Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica

Centro de Investigación de Soldadura (CIS)

TRABAJO DE DIPLOMA

Modelación de ciclos térmicos en la soldadura subacuática mojada

Autor: Carlos Josué Revoredo Santander

Tutor: Dr. Ramón Cristóbal Martínez García

Ing. Alexis A. Maza Sánchez

Santa Clara

2010

"Año 52 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica

Centro de Investigación de Soldadura (CIS)

TRABAJO DE DIPLOMA

Modelación de ciclos térmicos en la soldadura subacuática mojada

Autor: Carlos Josué Revoredo Santander

Email: crevoredo@uclv.edu.cu

Tutor: Dr. Ramón Cristóbal Martínez García

Email: ramonin@uclv.edu.cu

Ing. Alexis A. Maza Sánchez

Email: amaza@uclv.edu.cu

Santa Clara

2010

"Año 52 de la Revolución"

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

La sabiduría suprema es tener sueños bastantes grandes para no perderlos de vista mientras se persiguen.

William Faulkner

DEDICATORIA

A todas las personas que de una forma u otra estuvieron implicadas para que me graduara, en especial a mi madre y mi abuela que es mi otra madre.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre porque siempre estuvo apoyándome incondicionalmente.

A mi abuela que siempre ha estado pendiente de mí.

A mi amigo y tutor por confiar en mí y ayudarme desde que entre en la Universidad

A mi papá por ayudarme.

A mis compañeros de aula y amigos.

TAREA TÉCNICA

1. Revisión bibliográfica relacionada con:
    - Soldadura subacuática mojada.
    - Transferencia de calor considerando medio circundante.
    - Soldabilidad y ciclos térmicos de soldadura.
    - Obtención de ciclos térmicos.
    - Modelación de ciclos térmicos.
2. Entrenamiento con el empleo del tutorial para la modelación de los ciclos térmicos de la soldadura auxiliado del CDS.
3. Obtención del modelo que responda a las condiciones de experimentación considerando soldadura bajo agua mojada y su comparación con los obtenidos en superficie o enfriamiento al aire.

Firma del Autor

Firma del Tutor

SÍNTESIS

Con la presente investigación, se empleó la modelación por el método de los elementos finitos (MEF) donde se obtuvieron los ciclos térmicos en la soldadura subacuática mojada, estos resultados se compararon con los resultados de la modelación de la soldadura realizada al aire con el mismo aporte térmico, se consideró además el cambio de medio circundante, en este segundo caso el medio fue el aire y a temperatura ambiente.

Según los resultados obtenidos queda corroborado que los ciclos térmicos se verán seriamente afectados cuando el enfriamiento es por agua en comparación con las soldaduras realizadas al aire.

Abstract

With the present investigation, we used the modeling by the finite element method (FEM) where the thermal cycles in wet underwater welding were obtained. These results were compared with modeling results of the welded air with the same heat input. The changes of surroundings were also considered in the latter case the medium was the air at environment. According to the results is confirmed that thermal cycling will be severely affected when water cooling is compared to welds made in air.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO.....i

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS.....iii

TAREA TÉCNICA iv

SÍNTESIS v

INTRODUCCIÓN.....1

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 5

1.1 Generalidades 5

1.2 Transferencia de calor.....10

1.3 Soldadura SMAW aplicada bajo el agua 12

1.3.1 Soldadura SMAW. Características para su aplicación bajo el agua .13

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE LOS FACTORES DETERMINANTES DE LA PROPIEDAD DE SOLDADURA.....15

2.1 Problemas de soldabilidad. 15

2.2 Ciclos térmicos de soldadura.....19

2.3 Efectos térmicos.....24

CAPÍTULO 3. OBTENCIÓN DE LOS CICLOS TÉRMICOS POR MODELACIÓN. 28

3.1 Consideraciones para la realización de la modelación 29

3.1.1 Cosideraciones generales sobre la generación del calor aportado por el arco de soldadura 30

3.1.2 Análisis y consideraciones para la introducción de los datos de entrada y para la modelación por MEF en la soladura bajo agua mojada y su comparación con la soldadura al aire 30

3.2 Ejemplo de la simulación 35

3.3 Discusión de los resultados obtenidos 40

CONCLUSIONES 41

RECOMENDACIONES 42

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 43

INTRODUCCIÓN

La soldadura bajo el agua se inició durante la Primera Guerra Mundial, cuando la marina inglesa hizo reparaciones temporales a sus barcos de guerra. Estas reparaciones consistían en soldar alrededor de los remaches con fuga de los casos de los buques.

El advenimiento de los electrodos recubiertos hizo posible hacer este tipo de reparación por soldadura bajo el agua con procedimientos calificados. Los resultados solo alcanzaron aproximadamente el 80% de resistencia y 50% de ductilidades con respecto a las soldaduras ejecutadas al aire según reportes de la época.

La calidad deficiente de estas soldaduras radica entre otros factores producto del comportamiento de la trasferencia de calor, la visibilidad del soldador y la alta presencia de hidrógeno en la atmósfera del arco. Cuando el metal base y la zona del arco están completamente rodeados de agua, en la unión habrá menos acumulación de calor. La zona del arco está compuesta por una alta concentración de vapor de agua. La atmósfera del arco, de hidrógeno y oxígeno del vapor de agua, queda absorbida en el metal fundido de la soldadura y contribuye a la porosidad y a la fractura por hidrógeno.

Existen otros factores de tipo tecnológico que sin duda afectan su calidad como son, limitación en su capacidad para ver y manipular el arco de soldar. Muchos autores opinan que bajo condiciones ideales, las soldaduras producidas, en ambientes húmedos con electrodos recubiertos, son de poca calidad. Pueden usarse durante cortos periodos, pero se deben sustituir con soldaduras de buena

calidad tan rápidamente como sea posible. Los adelantos en los electrodos para soldar bajo el agua están mejorando la calidad de las soldaduras en ambiente húmedo.

Marco teórico

Situación problemática:

En los lugares donde la soldadura es de gran responsabilidad y se realiza bajo el agua mojada, se exige el cumplimiento de la garantía de la calidad requerida según las normas y códigos para tales casos, se hará compleja la obtención de las probetas de calificación del procedimiento de soldadura o reparación, pues deberá realizarse la unión de calificación en la misma condición de trabajo de la unión soldada.

Problemas de investigación:

- ¿Podrá emplearse el Método de los Elementos Finitos (MEF) para la obtención de los ciclos térmicos en la soldadura bajo agua mojada obteniendo resultados confiables que ayuden a predeterminar regímenes adecuados?

Objetivo general:

Obtener los ciclos térmicos de una unión soldada bajo agua mojada con la ayuda del Cosmos Desing Star (CDS).

Teniendo como Hipótesis:

Con el empleo del Cosmos Desing Star (CDS) pueden ser obtenidos los gráficos de los ciclos térmicos en soldaduras ejecutadas bajo agua mojada.

Definición y operacionalización de conceptos:

Entiéndase como variables las definidas en el marco teórico las cuales son: conducción, convección, radiación, agrietamiento, ciclo térmico, calor aportado y estructuras metalográficas, ellas están interrelacionados y se vinculan al proceso de soldadura y son de gran importancia para obtenerlo y optimizarlo de forma que

se pueda lograr la calidad requerida en la unión. Según el procedimiento que se establezca.

Aporte teórico y aporte práctico.

Como aporte teórico el trabajo constituirá la base para la definición, en el grupo de investigación, del Centro de Investigación de Soldadura (CIS), de consideraciones en cuanto al comportamiento de la transferencia de calor en la soldadura bajo agua mojada. El aporte práctico quedará definido en el sentido de la propuesta para la introducción de las consideraciones probadas para la obtención de los ciclos térmicos de soldaduras bajo agua mojada así como la aplicación de un tutorial para la obtención de ciclos térmicos.

En el presente trabajo se insiste en la importancia del estudio de la transferencia de calor teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La cantidad de calor queda definida por los valores de las variables del proceso de soldadura y por el proceso elegido en sí.
- En la estructura obtenida influye la cantidad de calor y la velocidad de enfriamiento, estos son los llamados ciclos térmicos.
- Por el proceso de transferencia de calor, fundamentalmente la conducción, quedan definidas subzonas en la zona afectada por el calor (ZAC), y estas se caracterizan por diferentes estructuras.
- A cada tipo de estructura corresponde diferentes comportamientos a las propiedades mecánicas o de las aleaciones.
- Es evidente la importancia del conocimiento de los fenómenos relacionados con el calor y su distribución durante la soldadura bajo agua mojada pues estas junto a la composición química de la aleación y sus propiedades termofísicas definirán la calidad de la unión.

Metodología y técnicas a utilizar:

Para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación se dio a la tarea de emplear una serie de técnicas cualitativas y cuantitativas impartidas por nuestros profesores y abalados por libros y publicaciones relacionadas con asignaturas precedentes e investigaciones desarrolladas en proyectos.

Observación Científica:

Considerando que en el caso de la soldadura bajo agua mojada el aporte térmico necesario para la ejecución de la soldadura es mucho mayor que el de las soldaduras consideradas normales al aire provocaría la obtención de zonas afectada por el calor (ZAC) mayores, sin embargo por ser el enfriamiento producto del agua circundante más rápido podrán obtenerse ZAC de menor dimensión y ciclos térmicos con velocidades de enfriamiento mayores. Lo anterior debe ser cuidadosamente investigado por su implicación en las estructuras que se obtengan y la resistencia al agrietamiento en frío de la unión.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Generalidades

Durante años a los procesos de soldadura se les reconocieron mucha utilidad para determinadas aplicaciones debajo del agua. Su campo de acción incluye operaciones tales como reflotamiento, reparación de buques y barcos, barrenos, accesorios, construcciones, muelles, como también las construcciones iniciales de estos. En la actualidad puede notarse un vigoroso crecimiento en su aplicación para trabajos de estructuras y plataformas marinas, en la reparación de barrenos y equipos de producción.

A pesar de lo descrito anteriormente la soldadura bajo agua mojada, siempre ha sido vista como una soldadura pobre en relación con aquellas realizadas en la superficie, pero en contradicción con esto la soldadura húmeda es el proceso más extensamente usado para reparaciones submarinas, su versatilidad, bajo costo y gran efectividad provee una alternativa viable a los métodos tradicionales como un dique seco; los sistemas de soldadura submarinos pueden ser movilizados en horas o pocos días y se pueden emplear en estructuras o buques que se mantienen operando, evitando entonces la detención del servicio.

Esta actividad fue perfeccionándose desde comienzos del siglo XX y en la Segunda Guerra Mundial. En la figura 1.1 se muestran un equipo de buzos que trabajarán en reparaciones en buques y puertos.

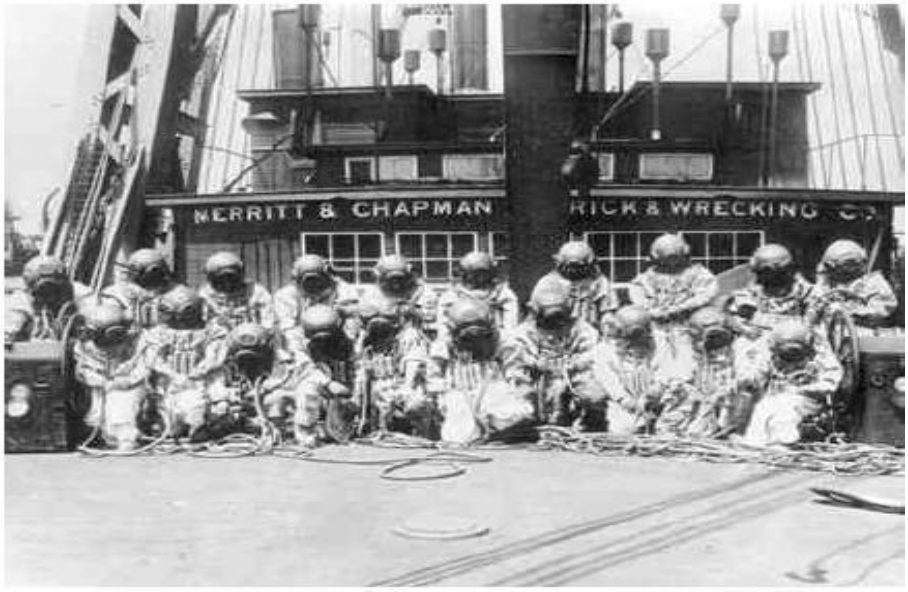


Figura 1.1. Equipos de buzos de la Segunda Guerra Mundial

Pero su incremento ascendente comienza a partir de la década del ´60 debido a la demanda originada por la industria petrolífera en alta mar, en estructuras sumergidas con tuberías y cañerías. Figura 1.2

Figura. 1.2. Reparaciones en plataformas petrolíferas. Década del ´60.

Desde entonces, casi todas las tareas de soldadura húmeda fueron realizadas por personas que han perfeccionado su aplicación en este medio. En años recientes La Marina de los Estados Unidos ha ocupado un rol muy importante en el desarrollo de nuevas técnicas de soldadura húmeda, esto ha ocurrido principalmente en respuesta al constante incremento de los costos laborales de astilleros y diques secos. A continuación se mencionará un caso concreto:

La inactivación del crucero "USS Newport New", a fines de 1975 donde 62 aberturas de un casco fueron obturadas, requiriendo 53 días de trabajo y un equipo de 18 buzos/soldadores; se emplearon 504 horas/hombre de soldadura y se consumieron 500 libras de electrodos; no obstante a esto, se obtuvo un beneficio considerable: el ahorro del 50% de los costos, que aquellos que se hubiesen requerido para completar las mismas tareas en un dique seco.

Otras aplicaciones para la soldadura húmeda incluyen la reparación y mantenimiento de transportes nucleares; tal como sucedió en el siguiente caso:

*En febrero de 1990, se reparó una pequeña filtración en la tubería del canal de paso de combustible localizado en la planta nuclear de "Wolf Creek" en Kansas; se emplearon 2 días de trabajo y el buzo empleó un total de 3 ½ horas en el agua durante la inspección y reparación; según investigaciones de costos realizados se llegó a la conclusión que si se hubiese realizado en la superficie, un equipo de 6 personas hubieran empleado 6 días para secar y descontaminar las piezas, un día para inspeccionar y reparar y 2 días más para rellenar la tubería; de esta forma se logró hacer el trabajo ahorrando un 80% de los costos estimados de la reparación y se redujeron enormemente los riesgos de exposición del personal***.**

Desde 1971 en plataformas petrolíferas (figura 1.3) se han reportado cientos de reparaciones subacuáticas mediante soldadura, sin que se conocieran fallas.
Si bien la soldadura seca es la técnica predominante, la soldadura submarina es, a veces, el único método a emplear para solucionar un problema.

Figura 1.3. Plataforma Petrolífera.

Aún así no fue tan fácil conseguir resultados favorables en la soldadura húmeda, esta es la razón por la que la producción de soldadura en este medio no fue vista sino hasta hace poco como una opción valedera, debido a las dificultades de cumplir con las especificaciones y requerimientos de los clientes, su alcance entonces era limitado.

Esta limitación en un campo tan necesario por desarrollar, llevó a que las tres partes involucradas en este tema: Sociedad Americana de Soldadura (AWS) y otras entidades de acción semejante, las escuelas de buzos/soldadores y los fabricantes de materiales y equipos de soldar, intercambien información para permitir el desarrollo de este campo que hasta ese momento, aun existiendo la necesidad, era muy poco utilizado por lo complicado que era conseguir juntas soldadas que cumplan con las especificaciones solicitadas por los clientes en función a los requerimientos de servicio de las juntas a soldar.

Gran parte de esta dificultad por cumplir con las especificaciones exigidas, es justamente por los inconvenientes que se le presentan al buzo/soldador en conseguir cordones de soldadura aceptables, soldando bajo condiciones adversas con poca visibilidad, dificultad en conseguir un arco de soldadura estable, humedad máxima, alta presión, etc.; todo esto debido a que, el medio que rodea al buzo/soldador es muy diferente que aquel que rodea al soldador en superficie.

Para esto se considera imprescindible una adecuada preparación y capacitación del buzo/soldador, de tal manera que se le instruya adecuadamente en las técnicas y conocimientos adecuados para el medio en que se desarrollará el trabajo de soldadura. Todo esto trajo la formación de un personal capacitado que originó una apreciable mejora en la calidad de la soldadura bajo agua, sin embargo, además de la habilidad del operario queda demostrado que inciden decisivamente otros factores y por lo tanto seguía siendo muy poco viable obtener la calidad requerida de la soldadura bajo agua. Fue entonces cuando los fabricantes de materiales de soldar alcanzaron un papel protagonista en la solución de este problema, volcando su conocimiento a la investigación y desarrollo de electrodos (consumibles) que permitan obtener mejores resultados que los conseguidos hasta ese momento por aquellos electrodos convencionales o los ya desarrollados para soldadura húmeda.

Producto de las investigaciones anteriores se consiguieron electrodos que facilitaron obtener juntas soldadas mucho más confiables y que cumplían de mejor forma con los requerimientos para esos tipos de trabajo.

Actualmente en países como Estados Unidos y Canadá se dictan permanentemente cursos de entrenamiento intensivos para buzos/soldadores comerciales, a cargo de personal altamente capacitado y experimentado con una extensión que alcanza aproximadamente las 30 semanas, comenzando por los sistemas de corte y luego con los procesos de soldadura húmeda, examinando la calidad obtenida. El resultado de este entrenamiento son 300 buzos comerciales capacitados cada año, donde el 90% de ellos es contratado para reparaciones y mantenimiento de plataformas petrolíferas.

Con dicha información queda claro que el trabajo de soldadura de responsabilidad no sólo es realizado en tierra sino también bajo el agua en disímiles actividades como la construcción y mantenimiento de plataformas marinas, diques, barcos, etc.

La necesidad de producir soldaduras de alta calidad bajo el agua ha incrementado, entre otras causas por el incremento del uso del transporte

marítimo así como la aparición de yacimientos de petróleo y gas en aguas cada vez más profundas.

Cuando el metal base y la zona del arco están completamente rodeados de agua, se reduce drásticamente en la unión la cantidad de calor acumulada y por consiguiente el aumento de la temperatura del metal base en la zona aledaña al cordón de soldadura, por lo que debe destacarse el aumento de las velocidades de enfriamiento.

1.2 Transferencia de calor

Es necesario tener en cuenta la importancia del conocimiento de los fenómenos de transferencia de calor en la soldadura subacuática mojada y su comportamiento diferente al que ocurre cuando se suelda en ambiente seco. La transferencia de calor consiste en el paso de energía térmica desde una parte del cuerpo más caliente a la otra más fría.

Cuando un cuerpo está a temperatura diferente de la de su entorno, la transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor o intercambio de calor, ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen un equilibrio térmico.

Dadas las condiciones necesarias la transferencia de calor no podrá ser detenida, solo puede cambiar su velocidad, por ello el conocimiento de los diferentes fenómenos que dan origen a la transferencia de calor en la soldadura son de gran importancia teniendo en cuenta que las mayorías de los tipos de soldadura se logran con la aplicación de calor y en el caso que ocupa este trabajo cambia el medio circundante a un medio más agresivo desde el punto de vista de la velocidad de enfriamiento, el agua. Los principales fenómenos de transferencia de calor en la soldadura son conducción, convección y radiación.

La conducción es la transferencia de calor por difusión o vibración de los electrones, o sea la conducción de calor es un mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas, basado en el contacto directo de sus

partículas sin flujo neto de materia y que tiende a igualar la temperatura dentro de un cuerpo y entre diferentes cuerpos en contacto por medio de ondas.

La convención es la transferencia de calor por conducción en un medio en movimiento, como un fluido, o sea la convección es la combinación de conducción y transferencia de energía térmica a través de fluidos en movimiento o el movimiento de grupos de partículas calientes hacia áreas más frías en un medio material.

El caso de la radiación es la transferencia de calor por radiación electromagnética o equivalentemente por fotones. Fríos o calientes, todos los objetos emiten radiación a un índice igual a su emisividad multiplicada por la radiación que emitiría si fuera un cuerpo negro. Para que la radiación ocurra no se necesita ningún medio; la radiación incluso ocurre en vacío perfecto.

La temperatura alcanzada en una zona determinada de la unión soldada dependerá de la cantidad de calor suministrado y del fenómeno de la conducción determinado según sea el medio circundante y las propiedades termofísicas del medio y del material. Para cada unión soldada queda definido de esta manera, el ciclo térmico o comportamiento de las isotermas alrededor del foco térmico correspondiente al caso.

Diferentes tipos de estructuras dependientes de los fenómenos térmicos son obtenidas, de aquí que la mayor ventaja que representa el conocimiento de los fenómenos de transferencia de calor en la unión soldada y lo que ocurra en cada caso en particular es poder predecir las estructuras que aparecerán en las diferentes subzonas de la ZAC, así como la tendencia a la aparición de defectos inaceptables por las normas establecidas.

De esta manera queda inferido que los aspectos de calidad de la unión soldada deben ser estudiados desde el enfoque del calor generado en la soldadura, las características del proceso de transferencia de calor y la influencia del ciclo térmico en las propiedades a través de las estructuras que se obtienen.

1.3 Soldadura SMAW aplicada bajo el agua

El proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW) en materiales de acero al carbón o acero C-Mn, pueden ser hechos en agua con virtual anulación de la fragilización por hidrógeno de tal forma que elimine también la posibilidad de fisuras, con el uso de electrodos especialmente diseñados y fabricados para esta aplicación.

Es importante también mencionar que, en lugares donde la necesidad de reparaciones son mayores, es decir, en áreas de agua salada, el éxito de la soldadura húmeda aumenta enormemente ya que cuanto más alta es la salinidad del agua, mayor es la estabilidad del arco de soldadura, las sales disueltas en el agua aumentan sus cualidades electrolíticas, permitiendo de este modo un arco más caliente y una soldadura más eficiente tal como indican las figuras 1.4 y 1.5.

Figura 1.4. Trabajos de soldadura húmeda en una brida.

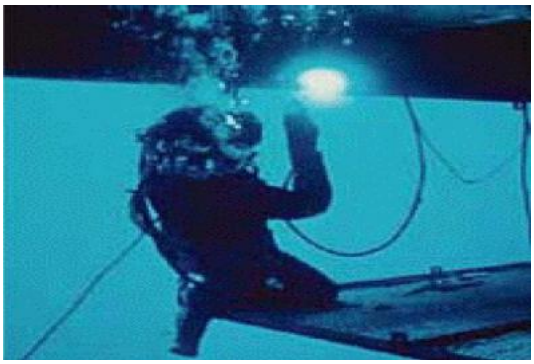


Figura 1.5. Trabajos de soldadura húmeda en casco de buque.

El principio de operación de la soldadura húmeda en el proceso de electrodo revestido (SMAW) es exactamente el mismo que aquel realizado en superficie.

La soldadura por arco, es el proceso de unir uno o más metales mediante la coalescencia o junta sobre una cara de contacto por medio del calor del arco eléctrico. En el caso del proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW) se emplea un alambre de metal sólido de material estirado o colado que se denomina núcleo del electrodo el cual se encuentra recubierto por un polvo fundente.[1]

1.3.1 Soldadura SMAW. Características para su aplicación bajo el agua

Para iniciar el proceso de soldadura bajo agua mojada se debe contar con una fuente de poder la cual siempre debe ser una máquina de corriente directa, con una capacidad de 300 ó 400 amperes. Con frecuencia se emplean máquinas de soldar de motor generador para trabajos bajo agua mojada y en ambiente húmedo.

Se debe conectar el bastidor o tierra de la máquina de soldar con el barco o la estructura objeto de soldadura. El circuito de soldadura debe incluir un interruptor de positivo, generalmente un interruptor de cuchillas, que se maneja desde la superficie bajo el mando del buzo/soldador. El interruptor de cuchillas en el circuito del electrodo debe ser capaz de cortar la totalidad de la corriente del soldar. Se necesita por razones de seguridad.

La corriente de soldar debe conectarse al porta electrodo sólo cuando el soldador esté soldando. Se usa corriente directa con electrodos negativos (polaridad directa). Se emplean porta-electrodos para soldar bajo el agua los que tienen cavidad para dos tamaños de electrodos, generalmente de 4.8mm (3/16"). Los tipos de electrodos que normalmente se usan cumplen con la clasificación AWS E6012, y AWS E 6013 además deben ser impermeables.

La impermeabilidad se logra envolviendo con cinta impermeable o sumergiéndolos en una mezcla de silicón de sodio u otro material impermeable. En el Centro Investigación de Soldadura de nuestra Facultad un grupo de investigadores se

encuentran participando en proyectos para el desarrollo de diferentes tipos de impermeabilizantes. Debe decirse que ya existen electrodos para soldar bajo el agua en el mercado de materiales de soldar.

El conductor para soldar y la tierra deben ser por lo menos cables AWG 2, y el aislamiento debe ser perfecto. Si la longitud total del cable rebasa los 100 m, deben colocarse dos en paralelo. Con los conductores en paralelo hasta el porta electrodos, el último metro puede ser de cable sencillo. Todas las conexiones deben estar aisladas cuidadosamente para que el agua no pueda llegar a hacer contacto con las partes metálicas conductoras.

Si se pierde el aislamiento, el agua de mar hará contacto con el metal conductor y parte de la corriente se fugará y no estará disponible en el arco. Además, habrá un rápido deterioro del cable de cobre o conductor empleado en la zona de fuga.

El cable de tierra debe conectarse a la pieza de trabajo que se vaya a soldar a una distancia menor de 1m del punto donde se suelda; este contacto debe estar completamente aislado y usa abrazadera para sujetar el electrodo. La pinza incluye una válvula de oxígeno y las conexiones para fijar el cable de soldar y una manguera de oxígeno. Está equipado para manejar electrodo tubular hasta de 7.9 mm (5/16"). En este proceso se inicia el arco del modo normal y el oxígeno se alimenta a través del agujero central del electrodo para dar la sección de corte. Se emplean las mismas conexiones eléctricas anteriormente mencionadas. [2]

CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE LOS FACTORES DETERMINANTES DE LA PROPIEDAD DE SOLDADURA.

2.1 Problemas de soldabilidad.

Según puede observarse en la figura 2.1, la propiedad de soldadura depende de los problemas de soldabilidad que están relacionados con el material, los factores tecnológicos del proceso y en este caso el medio circundante (agua), al actuar determinan la resistencia que garantiza la unión soldada durante el servicio.

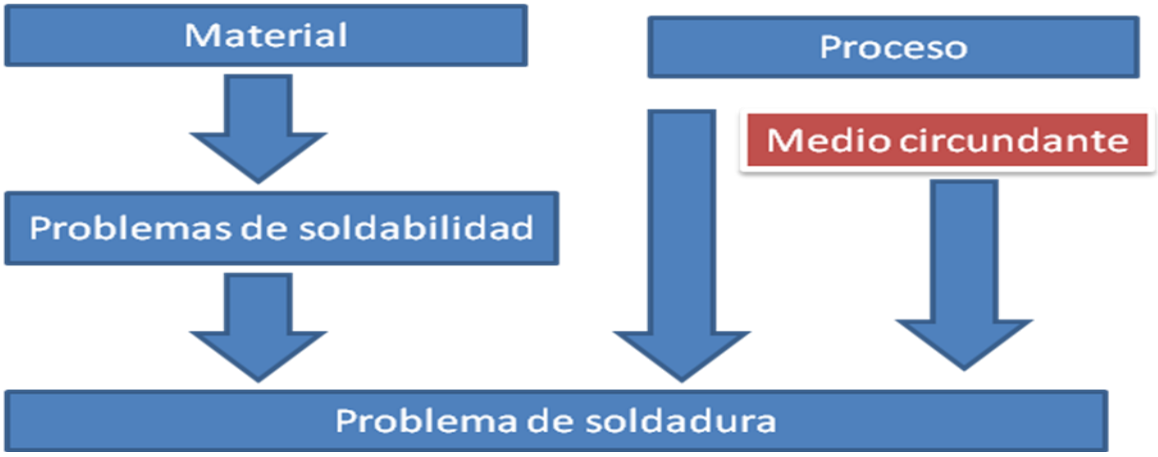


Figura 2.1. Influencia del medio circundante en la propiedad de soldadura.

La soldabilidad es un término que básicamente está referido a la capacidad de un material al ser soldado bajo determinadas condiciones de diseño y fabricación, y en el caso que ocupa a esta investigación, se considera importante el medio circundante donde se realiza la soldadura para cumplir adecuadamente su función durante su vida de servicio. Como se ha representado en la figura 2.2, uno de los factores determinantes en los problemas de soldabilidad de un acero al carbono o

de baja aleación es su capacidad de resistir al agrietamiento en el área soldada, por lo que es adecuado valorarla en base a la sensibilidad al agrietamiento, fundamentalmente el agrietamiento en frío. [3].

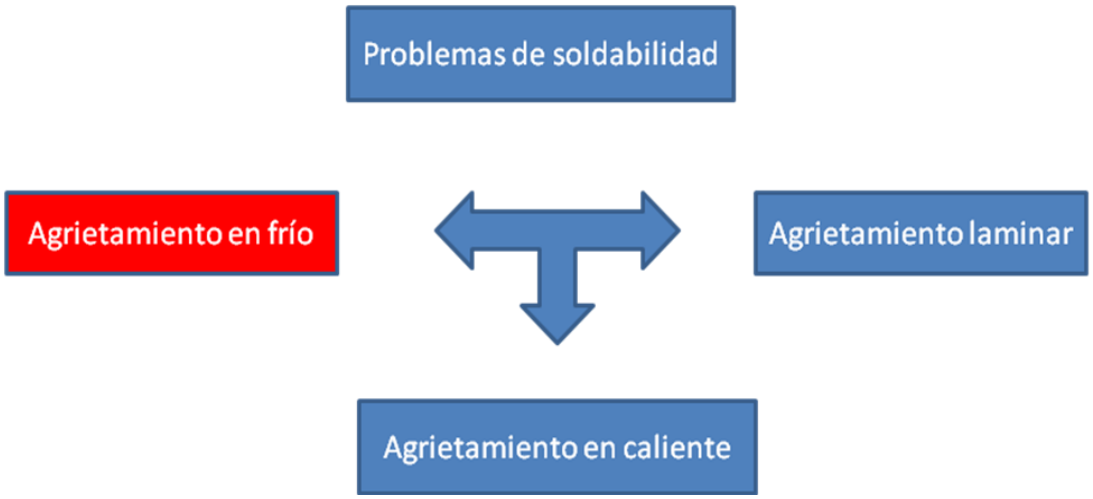


Figura 2.2. Tipos principales de clasificación del agrietamiento.

La soldabilidad, en primer lugar, hay que verla dentro de un conjunto de factores, presentados en el seminario “Aspectos metalúrgicos de la soldadura por fusión”.[4]

El carbono es el principal elemento que define las particularidades de los aceros, por ello se le atribuye la máxima responsabilidad en el cambio de sus propiedades. Por ejemplo la soldabilidad se clasifica por algunos autores en buena, regular o mala; en dependencia del por ciento de carbono que tenga el acero en su composición. Kasuya y Yurioka [5]. En su trabajo relacionado con el carbono equivalente, demuestran todos los factores a considerar desde el punto de vista de la composición química del acero, resaltando el efecto de los elementos de aleación desde la óptica metalúrgica.

Aunque el contenido del carbono no es el único factor que afecta la soldabilidad de los aceros, cuando se incrementa el por ciento de este elemento, aumentan los problemas de agrietamiento de los mismos. Cuando los niveles de carbono alcancen el rango de (0.30-0.35) %, normalmente se requiere tomar precauciones especiales, como son el precalentamiento, el control de la entrada de calor y el

tratamiento térmico post soldadura. A menudo se recomienda el uso de materiales y procesos que introduzcan bajos niveles de hidrógeno para lograr una soldadura exitosa, aspecto que por su importancia, aparece profundamente discutido en la literatura, con recomendaciones precisas como es el caso de los trabajos publicados por la TWI [6] y otros [7].

Kasuya y Hashiba [8] han trabajado en la predicción de la dureza alcanzada en la ZAC y afirman que esta, puede ser utilizada para obtener información relativa a la soldabilidad de un acero, en particular la sensibilidad a la fisuración en frío, la cual es consecuencia fundamentalmente de las transformaciones estructurales en la ZAC y por el hidrógeno difusible.

La dureza máxima en la ZAC depende no sólo del contenido de carbono, sino también de la templabilidad del acero por la influencia de otros elementos de aleación bajo los ciclos térmicos.

La máxima dureza en una unión soldada se encuentra en la zona de sobrecalentamiento, debido a que en este caso por existir un elevado gradiente de temperatura, se alcanza la máxima velocidad de enfriamiento. También en esta zona el tiempo de permanencia es mayor a alta temperatura (> 1000 º C) lo que provoca crecimiento del grano, aspecto discutido en la literatura por Karthik [9] y Nawrocki [10]. Como puede apreciarse estas consideraciones son hechas por la literatura para la soldadura al aire sin embargo debe ser considerada la alta velocidad de enfriamiento en la soldadura bajo agua mojada, siendo entonces su efecto fundamental en la obtención de estructuras duras y no en el crecimiento del grano.

Según lo analizado, no es posible predecir con suficiente precisión el valor de la máxima dureza en la ZAC, considerando solamente la composición química del acero a soldar, es decir, aplicando la fórmula de carbono equivalente, sin valorar el efecto de las velocidades de enfriamiento según la capacidad de enfriamiento del medio en correspondencia al aporte de calor de la fuente, temperatura y dimensiones de la pieza.

La velocidad de enfriamiento tiene un efecto predominante sobre la dureza a alcanzar en la ZAC, sobretodo en el intervalo de temperaturas considerado como críticas (800-500) ºC, según Lorenz [11] y Hrivnak [12]. Esta velocidad de enfriamiento se valora en la práctica a través del coeficiente $t_{8/5}$, que representa el tiempo de permanencia en el intervalo de temperaturas entre (800-500) ºC.

La expresión 1.1, presentada por Mannesmann [13], permite predecir la dureza en la ZAC en función de la composición del acero a soldar y del tiempo de permanencia en el intervalo de temperaturas entre (800 -500) ºC.

$$Hv = 2019\left[C\left(-0.5\log t_{8/5}\right) + 0.3\left(\frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{17} + \frac{O}{6} + \frac{V}{3}\right)\right] + 66\left(-0.8\log t_{8/5}\right) \quad (1.1)$$

Donde:

Hv -Dureza en la zona afectada térmicamente (Vickers).

$t_{8/5}$ -Tiempo de permanencia entre (800-500) °C.

Según Beckert [14], la dureza en la zona afectada por el calor no debe sobrepasar los 350 Vickers (350 Hv) para tener seguridad de que no existe sensibilidad de agrietamiento en frío.

Otros investigadores en 1981, K. Lorenz y Düren proponen ecuaciones similares donde se evalúa la máxima dureza en la ZAC válida para distintos porcentajes de martensita, como puede ser el caso de la soldadura de este acero bajo el agua. Debe tenerse en cuenta que lo discutido en la biografía hasta el momento así como las recomendaciones encontradas se refiere al caso de la soldadura al aire, por lo que no deben ser empleadas.

Tabla 2.1 Composición química metal base. [15]

AISI	C	Mn	S	P
1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.040	0.050

A partir de la expresión 1.1, considerando la composición química del acero empleado en la presente investigación (AISI 1020) de los que pueden ser empleados en construcciones subacuáticas. Cuando el tiempo entre las temperaturas críticas (800- 500) °C sobrepasa los 12 segundos.

Existen notas de trabajo experimentales publicadas en las que se recomiendan ligeros pre-calentamientos, por el orden de los 90°C, para este tipo de acero estructural (AISI 1020). También se proponen expresiones para el cálculo del valor de la temperatura de precalentamiento, basadas fundamentalmente en la composición química del acero, espesor de la chapa a soldar y las más completas tienen en cuenta la velocidad de enfriamiento ($t_{8/5}$) de acuerdo al tipo de unión.

En el caso de la soldadura bajo agua mojada, al no ser posible el empleo de temperaturas de precalentamiento, se han realizado propuestas de materiales de soldar con generación adicional de calor, además de recomendarse altos niveles de aporte térmico, teniendo en cuenta también, la disipación del calor a través del metal base y las pérdidas por convección y radiación que responden a las particularidades de la pieza y lugar de la soldadura, el que su comportamiento en cuanto al enfriamiento es más agresivo que al aire, por lo que la utilización de expresiones generales pueden conducir a errores de cálculo, en cuanto a los ciclos térmicos, distribución de temperaturas y temperaturas máximas.

2.2 Ciclos térmicos de soldadura

El estudio de los ciclos térmicos en soldadura es un tema en extremo complejo, puede esto ejemplificarse cuando se ve que aparecen con frecuencia en la literatura especializada su estudio bajo distintos enfoques, por ejemplo:

- Utilizar ecuaciones térmicas que permitan establecer distancias características, compararla con mediciones in situ, obtener regresiones para analizar la coherencia de los valores, todo esto suponiendo una cantidad importante de simplificaciones.
- Desde el punto de vista de microestructura analizando las ecuaciones de difusión y transformaciones de fases que permitan determinar la distancia entre

las isotermas, por supuesto que este último requiere del manejo de información distinta al previo y en extremo compleja.

Cabe destacar la importante cantidad de bibliografía disponible acerca de estudios realizados sobre ciclos térmicos en soldaduras.

A continuación se presentará y se discutirán algunos conceptos presentes en la bibliografía.

El proceso de soldadura por arco eléctrico al ser una operación totalmente localizada, tiene algunas características de las técnicas de fusión y otras del tratamiento térmico convencional, esto se debe a que presenta una zona de material totalmente fundido y otra en la cual el material ha sufrido un calentamiento.

Este proceso ocurre en tiempos muy cortos y con una variación de temperaturas extremas que van desde la fusión hasta aquellas que no afectan la estructura del metal base.

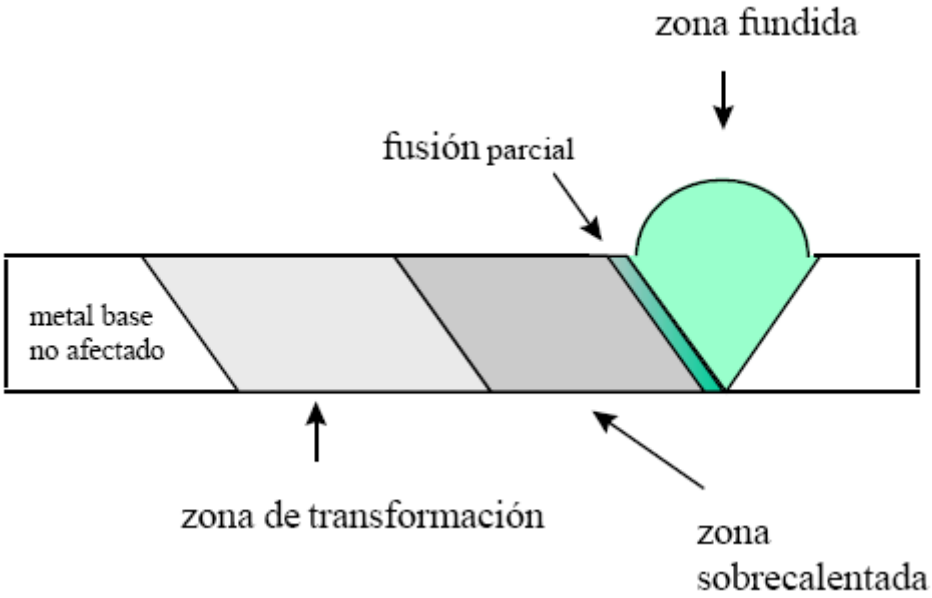


Figura 2.3. Representa esquemáticamente estas regiones.

Como consecuencia de esto se originan velocidades de enfriamiento variables y muy rápidas dentro de cada zona: zona fundida, fusión parcial, zona sobre calentada, zona de transformación, metal base no afectado. Existen otros criterios

de clasificación destacándose el que considera el comportamiento ante propiedades exigidas.

La distribución de temperatura y la velocidad de enfriamiento en cada zona del cordón y sus adyacencias está influenciada por:

- Aporte de energía.
- Diámetro del electrodo.
- Temperatura inicial o de precalentamiento T_0.
- Geometría de la junta.
- Características térmicas del material.
- Condiciones particulares de enfriamiento.

La velocidad de enfriamiento a una determinada temperatura está gobernada por la difusividad térmica del material ‘a’ dada por:

a = l (m2/seg) r Cp

La figura 2.3 ilustra el efecto del calor aportado concentrado en el centro de un cordón de soldadura, representando las distintas isotermas que se generan a distintas distancias del arco. El punto cero representa el centro del cordón, hacia la izquierda tenemos isotermas de calentamiento y hacia la derecha de enfriamiento. Considerando que la temperatura de fusión del acero es de 1539 ºC y la temperatura correspondiente a la transformación austenítica es de 815 ºC, entonces entre estas dos isotermas tenemos la región sobrecalentada y entre (815-540) ºC la región transformada.

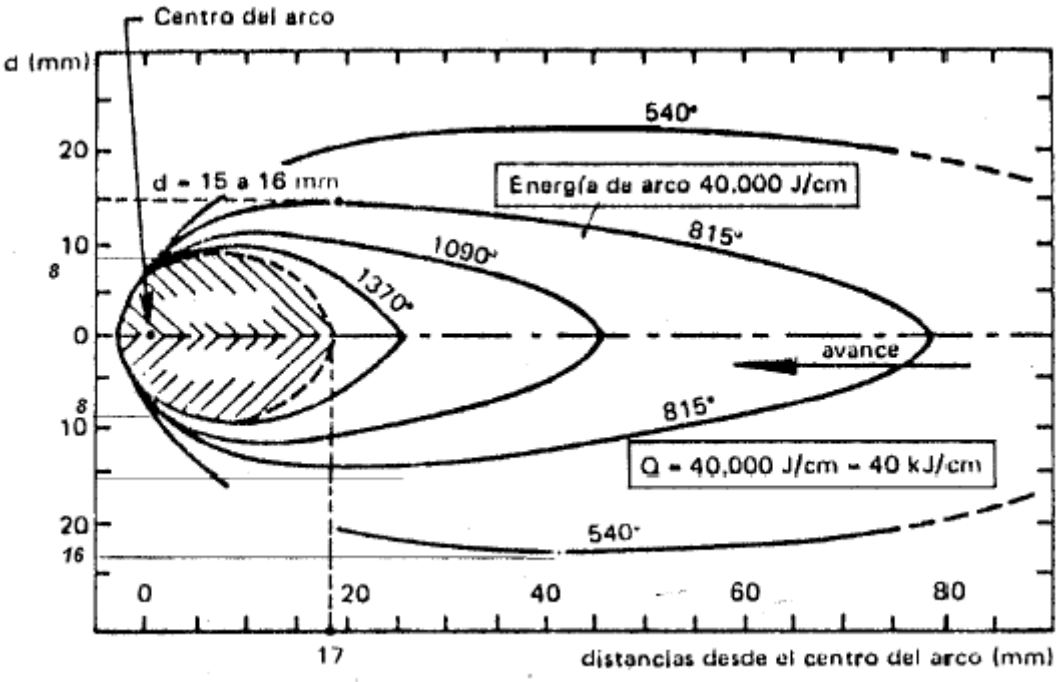


Figura 2.4. Ciclos térmicos.

Durante la garantía de la calidad en cualquier trabajo de soldadura debe conocerse con precisión lo referido a la soldabilidad y su relación con el ciclo térmico de soldadura. Lo anterior establece la propiedad de soldadura de la construcción soldada.

La soldabilidad del acero se refiere a cómo poder lograr una unión soldada sin defectos y por consiguiente como actúa la unión durante el servicio.

Considerando un sentido estrecho, dentro de la complejidad, la soldabilidad preferiblemente significa que pueden soldarse aceros con ZAC menos endurecidas y sin riesgo de que ocurra el agrietamiento en frío, debe tenerse en cuenta además, la necesidad de obtener uniones con poca presencia de hidrógeno.

La soldabilidad del acero fue evaluada por mucho tiempo de forma empírica durante la práctica de realización de la soldadura. Sin embargo, algunos estudios se han llevado a cabo para evaluar la soldabilidad del acero desde el punto de vista de la metalurgia física.

En cualquier proceso de la soldadura, la microestructura de las partes soldadas sufren cambios considerables debidos al calentamiento y al ciclo de enfriamiento

de la zona de la soldadura que a su vez se relaciona directamente al proceso de soldadura y a las técnicas empleadas.

En cualquier proceso de la soldadura, la microestructura de las partes soldadas sufren cambios considerables debido al calentamiento y al ciclo de enfriamiento de la zona de la soldadura que a su vez se relaciona directamente al proceso de soldadura a las técnicas empleadas y en el caso que nos ocupa se debe incluir el medio circundante. Sólo mejorando la microestructura de la ZAC las propiedades de una unión soldada puede ser mejor. En general, algunas variables del proceso de soldadura y las condiciones de operación influyen en las características de la microestructura, y por consiguiente, en la solidez, la dureza, y la susceptibilidad al agrietamiento de la ZAC en fusión del acero soldado.[16]

Al enfrentar la unión mediante el proceso de soldadura eléctrica es importante elegir adecuadamente el proceso que garantice las propiedades exigidas de la pieza para su correcto funcionamiento y con la mayor productividad. La elección del proceso adecuado debe llevar un estudio y selección de variantes según las posibilidades existentes, así como de los elementos del régimen. Uno de los aspectos que marcan la eficiencia del proceso y su efecto en la unión soldada es, sin duda alguna, la forma de distribución del calor generado por el arco.

En el proceso (SMAW) del calor inicial, un 15% se emplea en la fusión del recubrimiento y el otro 15% en la fusión del cuerpo metálico del electrodo. Este 30% se conoce como energía para la fusión; por estar el arco en contacto con el medio, hay un 15% que se pierde por irradiación al ambiente, por lo que llega sólo un 55% hasta el metal base, de este un 10% va a la raíz y el 45% del calor restante pasa al interior de la pieza por conducción (véase Figura 2.5).

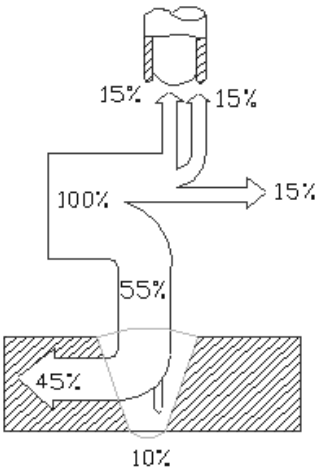


Figura 2.5. Distribución de la energía generada por el arco eléctrico.

Como debe entenderse en el párrafo anterior se ha tomado de la bibliografía la distribución calórica para el caso de la soldadura (SMAW) realizada al aire, el caso que ocupa este trabajo difiere, pues sucede que el arco de soldadura y la transferencia de calor en el agua como medio circundante es mucho más agresivo que el aire a iguales temperaturas iniciales.

2.3 Efectos térmicos

Hay varias maneras mediante las cuales pueden cambiar las propiedades reales de las uniones soldadas, se destaca en este sentido los efectos térmicos y este a su vez podrá cambiar debido a cambios en el proceso elegido o de una forma más amplia producto del procedimiento establecido, estos conceptos han sido adecuadamente considerados en el estudio y discusión de la soldadura al aire. Por ejemplo, la diferencia en el nivel de precalentamiento puede producir cambios en la resistencia y en la dureza. Un alto precalentamiento y la temperatura alcanzada como consecuencia de las interpasadas generalmente reducen la resistencia de la unión y normalmente mejoran la resistencia al impacto aunque pueden afectar la resistencia a la fatiga. Otro caso se presenta en la soldadura bajo agua mojada donde el enfriamiento es severo y los regímenes de soldadura tendrán que ser severos también para lograr las dimensiones de los cordones necesarios según el diseño.

De esta manera la entrada de calor será también diferente considerando la influencia ejercida por el diámetro del electrodo, el voltaje de arco, el amperaje, la polaridad de la corriente, la velocidad de soldadura y la posición de soldadura sobre todo para el caso de la (SMAW). Todos estos afectan la entrada de calor que es calculada multiplicando el amperaje de soldadura horas con el voltaje horas 60 y dividiendo el producto por la velocidad de soldadura. Algunos cálculos de entrada de calor incorporan el factor de eficiencia del proceso.

Para una corriente de soldadura mayor, por ejemplo, más calor se tendrá en la unión y se mantienen la misma velocidad de soldadura y un voltaje de arco constante. Es importante destacar que con un incremento de la velocidad de soldadura, los procedimientos de altas intensidades de corriente pueden ajustarse para mantener la misma entrada de calor y por tanto el mismo efecto térmico en la unión. [17]

La velocidad de enfriamiento también debe ser considerada. Esta depende de la temperatura de la pieza al inicio de la soldadura, la entrada de calor, el espesor o diámetro de la pieza, la geometría de la pieza y la temperatura del ambiente y las características termofísicas del medio circundante en el momento de la ejecución de la soldadura. En piezas de gran espesor o diámetro la conducción de calor se produce en tres direcciones por lo que la velocidad de enfriamiento se realiza de manera rápida. Por el contrario, una velocidad de enfriamiento más lenta es asociada con piezas de poco espesor o diámetro donde se transfiere el calor en sólo dos direcciones. Este proceso también depende de las propiedades de transferencia de calor del material de la pieza que se trate.

En este sentido es importante destacar que el control de todas las variables que intervienen en el proceso de soldadura se realiza de una forma más viable con el establecimiento de la Especificación del Procedimiento de Soldadura (EPS) que significa la combinación de variables con el fin de lograr una soldadura segura. A menudo lo referido consiste en los datos mínimos necesarios para el proceso como pueden ser la especificación de los materiales para soldar, las características eléctricas, la especificación del metal base, un mínimo

precalentamiento y temperatura interpasadas, corriente de soldadura, velocidad de alimentación del alambre, voltaje de arco y detalles del diseño de la junta. Esto puede ser visto como una información fácil de apreciar la que permite controlar adecuadamente todas las variables que intervienen en el proceso de soldadura.

Deben tenerse en cuenta muchos factores al seleccionar los valores de procedimiento de soldadura. En resumen, estos procedimientos proporcionan la guía necesaria para lograr la calidad requerida de la unión soldada. [18]

En cualquier proceso de soldadura, para un material determinado, la microestructura de las partes soldadas sufren cambios considerables debido al calentamiento y al ciclo de enfriamiento de la zona de la soldadura que a su vez se relaciona directamente al proceso de soldadura y a las técnicas empleadas. Sólo mejorando la microestructura de la ZAC, las propiedades de una unión soldada pueden ser mejores. En general, algunas variables del proceso de soldadura y las condiciones de operación influyen en las características de la microestructura, y por consiguiente, en la resistencia, la dureza, y la susceptibilidad al agrietamiento de la ZAC [19]. La entrada de calor excesiva podría producir una ZAC ancha con una resistencia al impacto baja, sin embargo en el caso de la soldadura bajo agua mojada aun con entradas de calor excesiva debe ser considerada la velocidad de enfriamiento alta, producto del medio circundante.

Desde un punto de vista metalúrgico, la ZAC puede ser dividida en tres zonas [20]: supercrítica, intercrítica, y subcrítica, como se muestra en la (Fig.2.6). La región supercrítica puede, a su vez, dividirse en dos regiones: la de crecimiento de grano y de afinamiento de grano, como se muestra en la (Fig.2.7). La microestructura de las regiones de crecimiento de grano y de afinamiento de grano de la zona supercrítica de la ZAC influye en las propiedades de la junta de la soldadura. Para predecir las propiedades de esta zona, se debe saber la cantidad y magnitud del crecimiento de grano y del ciclo térmico de la soldadura. La entrada de calor del proceso de la soldadura debe limitarse para mantener el ancho de la zona supercrítica de la ZAC tan estrecho como sea posible. Además, la zona supercrítica sufre cambios microestructurales considerables comparados con los cambios estructurales pequeños e insignificantes de las zonas intercrítica y

subcrítica. Estos cambios microestructurales afectan las propiedades mecánicas y metalúrgicas de las partes soldadas [21]. Por consiguiente, el tamaño de la ZAC es una indicación de la magnitud de cambios estructurales. Debido a que las dimensiones de la ZAC son controladas por variables del proceso y la entrada de calor, y se fundamentan por leyes físicas, estos pueden relacionarse a través del desarrollo de modelos matemáticos.

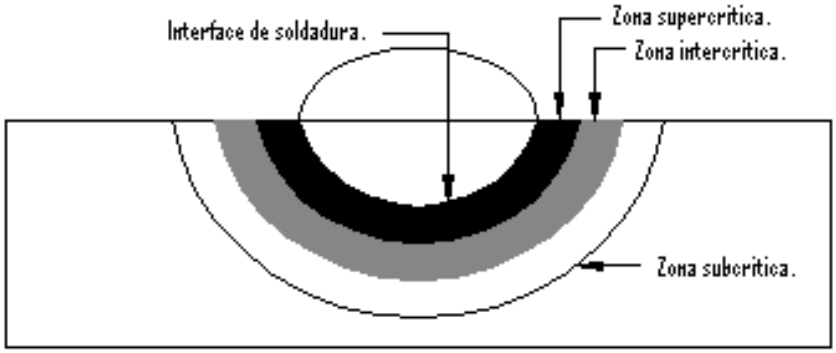


Figura 2.6. Diferentes zonas afectadas por el calor.

La Figura 2.6 muestra el efecto de entrada de calor en las varias dimensiones de la ZAC, es decir, los anchos de la Interfase de la Soldadura (IS), la Zona de Crecimiento de Grano (ZCG), Zona de Afinamiento de Grano (ZRG) y la Zona Supercrítica de la ZAC. Se observa el aumento de todos estos con un aumento en la entrada de calor o energía del arco en dicha figura. Esto es porque un aumento en la entrada de calor trae como resultado una disminución de la velocidad de enfriamiento. Además, el incremento de la entrada de calor generalmente produce un tamaño del baño de soldadura y de área fundida más grande.

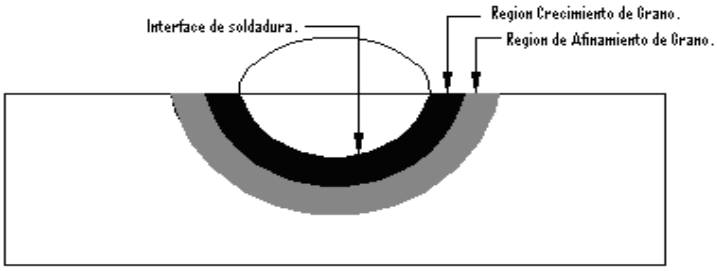


Figura 2.7. Diferentes regiones de la zona supercrítica de la zona afectada por el calor

CAPÍTULO 3. OBTENCIÓN DE LOS CICLOS TÉRMICOS POR MODELACIÓN.

El estudio de los ciclos térmicos en la unión soldada en el caso de la soldadura bajo agua mojada se hace difícil, considerando en primer lugar por las características del proceso de enfriamiento producto del medio circundante (agua) además de las condiciones de ejecución de los trabajos. Debe destacarse que el empleo de termopares e instalaciones sensibles para la adquisición de datos que requieren precisión es en extremo difícil. También los costos para realizar el trabajo experimental pueden resultar altos por las características de simulación de las condiciones reales de ejecución de los trabajos de soldadura bajo agua mojada. Hay que soldar para evaluar diferentes condiciones de temperatura o probetas que garanticen los ciclos térmicos de la unión, con un comportamiento similar al que presenta la pieza durante la soldadura o la reparación.

Una vía para obtener lo referido al comportamiento de los ciclos térmicos en la unión soldada es la modelación, a partir del método de elementos finitos (MEF).

En el presente capítulo con el empleo del método de elementos finitos (MEF) se evaluarán los ciclos térmicos para la soldadura por el proceso SMAW con idénticos niveles de aporte térmico, para el caso de la soldadura al aire y la soldadura bajo agua mojada.

Estos resultados permiten obtener gráficamente los ciclos térmicos y la velocidades de enfriamiento entre los (800-500) °C para el caso de la soldadura bajo agua y al aire, de manera que pueda ser evaluada la obtención de una unión

soldada sin el riesgo de agrietamiento en frío a partir de las consideraciones reportadas por la literatura [22] y comparar los resultados con diferentes medios circundantes actuando en el proceso de enfriamiento.

El estudio anterior se hace en la zona de la unión de soldadura de mayor sensibilidad al agrietamiento, es decir aquella donde se alcanzan las velocidades de enfriamiento mayores.

3.1 Consideraciones para la realización de la modelación

Comúnmente en la modelación de los fenómenos térmicos se consideran un conjunto de simplificaciones con el objetivo de reducir la complejidad del fenómeno de la transferencia de calor facilitándose la realización del trabajo.

En el campo de la soldadura se han desarrollado diversos trabajos de modelación de los ciclos térmicos por diferentes autores, algunos de ellos ya referenciados en el presente trabajo, otros como los casos de Bros y Jang [23], [24], en la simulación de la soldadura bajo al agua mojada, de lo cual que no se ha encontrado trabajo precedente.

Recientemente, García, Y. [25], y Martínez García, Ramón C. [26] en sus trabajos de investigación relacionada con el cálculo de los ciclos térmicos de soldadura y su influencia en los estados tensiónales y para la obtención de procedimientos de reparación de guijos agrietados han tenido también en consideración para la modelación las características de la fuente de calor resultante del arco de soldadura. Los resultados obtenidos en este caso, mediante la modelación por (MEF) en comparación con los datos experimentales no sobrepasan el 5 % de error.

Sobre la base de los resultados prácticos de trabajos anteriormente referenciados y de los análisis realizados por sus autores se han empleado para la modelación del presente trabajo. En las consideraciones que se indican en los epígrafes siguientes se tiene en cuenta el coeficiente de disipación térmica como factor importante. Esto garantiza que se logre correspondencia entre los resultados obtenidos por (MEF) y los valores prácticos.

3.1.1 Cosideraciones generales sobre la generación del calor aportado por el arco de soldadura

Existen diversas formas de simular la generación de calor, una de ellas es por el modelo de John Goldak de doble Elipsoide [27], empleado por Esser [28] y otros investigadores para soldaduras por arco eléctrico. Este modelo considera que el voltaje y la corriente eléctrica entregan la potencia calorífica necesaria para fundir el material de aporte y parte del material base, donde las pérdidas de calor serán consecuencia de la eficiencia del proceso o sea, por evaporación, convención y radiación; además se tiene en cuenta la pérdida de calor por conducción lo que acentúa enfriamiento rápido producto del agua circundante. En este trabajo se ha empleado el software profesional Cosmos Design Star (CDS), producido por “Structural Research and Analysis Corp”, [29] el cual considera los aspectos planteados anteriormente, razones que justifican su aplicación para resolver problemas no lineales por elementos finitos en el análisis del flujo de calor transiente como es el caso típico de la soldadura. Además es compatible con el software “Mechanical Desktop” [30] para la asimilación de figuras complejas dibujadas con este programa.

3.1.2 Análisis y consideraciones para la introducción de los datos de entrada y para la modelación por MEF en la soladura bajo agua mojada y su comparación con la soldadura al aire

De acuerdo al programa seleccionado, CDS 4.0, y la experiencia acumulada por otros autores, a continuación se presentan los diferentes datos necesarios y la forma de introducirlos para la evaluación correspondiente.

Convección:

Para la convección se toma como temperatura exterior a la pieza la ambiente o la de precalentamiento según el caso a estudiar y se asume que el proceso de soldadura se realiza en condiciones de taller, donde la convección no es forzada (Coeficiente = 7 W/m^2K)

Para el caso de la soldadura mojada bajo el agua el coeficiente es muy superior al anteriormente puesto y está referido a la capacidad que tiene el agua de disipar el calor.

Radiación:

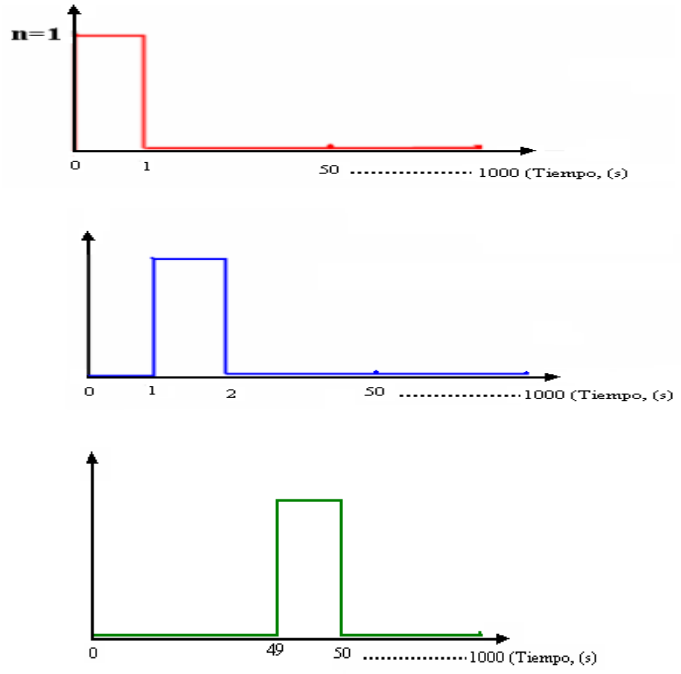
Emisibilidad = 0.9 (independiente de la temperatura). Considerarlo en recomendaciones

Carga Térmica: (Heat Loads):

En este caso se emplean los diferentes valores de aportes térmicos que se seleccionan de acuerdo al proceso o conveniencia de la soldadura.

Curvas de Tiempo:

Se emplean curvas de tipo rectangular para lograr el desplazamiento de la fuente, a partir de la discretización del tiempo, según resultados derivados de las investigaciones de García, Y. [31],



Donde: n=1, es el 100% del Calor de Entrada

Figura 3.1 Representación gráfica de las curvas de tiempo empleadas en la modelación.

Las curvas representadas en la figura 3.1, corresponden a las 15 curvas de tiempo empleadas en la discretización por “partes”, según la velocidad de desplazamiento.

Propiedades del Material:

La densidad se considera constante respecto a la temperatura. No obstante, la conductividad térmica y el calor específico se comportan según las gráficas de las figuras 3.2 y 3.3 respectivamente. En las propiedades térmicas se desprecia el efecto de la variación de la microestructura y se considera que estas dependen únicamente de la temperatura y no de la historia térmica, disminuyendo de esta forma la complejidad computacional [32]. Estas propiedades dependientes de la temperatura pertenecen al acero AISI 1020, considerado en aceros empleados para tales casos.

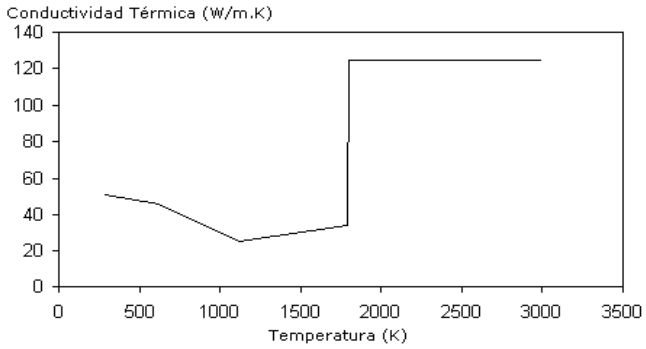


Figura 3.2 Conductividad Térmica vs. Temperatura.

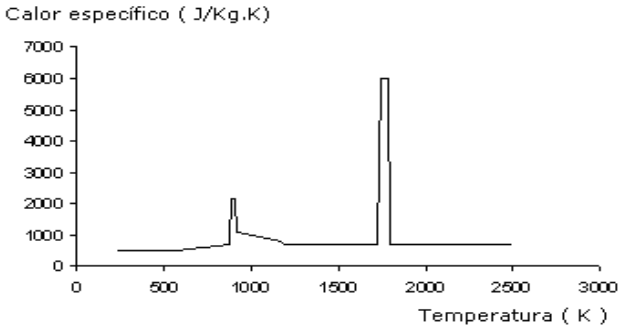


Figura 3.3 Calor Específico vs. Temperatura.

Condiciones de Carga:

El software profesional “Cosmos Design Star”, seleccionado en el presente trabajo para realizar la modelación, da la posibilidad de introducir el nivel calorífico como un “Volume Heat”, o sea, como fuente de calor volumétrica (W).

En la figura 3.4, se muestra la forma geométrica de la unión soldada objeto de estudio, indicándose el volumen considerado para la entrada de calor en W / (cm/s), por cada uno de los sectores a través del cual se desplaza el arco de soldadura.

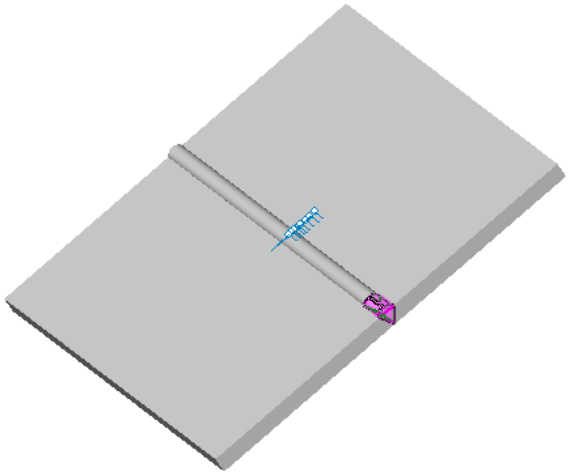


Figura 3.4 Modelo de la preparación de borde y del cordón para la modelación.

La geometría que se muestra en la figura 3.4, tiene en cuenta medidas posibles para casos reales de aplicación en estos casos de soldaduras bajo agua.

Mallado del Modelo.

El tipo de mallado seleccionado para realizar la modelación, se caracteriza por elementos sólidos de tetraedros parabólicos. (Figura 3.5) aplicando un afinado en la zona próxima a la ZAC, para determinar con mayor precisión la distribución de temperaturas en dicha zona. Esto se recomienda por el propio programa CDS.

Figura 3.5 Tipo de elemento seleccionado para la modelación.

En la figura 3.6, se presenta el modelo considerado y el mallado para la modelación correspondiente al comportamiento de los campos de temperatura en la zona afectada por el calor.

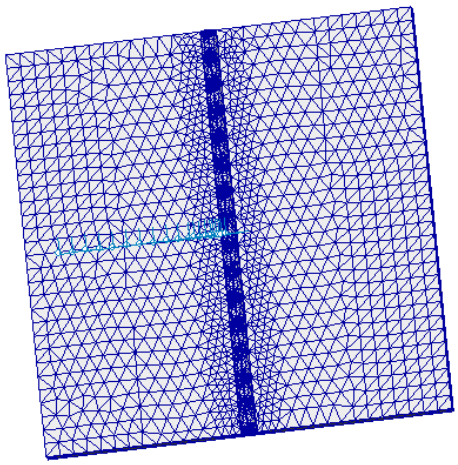


Figura 3.6 Modelo considerado y el mallado.

El método empleado para definir el tamaño del elemento se basa en hallar el comportamiento de los resultados para una disminución progresiva del tamaño de los elementos finitos. Para el caso particular del presente trabajo, el estudio ha considerado las diferencias que introduce en los resultados de las curvas correspondientes a los ciclos térmicos en la ZAC y las variaciones en las dimensiones de la malla. A partir de esta evaluación fue definido su tamaño para la modelación.

En el presente trabajo se han evaluado ya los problemas relacionados con la soldabilidad y el efecto final en la propiedad de soldadura del acero objeto de estudio, demostrándose que según su composición química y volumen de la pieza y acción sobre el enfriamiento del medio circundante existe la posibilidad de aparición del agrietamiento en frío.

Para el caso particular de la soldadura bajo el agua mojada, debido a la temperatura en la pieza y del calor aportado por el arco y las características de enfriamiento del medio circundante pueden obtenerse velocidades de enfriamiento

en la zona afectada térmicamente para el cordón que favorecen la aparición del fenómeno de agrietamiento en frío.

A partir de la valoración anterior, se ha considerado evaluar mediante el MEF el comportamiento de las velocidades de enfriamiento en la zona afectada térmicamente para distintos valores de velocidad de enfriamiento.

3.2 Ejemplo de la simulación

Considerándose un estudio transiente y un análisis térmico, empleándose un mallado sólido como ya ha quedado definido en el desarrollo del presente trabajo, deben ser introducidos los datos iniciales en el programa CDS.

Para la modelación de un caso a modo de ejemplo, sólo queda por definir valores particulares del flujo de calor, tiempo y temperatura, durante soldadura bajo agua mojada y al aire, valores que aparecen a continuación:

- Tiempo de inicio del estudio – 0.001 seg.
- Tiempo final – 57.45 seg.
    - Temperatura inicial de la pieza 27ºC (Temperatura de ambiente)
- Aporte de calor - 2700 W
- Las propiedades del material son tomadas de la Llave de los Aceros referenciada anteriormente en la que se considerará que los valores de la conductividad térmica y el calor específico dependen de la temperatura como ya se ha discutido anteriormente.
- Para el estudio se introduce el modelo que incluye la geometría formada por los fragmentos de cordón según la figura 3.4 y el metal base que se corresponde, dibujado en “Mechanical Desktop” 4.
- Son introducidos los datos de radiación y convención en “Metal Progress” que puede presentarse en cada una de las caras del conjunto a estudiar.
- Como dato de entrada que caracteriza a cada una de las modelaciones en este ejemplo en particular se ha seleccionado el calor de entrada volumétrico en cada uno de los sectores del cordón de raíz el valor de 2700W.

El programa permite obtener las curvas de temperatura en función del tiempo para el punto seleccionado en la ZAC, así como la distribución del calor del objeto de estudio en cada instante de tiempo especificado. En el trabajo, según los objetivos de la modelación, se han obtenido específicamente los ciclos térmicos en los puntos que alcanzan temperaturas entre (950–1200) º C, teniendo en cuenta que según la expresión 3.1, desarrollada por R.A. Grange [33], la temperatura final para la transformación austenítica del acero AISI 1020 es de 813 ºC. Bowers [34], establece el rango900º C y 1200 ºC, como los valores de temperaturas que determinan la zona supercrítica con gradientes de temperatura máximos y posibilidad de agrietamiento mayor.

$A_{c3} = 1570 – 323\ C - 25\ Mn + 80\ Si$ (3.1)

En la figura 3.7, se muestra el comportamiento de la temperatura en función del tiempo para la zona crítica del caso evaluado.

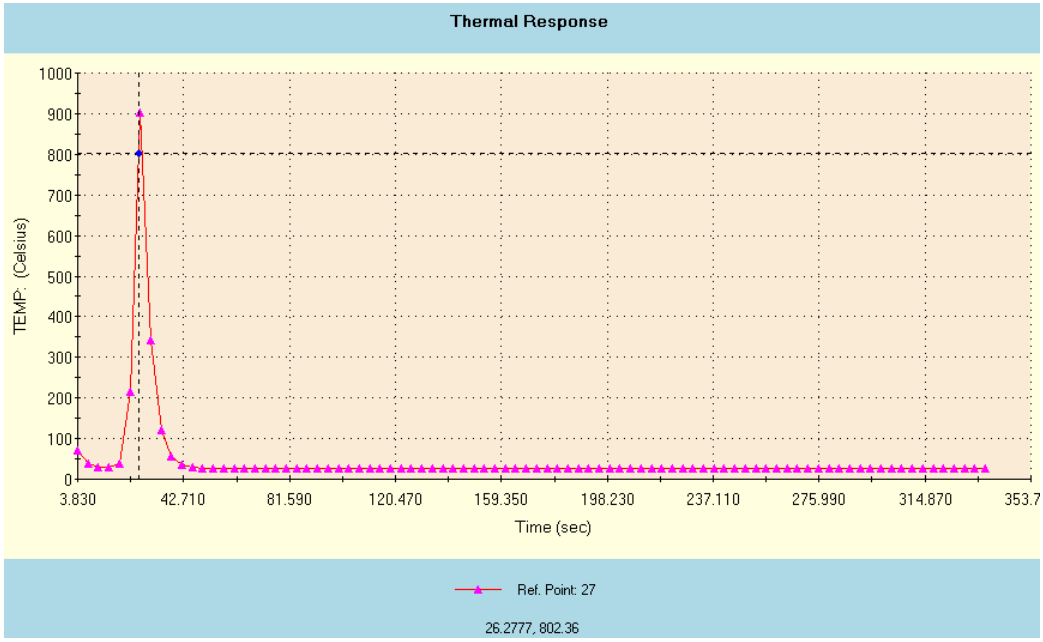


Figura 3.7 El punto muestra una temperatura de 802°C transcurridos los 26.27seg.

Tiempo de enfriamiento desde (800-500) °C

$t_{8/5} = \Delta t$

$\Delta t = t_2 - t_1$

t_1=26.27seg

t_2=30.23seg

$t_{8/5}$ =26.27-30.23

$t_{8/5}$ =3.96seg

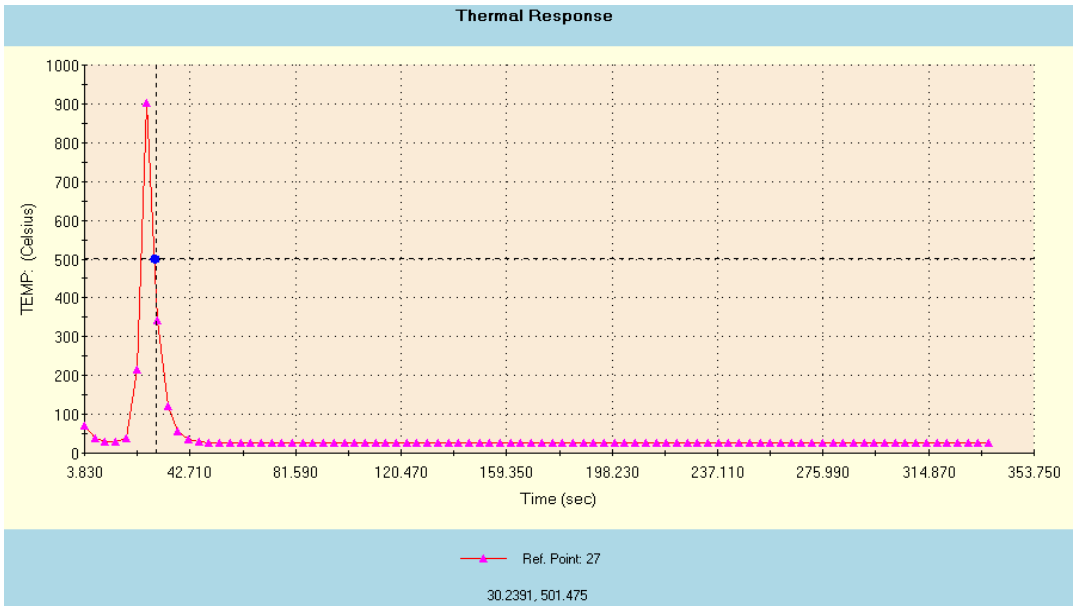


Figura 3.8 El punto muestra una temperatura de 501°C transcurridos los 30,23 seg.

Corrida 2.

En la superficie Heat Imput 2700W y convección del material de 500 W/[m^2K]

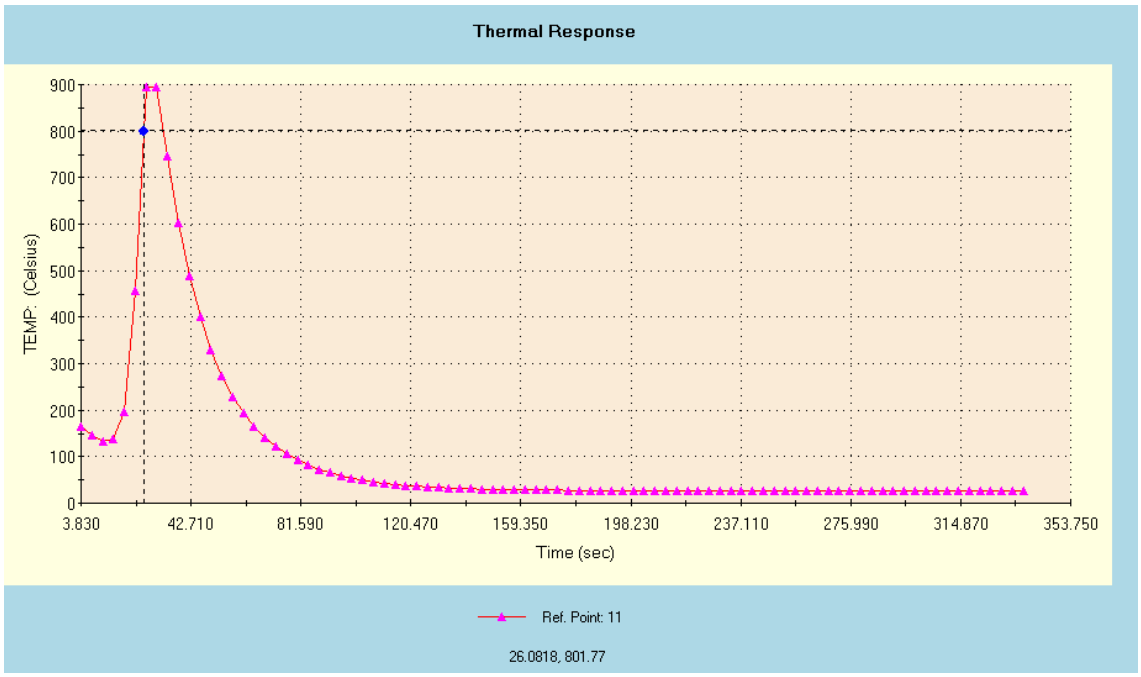


Figura 3.9 El punto muestra una temperatura de 803°C transcurridos los 26.15seg.

Tiempo de enfriamiento desde (800-500) °C

$t_{8/5} = \Delta t$

$\Delta t = t_2 - t_1$

t_1=26.08seg

t_2=42.66seg

$t_{8/5}$ =26.08-42.66

$t_{8/5}$ =16.58seg

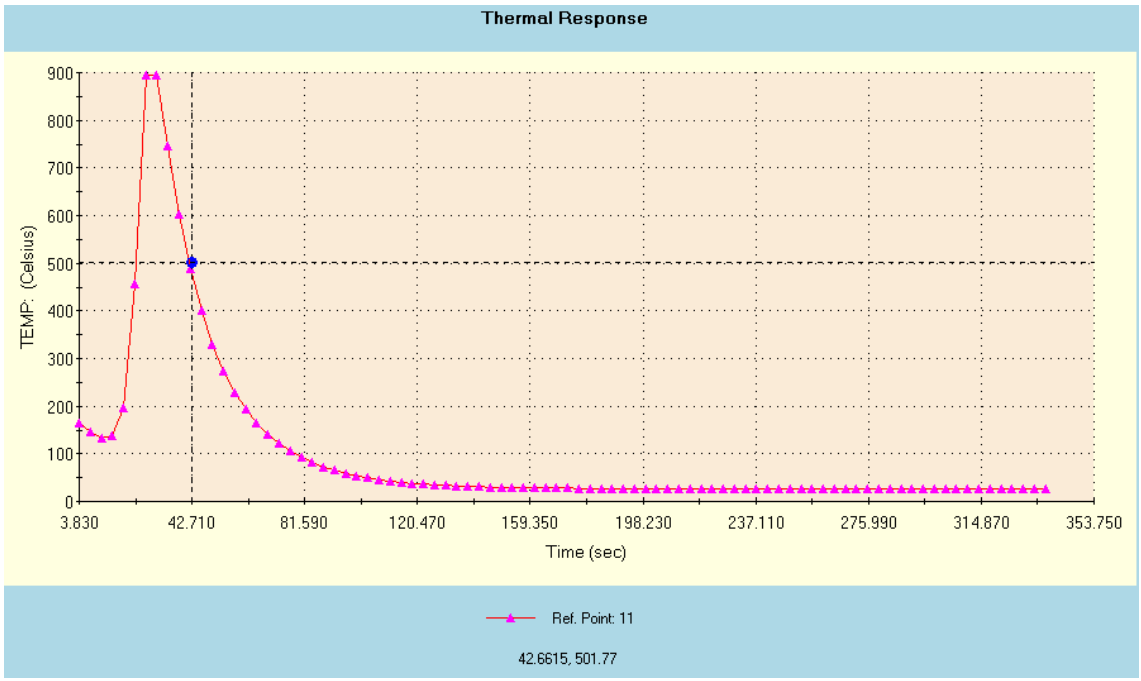


Figura 3.10 El punto muestra una temperatura de 501°C transcurridos los 42,66 seg.

En la Figura 3.11, se muestra la distribución de temperaturas obtenido en el modelo una vez comenzado el estudio, donde se aprecian las zonas.

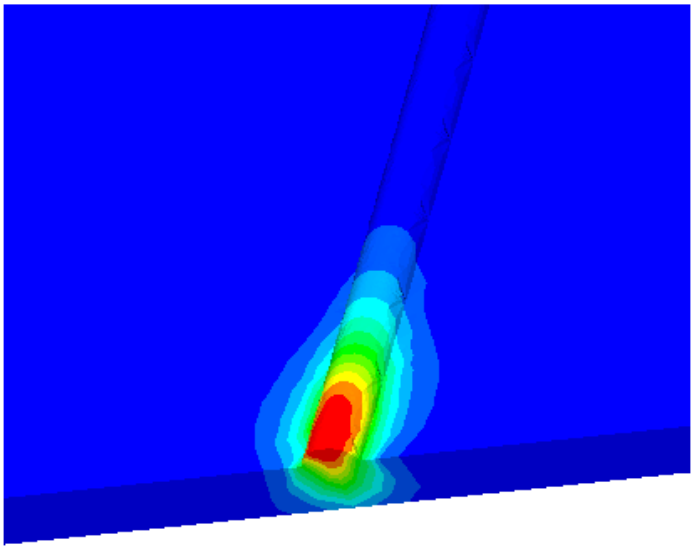


Figura 3.11 Mapa térmico para el modelo una vez comenzado el estudio.

3.3 Discusión de los resultados obtenidos

Lo más importante a considerar en el análisis de los resultados obtenidos de la modelación, para el caso ya explicado anteriormente con los datos considerados, es evaluar el comportamiento de la velocidad de enfriamiento en el rango de temperaturas críticas entre (800–500) ºC, lo cual es posible determinar a través de los ciclos térmicos obtenidos, es decir, el valor de $t_{8/5}$. También es imprescindible obtener el efecto que provoca la combinación del aporte térmico de la fuente con las características del medio circundante sobre el comportamiento de la velocidad de enfriamiento considerando la temperatura inicial del modelo.

CONCLUSIONES

1. Es posible estudiar el fenómeno de transferencia de calor como un proceso transiente en la soldadura bajo agua mojada utilizando el software profesional CDS, en particular para obtener los ciclos y campos térmicos, con un ahorro considerable de recursos.
2. Para el caso de la soldadura bajo agua mojada, considerando los aportes de calor recomendados para el procedimiento (2700 W) según el acero a soldar y el proceso a emplear, los valores de $t_{8/5}$ están muy por debajo del valor crítico para el acero que es de 12 seg. Este resultado indica que es de suma importancia establecer procedimientos o emplear materiales de soldar diseñados especialmente que por efecto térmico reduzcan el riesgo del agrietamiento en frío.
3. El valor del $t_{8/5}$ en el agua y según los resultados de la modelación fue de 3,96seg, para el caso del aire fue de 16.58seg lo que indica la excelente propiedad de soldadura del acero estudiado cuando esta se ejecuta al aire, al agua es de 4,2 veces mayor que al aire y la propiedad de soldadura se ve seriamente afectada. Dada la imposibilidad de dar precalentamiento. Se recomienda trabajar con aceros de muy bajo carbono equivalente.

RECOMENDACIONES

1. Se considera importante estudiar si existe una relación entre calor aportado, medio circundante y el comportamiento de la velocidad de enfriamiento en el rango de temperaturas críticas entre (800–500) ºC, pues puede ser importante el conocimiento del fenómeno para actuar sobre la propiedad de soldadura en la construcción que se pretenda realizar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 Corte v Soldadura Subacuática [I" Edición) pp.1-5, 46-47, 52-56,61,68-69.

2 Ezequiel Caires Pereira Pessoa “Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas” Belo Horizonte Escola de Engenharia da UFMG 2007

3.Welding Workbook. Welding Journal. Mayo 1997

4.Martínez García, R.; Rodríguez Pérez, M. “Aspectos Metalúrgicos de la Soldadura por Fusión” Seminario IIM Morelia 2000.

5.Kasuya and Yurioka. “Carbon Equivalent and Multiplying Factor Hardenability of Steel”. Welding Research Supplement Welding Journal 1991

6.Hart P. H. M.TWI “Hydrogen cracking-its causes, costs and future occurrence”. London 2000.

7.Welding Workbook. Welding Juornal. May 1999

8.Kasuya T. and Y. Hashiba. “Prediction of hardness distribution in steel heat affected zone” Science and Technology of Welding and Joining. Vol.4 No.5 1999

9.KARTHIK V., KASIVISWANATHAN K. V., LAHA K., AND RAJ B. “Determination of Gradients in Mechanical Properties of 2.25Cr-1Mo Weldments Using Shear-Punch Tests A test technique was developed to more accurately determine mechanical properties of individual regions in the HAZ” Welding Journal, December 2002.

10.NAWROCKI, J. G. DUPONT J. N., ROBINO C. V. AND MARDER A. R. “The Stress-Relief Cracking Susceptibility of a New Ferritic Steel — Part 2: Multiple-Pass Heat-Affected Zone Simulations WELDING RESEARCH SUPPLEMENT JANUARY 2001

11.LORENZ K. y DUREN C: “ Carbono equivalent for evaluation of large diameter pipe” steel.Doc.IIS/IIW IX-B-1 1-82

12.Hrivnak “Guide to the Matallurgy of Welding and Weldability of Low Carbon Hot Rollrd Steels”. Pres.I. Doc115/1 843-84

13.JAHRBUCH SCHWEISSTECHNIK. Deutscher Verband für Schweisstechnik. Düsseldorf. Alemania . 1991

14.Beckert, M. “Grudlagen der Schweisstechnik”. VEB. Verlag Technik Berlin 1987.

15. Llave de los Aceros” Software 2000,

16 Ezequiel Caires Pereira Pessoa ¨Estudo da variação da porosidade ao longo do cordão em soldas subaquáticas molhadas¨ Belo Horizonte Escola de Engenharia da UFMG 2007

17 Jesseman, R. J. and Schmid, G. C. Submerged Arc Welding a Low-Carbon, Copper-Strengthened Alloy Steel. Paper presented at 64th Annual AWS Convention during April 24-29, 1983 in Philadelphia, Pennsylvania.

18 Duane Miller, K. Controlling weld Variables from design to deposition. Welding Journal, August 1997.

19 Linnert, G. E. 1994. Welding Metallurgy, vol. 1, 4th ed. Miami, Fla.: American Welding Society.

20 Lancaster, J. F. 1987. The Metallurgy of Welding, 4th ed. London, England: Allen and Unwin, pp. 168–170.

21 Patchett, B. M., et al. 1987. Control of microstructure and mechanical properties in SA and GMA weld metals. Proceedings of an International Symposium on Welding Metallurgy of Structural Steels, Colorado, pp. 189–199.

22.Ushio, M., and Matsuda, F.. “Mathematical modelling of heat transfer of welding arc” (Part 1). Transactions of JWRI, pp. 7–15. 1992

23.BROS, S. B., “Implication of three – dimensional numerical simulations of welding of large structures” .Welding Journal . 71 (2) p. 55-62. 2004

24.JANG G. B., KIM H. K. AND KANG S. S. “Mechanical properties for multipass welds are investigated and weld deformation and residual stress are simulated using finite element analysis” WELDING RESEARCH SUPPLEMENT .Welding Journal 2001

25.García, Y. “Condiciones de embridamiento en estructuras soldadas de alto peso y rigidez. Grietas y reparación”. Tesis doctoral. 2005

26. Martínez García Ramón C..“Obtención del valor de las variables del proceso de soldadura automática por arco sumergido (SAW) en la recuperación de árboles de molinos de caña de acero 30r (guijos) agrietados”.Tesis Doctoral. 2006

27. NGUYEN N. T., Y.-W. MAI, S. SIMPSON, AND A. OHTA “Analytical approximate solutions for double ellipsoidal heat sources in finite thick plate have been derived and calibrated with the experimental data”. Welding Research. Supplement. Welding Journal, MARCH 2004

28. Essers, W. G., and Walter, R.. “Heat transfer and penetration mechanisms with GMA and plasma-GMA welding”. Welding Journal 60(2): 37-s to 42-s. (1991)

29. Cosmos Design Star 4.0 (CDS), “Structural Research and Analysis Corp” 2002

30. Mechanical Desktop 4 2002

31. García, Y. “Condiciones de embridamiento en estructuras soldadas de alto peso y rigidez. Grietas y reparación”. Tesis doctoral. 2005

32. Miettinen, J., and Louhenkilpi, S.. “Calculation of thermo physical properties of carbon and low alloyed steels for modelling of solidification processes. Metallurgical and Materials Transactions 25B: 909–916. (1994)

33. Grange R.A. en “Metal Progress” 1997

34. Bowers R.J. “Weld Heat Affect Zone” Welding Research. Supplement. Welding Journal, NOVEMBER 1996