecting Inherent Deformation during Plate Forming by Line Heating (Report 2) – The Effect of a previous heating line. *Transactions of Asian Technical Exchanges and Advisory Meeting on Marine Structure (TEAM)*, 187-194.
- Vega, A., Tajima, Y., Rashed, S., Murakawa, H., (2007c). Numerical Study on Inherent
- Vega. A., (2009). *Development of Inherent Deformation Database for Automatic*
- *Verdades acerca de: Enderezamiento por llama*. AGA AB; S-181 81 lidingö, Suecia. Recuperado de www.aga.se. (CW-859sp 9809-2000).
- *Verdades acerca de: Retroceso de llama (1993)*. AGA AB; S-181 81 lidingö, Suecia.