CAPITULO I

ACEROS DE ALTA RESISTENCIA PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES

1.1 DESIGNACIÓN GENERAL DE LOS ACEROS

Una designación es la identificación específica de cada grado, tipo o clase de acero mediante la utilización de un número, letra, símbolo, nombre o una combinación de éstas [5].

Anteriormente los aceros eran suministrados para que el representante del acero determinara el grado requerido que se desempeñara adecuadamente en los procesos de estampado. En un esfuerzo cooperativo entre la SAE (Society of Automotive Engineers), la AISI (American Iron and Steel Institute) y representantes de la industria automotriz se establecieron especificaciones basadas en propiedades mecánicas que afectaran la manufactura.

La SAE efectuó una reclasificación de las hojas de acero para uso automotriz, este nuevo sistema está basado en la formabilidad y los niveles de resistencia que son utilizados y requeridos en la industria automotriz.

Existen dos especificaciones según la SAE, las cuales se refieren a hojas de acero para uso automotriz:

- **SAE J2329.-** Categorías y propiedades en hojas de acero de bajo carbono.

- **SAE J2340.-** Categorías y propiedades en hojas de acero para resistencia a la abolladura, alta resistencia y ultra alta resistencia.

En el Anexo I se encuentran las Tablas A y B que presentan la designación previa y actual para los aceros SAE J2329 y J2340, respectivamente, en ellas se despliegan la descripción, los grados y las propiedades mecánicas que debe cumplir cada uno de los aceros.

La antigua clasificación de la AISI se basaba en la práctica de desoxidación y el nivel de resistencia a la cedencia, mientras que las nuevas clasificaciones se basan en la formabilidad del material. En la Tabla A se muestra que para los aceros formables de alta resistencia se listan los valores del exponente de endurecimiento por deformación "n", mientras que en la Tabla B para los aceros de ultra alta resistencia se listan los valores mínimos de tensión [6].

1.2 ACEROS LAMINADOS EN CALIENTE Y EN FRÍO

Los aceros inicialmente se clasifican como laminados en caliente o en frío. Los aceros laminados en caliente procesados en un molino caliente son los productos en hoja más económicos y por lo general se usan en espesores mayores a 1.83 mm (0.72 in), mientras que los aceros laminados en frío se laminan en caliente aproximadamente a 4 mm y posteriormente se laminan en frío a 2 mm (0.08 in) o menos de espesor.

Los aceros al carbono laminados en caliente anteriormente se producían en cuatro categorías principales: calidad comercial (CQ-commercial quality), calidad de estirado (DQ-drawing quality), calidad de estirado calmado especial (DQSK-deep quality special killed) y calidad estructural (SQ-structural quality), ver Anexo I.

Para los aceros al carbono laminados en frío las categorías de producción eran: calidad comercial (CQ-commercial quality), calidad de estirado (DQ-drawing quality), calidad de estirado profundo (DDQ-deep drawing quality) y calidad de estirado extraprofundo (EDDQ-extra deep drawing quality), ver Anexo I [6].

1.3 ACEROS DE ALTA RESISTENCIA

1.3.1 Clasificación

Dentro de esta clasificación se encuentran aceros diseñados y utilizados para aplicaciones donde se requieren resistencias a la cedencia y tensión mayores que las que proporcionan los aceros formables de bajo carbono. A continuación se listan los aceros pertenecientes a esta clasificación:

- Resistencia a la abolladura (DR-dent resistant).
  - Endurecido por horneado (BH-bake hardenable).
  - Endurecido sin horneado.
- Alta resistencia endurecido por solución.
- Alta resistencia baja aleación (HSLA-high strength low alloy).
- Alta resistencia recuperación por recocido.
- Alta resistencia avanzados.
  - Doble fase (DP-dual phase).
  - Fase compleja (CP-complex phase).
  - Plasticidad inducida por transformación (TRIP-transformation induced plasticity).
  - Martensíticos.

La resistencia en este tipo de aceros se logra mediante la composición química y procesamiento especial, ya sea técnicas de laminado, porcentaje de reducción en frío, control de temperatura en el laminado en caliente y el tiempo y temperatura durante el recocido [6]. La Tabla 1.1 muestra la descripción de los aceros de alta resistencia, así como propiedades mecánicas y el tipo de acero.

En el presente trabajo sólo se hará énfasis en los aceros de alta resistencia, alta resistencia baja aleación y los avanzados.

Tabla 1.1 Aceros de alta resistencia SAE J2340 [6]		
Acero	**Grado/Tipo**	**Grado de resistencia MPa**
Resistencia a la abolladura endurecido sin horneado.	A	180, 210, 250, 280
Resistencia a la abolladura endurecido por horneado.	B	180, 210, 250, 280
Alta resistencia endurecido por precipitación.	S	300,340
Alta resistencia baja aleación.	X, Y	300, 340, 380, 420, 490, 550
Alta resistencia recuperación por recocido.	R	490, 550, 700, 830
Alta resistencia avanzados.	Fig. 1	Fig. 1

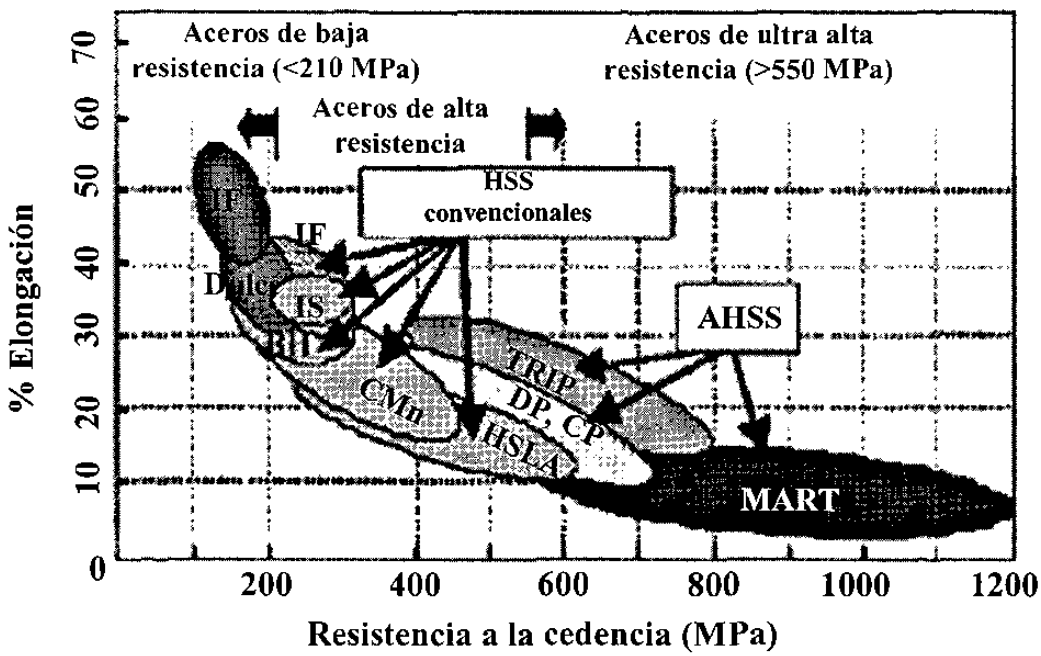

Figura 1.1 Comparación de resistencia a la cedencia y % de elongación para los aceros de alta resistencia [7].

Los aceros de alta resistencia que pertenecen a las categorías de endurecido por solución, baja aleación y recuperación por recocido se encuentran en el intervalo de 300 a 830 MPa en valores mínimos de resistencia a la cedencia, y son éstos los valores que determinan la clasificación de los mismos.

Tipo S

Para los aceros endurecidos por solución, se utiliza C y Mn con P (0.1 % máx.), S (0.02% máx.) o Si para cumplir con los requerimientos de formabilidad y soldabilidad.

Tipo X

Los aceros HSLA son aleados con elementos formadores de carburos y nitruros, entre ellos se encuentran el Nb, Ti y V, (0.005% mín. cada uno), los cuales se utilizan con C (0.13% máx.), Mn, P (0.06% máx.) y Si para lograr la mínima resistencia a la cedencia especificada y S (0.015% máx.). La diferencia entre la resistencia a la tensión y la mínima resistencia a la cedencia especificada debe ser de 70 MPa.

Tipo Y

Igual que el tipo X, nada más que la diferencia entre la resistencia a la tensión y la mínima resistencia a la cedencia especificada cambia a 100 MPa.

Tipo R

El endurecimiento en los aceros de alta resistencia recuperados por recocido o alivio de esfuerzos se logra mediante el trabajo en frío. Los elementos mencionados en los aceros tipos "S" y "X" también se pueden añadir. Los porcentajes de los elementos en este caso son C (0.13% máx.), P (0.1% máx.) y S (0.015% máx.) [6].

1.3.2 Aceros de alta resistencia y baja aleación

Ha surgido un interés substancial en el desarrollo y uso de aceros de alta resistencia con el propósito de disminuir el peso de los vehículos. Durante los últimos 30 años los aceros HSLA han sido ampliamente utilizados en el sector automotriz [8].

Los aceros al carbono de alta resistencia y los de baja aleación poseen resistencias a la cedencia mayores a los 275 MPa (40ksi). Los aceros HSLA se conocen también como aceros microaleados, los cuales son diseñados para proveer mejores propiedades mecánicas (con el uso de pequeñas cantidades de elementos aleantes) y en ocasiones mejor resistencia a la corrosión atmosférica que los aceros al carbono convencionales [9].

1.3.3 Aceros avanzados

Estos aceros inician su aparición debido a los requerimientos de la industria automotriz en la seguridad del pasajero, desempeño del vehículo y el consumo de combustible. El enfoque reciente hacia la disminución de peso en la industria del transporte ha encaminado a una fuerte competencia entre las industrias del acero y las de los metales de baja densidad. La respuesta de la industria del acero en cuanto al incremento del uso de materiales de baja densidad como el aluminio y el magnesio fue la de desarrollar materiales de mucha más alta resistencia manteniendo o mejorando la formabilidad y de esta forma mejorar las características de resistencia y la disminución de peso a través de la reducción del espesor de las hojas de acero. Dentro de este tipo de aceros se encuentran los aceros doble fase, los complejos, los TRIP y los martensíticos [6].

1.3.3.1 Aceros doble fase

Los aceros doble fase se caracterizan por tener un valor de resistencia a la tensión de aproximadamente 550 MPa (80 ksi) y una microestructura que consiste de partículas duras de martensita dispersas en una matriz suave y dúctil de ferrita. El término doble fase se refiere a la predominancia de una microestructura de dos fases, la ferrita y la martensita. Sin embargo, se pueden presentar también pequeñas cantidades de otras fases como la bainita, perlita o austenita retenida [6]. La presencia de la martensita imparte alta resistencia y la matriz de ferrita provee una buena elongación; lo que conlleva a producir una combinación de resistencia y ductilidad. Las propiedades mecánicas significativas de estos aceros son la baja resistencia a la cedencia seguida de un comportamiento de cedencia continua y un alto valor inicial de razón de

endurecimiento por deformación [10]; esta razón de endurecimiento por deformación (valor n) distribuye mejor la deformación plástica y mejora la elongación uniforme así como también permite una resistencia a la tensión mucho más alta que la de los aceros de alta resistencia con cedencias iniciales similares [6].

1.3.3.2 Aceros complejos

Los aceros complejos se distinguen por tener muy altas resistencias últimas a la tensión. Estos aceros consisten de una microestructura muy fina de ferrita y una alta fracción volumétrica de fases duras, que además son endurecidas por finos precipitados. También se caracterizan por tener alta formabilidad, alta absorción de energía y alta capacidad de deformación residual [7].

1.3.3.3 Aceros TRIP

La microestructura de los aceros TRIP consiste en una matriz continua de ferrita que contiene una dispersión de fases duras secundarias de martensita y bainita. Estos aceros también contienen austenita retenida en fracciones volumétricas mayores al 5%.

Durante la deformación, la dispersión de las fases duras secundarias en la matriz suave de ferrita crea una razón alta de endurecimiento por deformación como la que se observa en los aceros doble fase. Sin embargo, la austenita retenida se transforma progresivamente en martensita al incrementar la deformación y de esta manera aumenta la razón de endurecimiento por deformación a altos valores de deformación [7].

La Figura 2 muestra una comparación de las curvas esfuerzo-deformación para un acero HSLA, un acero doble fase y un TRIP, los cuales presentan puntos de cedencia similares.

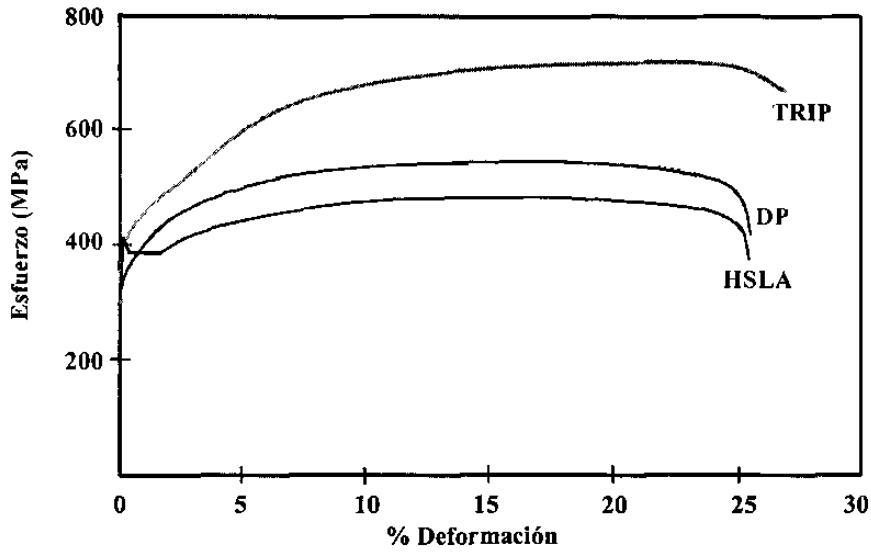

Figura 1.2 Curvas esfuerzo-deformación de aceros de alta resistencia con cedencias similares [3].

1.3.3.4 Aceros martensíticos

En los aceros martensíticos, la austenita presente durante la laminación en caliente o el recocido es transformada casi por completo a martensita durante el templado o en la línea de enfriamiento del recocido. Como medio para incrementar el endurecimiento y para reforzar la martensita se agrega C. Estos aceros proveen de altísimas resistencias últimas a la tensión por encima de los 1500 MPa y, muy seguido, son sujetos a un revenido después del templado para mejorar la ductilidad y poder tener buena formabilidad [7].

1.4 ELEMENTOS DE ALEACION

Los elementos de aleación proporcionan una mejora significativa en propiedades mecánicas de los aceros a través del refinamiento de grano, endurecimiento por solución sólida y por precipitación [8].

En los aceros al carbono, la principal función de los elementos microaleantes es el refinamiento del grano ferrítico y la contribución al endurecimiento por precipitación

[11], los cuales dependen de los efectos complejos del diseño de la aleación y del tratamiento termomecánico [9]. Los aleantes que son agregados a la composición química producen diferentes efectos al procesar el acero, los siguientes elementos son los más utilizados en tales procesos:

Carbono (C)

Incrementa la cantidad de perlita en la microestructura y es uno de los elementos de endurecimiento más potentes y económicos. Sin embargo, altos contenidos de C reducen la soldabilidad y la tenacidad del acero.

Manganeso (Mn)

En cantidades mayores al 1% es el principal elemento endurecedor en aceros al carbono de alta resistencia. Actúa principalmente como endurecedor por solución sólida en la ferrita, pero suministra una disminución en la temperatura de transformación austenita-ferrita. En aceros que contienen V y/o Nb el Mn mejora el endurecimiento por precipitación.

Cromo (Cr)

En combinación con el Cu se obtiene un mejoramiento en la resistencia a la corrosión [9].

Niobio (Nb)

Es un formador de nitruros y carburos, siendo estos últimos los más importantes. Es muy efectivo en la prevención de la recristalización de la austenita y en producir la forma de grano alargado (pancake), el cual da lugar a los granos de ferrita fina [12].

En cantidades pequeñas (0.03-0.05%) este elemento incrementa la resistencia de cedencia, debido a la combinación del endurecimiento por precipitación y el refinamiento de grano. El Nb refina el grano más efectivamente que el V, ya que el carburo de niobio (NbC) es más estable en la austenita a las temperaturas del

laminado. La baja solubilidad del NbC en la austenita proporciona partículas precipitadas mas estables las cuales se unen a sus fronteras de grano y retardan su crecimiento [9].

Titanio (Ti)

Provee el endurecido por precipitación y el control de forma de sulfuros; pequeñas cantidades <0.025% son también útiles en limitar el crecimiento de grano austenítico [9]. Forma nitruros a temperaturas muy altas, cercanas a la fusión, y estas partículas son efectivas en el control del crecimiento de grano austenítico durante la laminación a temperaturas por encima de la temperatura de recristalización de la austenita. Forma carburos a temperaturas más bajas y esto puede ser usado para proporcionar endurecimiento por precipitación [12].

Vanadio (V)

Proporciona endurecimiento del acero mediante la precipitación y el refinamiento de grano de ferrita. La precipitación del carbonitruro de vanadio en la ferrita puede desarrollar un incremento significante de resistencia que depende del proceso de laminado y la composición base. Contenidos de C por encima de 0.13 a 0.15% y 1% de Mn mejora el endurecido por precipitación, en particular cuando el contenido de N es por lo menos 0.01%.

Molibdeno (Mo)

Mejora el endurecimiento cuando se requieren otros productos distintos a la ferrita o perlita. En cantidades de 0.15 a 0.3 % se incrementa la solubilidad del Nb en la austenita, además de mejorar la precipitación de NbC(N) en la ferrita. También el Mo ha mostrado unirse a los precipitados de Nb(C,N), los cuales van incrementando la resistencia de cedencia.

Silicio (Si)

Se utiliza como desoxidante en el acero líquido. Tiene un efecto en el aumento de la resistencia a la cedencia mediante el endurecimiento por solución sólida.

Aluminio (Al)

Se utiliza como desoxidante y fue el primer elemento usado para controlar el crecimiento de grano austenítico durante el recalentamiento.

Cobre (Cu)

Se utiliza aproximadamente 0.2% para suministrar resistencia a la corrosión atmosférica, la cual aumenta cuando el P está presente en cantidades mayores al 0.05%. En cantidades mayores a 0.5% incrementa la resistencia mediante el reforzamiento de la ferrita pero la ductilidad disminuye un poco. Cuando se agrega el 1% la resistencia de cedencia aumenta de 70 a 140 MPa (10-20 ksi), en cantidades por encima de 0.75% no tiene efectos considerables en la tenacidad o soldabilidad.

Níquel (Ni)

Incrementa moderadamente la resistencia por endurecimiento por solución de la ferrita, mejora la resistencia a la corrosión atmosférica y en el agua de mar se incrementa en presencia del Cu o P.

Fósforo (P)

Es un efectivo endurecedor por solución sólida de la ferrita, además que mejora la resistencia a la corrosión pero ocasiona una disminución en la ductilidad. La presencia de P a niveles <0.05% puede causar que las fronteras de grano previas de la austenita se fragilicen por segregación. La adición de este elemento incrementa la resistencia a la corrosión atmosférica.

Boro (B)

No causa efecto en la resistencia de un acero normal laminado en caliente, pero puede mejorar el endurecimiento cuando se desean productos de transformación como la ferrita acicular en los aceros de bajo carbono.

Nitrógeno (N)

Para obtener las propiedades típicas de los aceros HSLA este elemento se utiliza en cantidades de hasta un 0.02%. Mejora el endurecimiento por precipitación cuando se adiciona a aceros que contienen V [9].

1.5 PROCESAMIENTO TERMOMECÁNICO

La laminación controlada o procesamiento termomecánico es una técnica diseñada para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales mediante el control de los procesos de deformación en caliente.

El objetivo principal de este proceso es el de lograr una estructura de grano fino de ferrita y de esta manera obtener buena tenacidad y alta soldabilidad así como también alta resistencia [13], además de aprovechar el efecto de la deformación plástica en la microestructura de la austenita de tal forma que se desarrolle la microestructura mas favorable durante la deformación, es decir refinar y deformar los granos de austenita durante el proceso de laminación y de esta forma se produzcan granos finos de ferrita durante el enfriamiento como se ilustra en la figura 1.3 [11] [9].

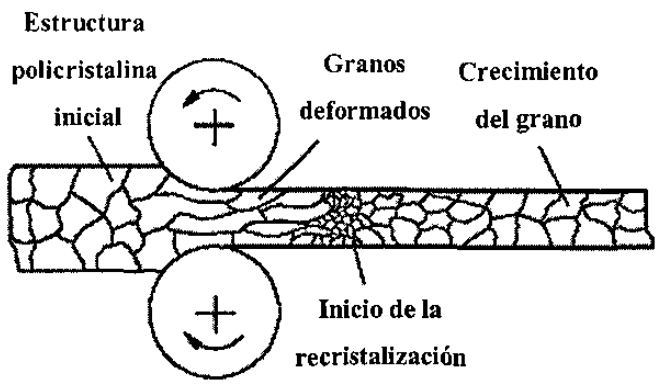

Figura 1.3 Influencia de la laminación en caliente sobre la estructura del acero [14].

El papel del control de laminación es el de introducir una alta densidad de sitios de nucleación para granos ferríticos en la matriz austenítica durante la transformación mediante el control de las condiciones de proceso y de esta manera refinar la estructura del acero después de la transformación [13]; la temperatura se controla en varias de las

etapas de laminación y la cantidad de reducción en cada uno de los pases y la temperatura final son definidas con precisión [9]. Durante este procedimiento la deformación toma lugar por encima o por debajo de la temperatura de recristalización de la austenita [11].

1.5.1 Refinamiento de grano ferrítico

Debido a la relación existente entre el tamaño de grano de la austenita (γ) y la ferrita (α), el refinamiento de este último se logra principalmente a través de la estructura de grano γ, Figura 1.4 [13]. Este método se encuentra influenciado por los efectos complejos del diseño de las aleaciones y el procesamiento. Como ejemplo para explicar este método si se consideran tres etapas de un proceso de laminación en caliente el refinamiento de grano usado en cada una de ellas incluye:

- Recalentado.-La adición de Ti o Al para retardar el crecimiento de grano austenítico cuando el acero se recalienta para deformación en caliente o tratamiento térmico subsecuente.

- Laminado.- El control de laminado que condiciona que la austenita se transforme en ferrita de grano fino.

- Enfriamiento.- Adición de aleantes y razones de enfriamiento mas rápidas para disminuir la temperatura de transformación de austenita a ferrita [13].

1.5.2 Endurecimiento por precipitación

Este fenómeno sucede por la formación de carbonitruros finamente dispersos que se forman durante el calentamiento y enfriamiento. Debido a que el endurecimiento por precipitación se asocia por lo general a la disminución en tenacidad, se utiliza junto con el refinamiento de grano para mejorar esta propiedad mecánica.

El tipo de carbonitruro, tamaño de grano y el número de carbonitruros precipitados son factores que influyen en el endurecimiento por precipitación. La formación de carburos metálicos (MC) es lo más efectivo en el endurecido de aceros microaleados con Nb, Ti y V. El número de estos carburos formados durante el calentamiento o enfriamiento dependerá de su solubilidad en la austenita aunado a la razón de enfriamiento [9].

1.5.3 Etapas del procesamiento termomecánico

El proceso del laminado controlado es usualmente dividido en tres etapas:

1. Deformación en el rango de temperatura de recristalización.

2. Deformación en el rango de temperatura de no-recristalización.

3. Deformación en la región ferrita-austenita.

La figura 1.4 muestra las etapas del proceso termomecánico y el cambio en la microestructura que acompaña a la deformación en cada una de ellas [13].

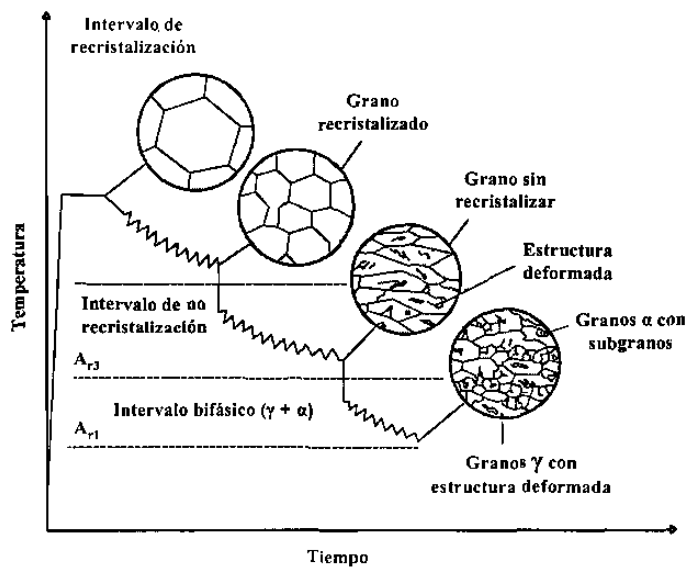

Figura 1.4 Etapas del procesamiento termomecánico [13].

1.5.3.1 Deformación en el rango de temperatura de recristalización

El grano austenítico es refinado mediante la recristalización estática repetida. Un tamaño de grano pequeño de austenita obtenido por recristalización durante esta etapa conlleva al refinamiento de los granos de ferrita. En general, el tamaño de grano de la austenita recristalizada disminuye rápidamente con el incremento de la cantidad de reducción en la laminación y alcanza un valor límite, el cual limita el grado en que el refinamiento de ferrita es alcanzado por la recristalización de la austenita.

1.5.3.2 Deformación en el rango de temperatura de no recristalización

Los granos de austenita son alargados y se introducen estructuras deformadas dentro de los granos. La deformación en esta etapa incrementa substancialmente la razón de nucleación en las fronteras de grano de la austenita y dentro de la misma. Esta nucleación intragranular de ferrita es uno de los aspectos más importantes del control del laminado. Los elementos microaleantes como el Nb y Ti pueden incrementar la temperatura de recristalización de la austenita.

1.5.3.3 Deformación en la región ferrita-austenita ($\alpha + \gamma$)

Durante esta etapa la austenita es además endurecida por deformación y la ferrita deformada produce subestructuras [13].

1.6 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

En el transcurso de los últimos años el diseño para el ahorro en peso ha ganado una gran importancia en la industria automotriz. La tendencia hacia una mayor comodidad y un alto factor de seguridad al mismo tiempo que el ahorro en combustible y la exhaustiva reducción de la emisión de contaminantes ha encaminado a la obligación de realizar automóviles más ligeros [16].

Se ha realizado un esfuerzo considerable para expandir la tecnología del acero y sus procesos de manufactura para construir vehículos con menor masa e incrementar la seguridad con el uso de acero [17].

Para lograr lo anterior diversos programas han sido creados, tal es el caso del ULSAB (UltraLight Steel Auto Body) y el ULSAB-AVC (Advanced Vehicle Concepts), los cuales se encargan de ofrecer soluciones acerca del acero enfocado a los retos que tienen que enfrentar los fabricantes de automóviles alrededor del mundo para incrementar la eficiencia de combustible al mismo tiempo que se mejora la seguridad, el desempeño y el mantenimiento de tales vehículos [17].

Los factores que se toman en cuenta durante el diseño, la fabricación y el uso futuro de la estructura que permite construir un automóvil, son los que marcan la pauta en la decisión sobre el tipo de acero que se va a utilizar y, debido a las tendencias del uso del acero en la industria automotriz, no cabe duda que los aceros de alta resistencia y los avanzados han ganado su lugar dentro de la misma, por sus propiedades mecánicas, las cuales se ven reflejadas en el desempeño de los automóviles.

Una de estas propiedades es la absorción de energía, por ejemplo, en algún accidente automovilístico, los aceros de alta resistencia absorberán un impacto y se deformarán más que un acero convencional, lo que dará como resultado que la energía sobrante del impacto sea menor y por consecuencia los daños que pudieran sufrir el o los pasajeros de un vehículo serían menores y menos fatales.

1.6.1 Estructuras y partes automotrices

Las Figuras 1.5 y 1.6 muestran algunos ejemplos de la amplia gama de aplicaciones de las estructuras y partes automotrices así como también los tipos de aceros empleados en las mismas.

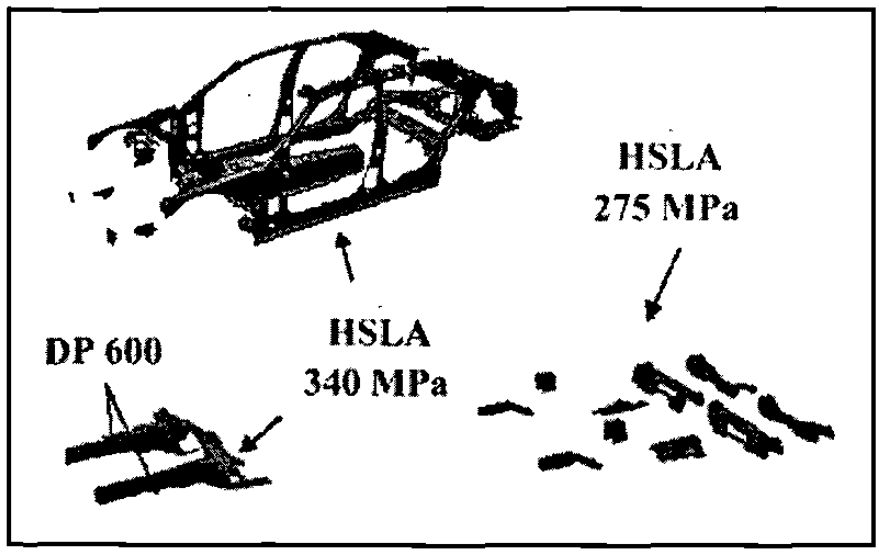

Figura 1.5. Utilización de aceros de alta resistencia y avanzados para un modelo sedán LX 2004 [1].

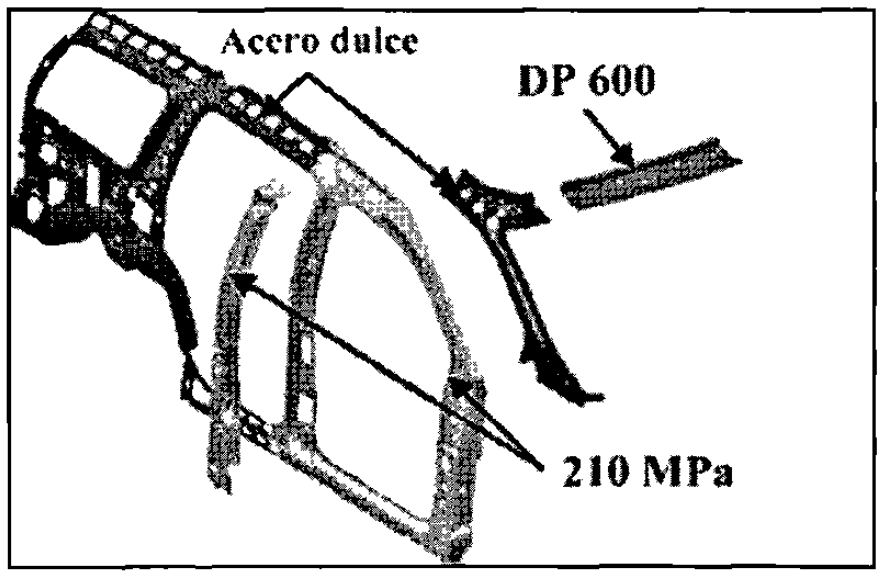

Figura 1.6. Carrocería lateral interior y refuerzos de una camioneta Dodge Durango [1].

CAPITULO II

GALVANIZADO POR INMERSION EN CALIENTE

2.1 INTRODUCCIÓN

La generación de recubrimientos de Zn y aleaciones de Zn sobre el acero es uno de los procesos más utilizados para proteger componentes de acero expuestos a ambientes corrosivos [18].

La capacidad de las líneas de galvanizado ha evolucionado significativamente desde 1980. Esto ha sido en respuesta a la demanda de los clientes de la industria automotriz en producir vehículos mas ligeros utilizando aceros de menor espesor y con mejores propiedades mecánicas de alta resistencia combinada con la formabilidad y uniformidad del recubrimiento [19], además de la preservación de la integridad de la estructura y el mantenimiento de la apariencia de los automóviles en ambientes corrosivos, factores que han encaminado al uso de aceros recubiertos de Zn para aplicaciones automotrices [20].

Los métodos típicos de procesamiento usados para producir recubrimientos de Zn incluyen el galvanizado por inmersión en caliente (continuo o por lote), rociado térmico y por electrodepositado [18].

En este capítulo se realizará un enfoque al proceso de galvanizado continuo por inmersión en caliente, ya que fue el método utilizado para producir el acero que se encuentra bajo análisis.

2.2 GALVANIZADO CONTINUO POR INMERSIÓN EN CALIENTE

El proceso de galvanizado continuo por inmersión en caliente se desarrolló hace más de 50 años, pero se ha ido sofisticando a través del tiempo. Originalmente las aplicaciones de los productos obtenidos mediante este proceso no demandaban una alta calidad superficial ni un alto grado de formabilidad, contrario a lo que sucede actualmente [21].

El proceso continuo consiste en hacer pasar la lámina de acero a través de un baño de metal fundido, en donde el acero reacciona (alea) con el metal líquido para unir el recubrimiento a la superficie de la lámina, conforme ésta sale del baño, se remueve el exceso de metal mediante un proceso de secado por gas o cuchillas de aire [21]. Este método ofrece más ventajas que el proceso por lote, para productos tales como hojas de lámina, cables y tubos de acero [18].

Existen dos tipos de proceso continuo:

1. **Proceso de línea en frío o tipo Cook-Norteman**
   Es similar al proceso por lote, donde la mayoría de los materiales deben ser recocidos por completo antes de la inmersión, ya que el proceso no cuenta con el paso de calentamiento y recocido después de ser recubiertos.

2. **Proceso tipo Sendzimir**
   La mayor parte de los productos de hoja laminada son obtenidos mediante este proceso [18]. La Figura 2.1 muestra un esquema del proceso continuo de galvanizado.

La mayoría de las líneas de galvanizado consisten de una serie de pasos, las cuales pueden incluir las siguientes operaciones:

- Unión de las hojas de lámina del rollo de acero mediante soldadura por resistencia eléctrica.

- Sección de limpieza.
- Zona de calentamiento.
- Recubrimiento de la lámina.
- Tratamiento post-inmersión.
- Sección de enfriamiento.
- Molino de templado.
- Nivelador de tensión.
- Tratamiento del recubrimiento para prevenir la formación de manchas de humedad debido al almacenado.
- Sección de aceitado para aplicar aceite inhibidor de oxidación.
- Rodillo para enrollar la lámina ya procesada [21].

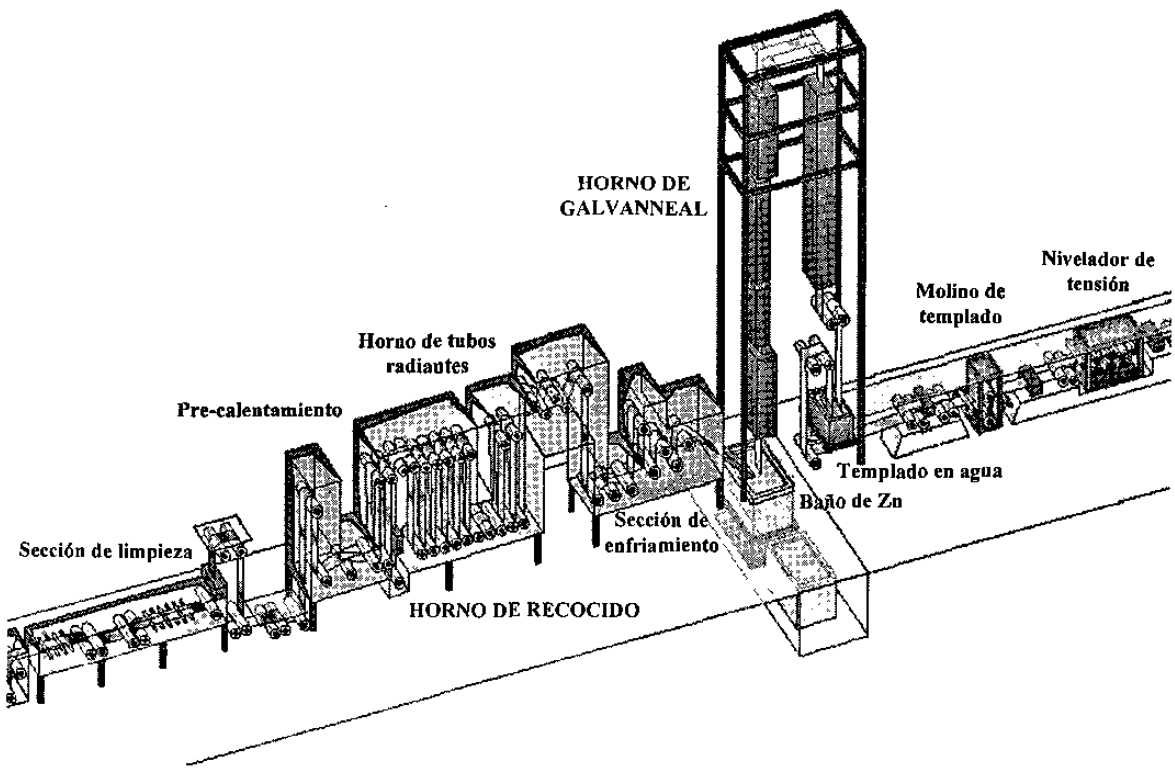

Figura 2.1 Esquema representativo de una línea de galvanizado continuo por inmersión en caliente [22].

2.2.1 Proceso continuo

El acero entrante por lo general proviene directamente de un molino de reducción en frío, que permite disminuir el espesor de la hoja laminada en caliente al espesor deseado. El proceso de laminado en frío hace al acero muy duro por lo que su formabilidad es limitada. La lámina es desenrollada y soldada a la parte final del rollo antecesor en la línea de proceso, esta operación hace posible que el proceso sea continuo, posteriormente el acero es dirigido hacia la sección de limpieza.

2.2.2 Sección de pre-limpieza

La lámina de acero experimenta un tratamiento pre-limpieza en el cual se remueven aceites de la laminación e impurezas superficiales (suciedad, carbono superficial y hierro precipitado) lo que permite mejorar la adherencia del recubrimiento y la prevención de que algunos contaminantes entren al baño de metal fundido.

Las líneas modernas de galvanizado utilizan un sistema de cepillado alcalino y una etapa de limpieza electrolítica aunado a un tratamiento reductor de fuego directo. En la sección de rociado y cepillado alcalino se usa hidróxido de sodio (1.5-2.5%) para remover los contaminantes sueltos en la superficie mediante un lavado y cepillado de la misma. Después una pre-limpieza electrolítica remueve los contaminantes adheridos fuertemente a la superficie. Mediante la hidrólisis del agua se liberan moléculas de hidrógeno y oxígeno sobre la superficie de la lámina creando un efecto burbujeante, el cual arrastra y remueve los contaminantes remanentes de la superficie. Luego se sopla aire a baja presión sobre la lámina para remover la humedad y prevenir la oxidación. La siguiente etapa es la sección de limpieza.

2.2.3 Sección de limpieza

La lámina entra en la sección de limpieza del proceso Sendzimir, Figura 2.1, con una temperatura de 500 a 760 °C hacia a una atmósfera reductora de N_2/H_2, que reducirá los

contaminantes orgánicos residuales y óxidos superficiales. La nueva superficie del acero se oxida espontáneamente a óxido e hidróxido de hierro y, con el calentamiento, se reduce por completo. Sin embargo, ocurrirá una oxidación selectiva de elementos del substrato (Mn, Si, Al, V y Ti) formadores de óxidos, la cual no es uniforme en la superficie sino se presenta en forma de islas. Esta distribución no uniforme es esperada, ya que, la cantidad disponible para la difusión de los elementos es limitada, por lo que las rutas preferenciales para la difusión, tales como las fronteras de los granos y sub-granos, claramente deben ser sitios favorecedores para la oxidación de los elementos reactivos [18].

2.2.4 Zona de calentamiento

La lámina entra a las zonas de calentamiento y sostenimiento del horno después del tratamiento de limpieza, Figura 2.1, donde es recocida por encima de la temperatura de recristalización a más de 700°C, la cual dependerá del tipo de acero a ser recubierto. La etapa de recocido permite suavizar el acero e impartirle la resistencia y formabilidad deseadas, además de que la lámina es calentada lo suficiente para ser sumergida en el baño sin afectar la temperatura del mismo [18, 23].

La cámara del horno es mantenida libre de oxígeno como sea posible para ayudar al hidrógeno en la reducción de la capa de óxido. Se utiliza nitrógeno para mantener una presión de gas interna adecuada dentro del horno. Conforme la lámina es calentada a altas temperaturas en el horno para recocer el acero y obtener las propiedades mecánicas deseadas, el hidrógeno gaseoso reacciona con cualquier óxido de hierro remanente para producir una superficie limpia; que pueda ser mojada por el recubrimiento metálico de Zn líquido. De esta manera, el Zn y el acero están preparados para desarrollar un lazo de aleación completo en un tiempo muy corto.

La reacción química que ocurre en el horno es: $FeO + H_2 \rightarrow Fe + H_2O$

En este proceso, la lámina se mantiene encerrada dentro de la atmósfera de hidrógeno entre el horno y el baño de recubrimiento para prevenir la re-oxidación de la superficie del acero [23].

A la salida del horno, la lámina pasa por una sección de soplado de gas, que enfría la lámina a una razón de 50 °C/seg hasta una temperatura de 460 °C antes de ser sumergida en el baño de Zn fundido [18].

2.2.5 Recubrimiento de la lámina

El baño de Zn fundido para galvanizado, Figura 2.2, con contenidos menores al 0.3% de Al es mantenido a una temperatura que se encuentra entre los 445 a 455 °C y las velocidades de entrada son de hasta 200 m/min.

La temperatura del baño dependerá de la composición del recubrimiento, el punto de fusión de la aleación en el baño y de la temperatura de la lámina previa a la inmersión. La temperatura del baño y el tiempo de inmersión (resultado de la velocidad de la línea), son parámetros de operación específicos que pueden ser optimizados para controlar con eficiencia la limpieza superficial, el calentamiento de la lámina y minimizar el crecimiento de la capa de aleación durante la inmersión. Los tiempos comunes de inmersión son de 4 a 8 segundos para velocidades de línea superiores a los 175 m/min [18].

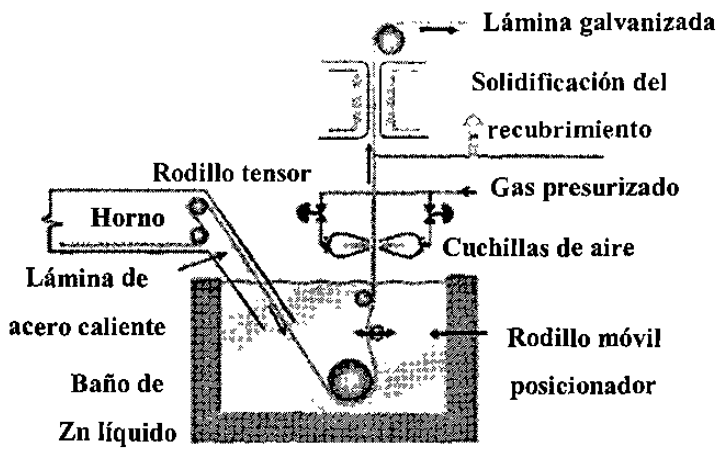

Figura 2.2 Baño de galvanizado [24].

2.2.6 Control del recubrimiento

Cuando la lámina sale del baño de Zn líquido, el exceso de éste es removido y regresado al recipiente mediante el uso de unas cuchillas de secado por gas que soplan ya sea aire o nitrógeno sobre la superficie del acero. Este paso permite el control y el mantenimiento uniforme del espesor del recubrimiento, el cual puede ser monitoreado con equipo de medición de rayos X [18].

2.2.7 Tratamiento térmico post-inmersión

En las líneas de galvanizado se puede efectuar un tratamiento térmico o termogalvanizado a la lámina justo después de haber sido recubierta. Este proceso es un recocido que se realiza en un horno de inducción, el cual permite crear un recubrimiento diferente al galvanizado común, el cual es llamado galvanneal.

2.2.8 Zona de enfriamiento

El enfriamiento de la lámina recubierta es efectuado en una torre localizada por encima del baño de Zn, la lámina ingresa a esta sección después de salir del baño y de habérsele removido el exceso de Zn. Cuando se trata de un proceso de termogalvanizado, el enfriamiento se efectúa en la parte superior del proceso de recocido en la misma torre. Se enfría la lámina lo suficiente para que el recubrimiento solidifique y no presente problemas de transferencia de recubrimiento con los rodillos de laminado y enrollado de las secciones subsecuentes. Después de la torre se encuentra una sección de enfriamiento con agua, la cual continúa reduciendo la temperatura de la lámina.

2.2.9 Procesos posteriores

Cuando la lámina sale de la sección de enfriamiento experimenta un proceso de acabado superficial mediante un molino superficial y luego un tensonivelado, el cual consiste en

aplicar tensión en la lámina para eliminar cualquier ondulación superficial. Los tratamientos siguientes pueden ser de pintado y pasivado.

2.3 RECUBRIMIENTO

La anatomía del acero recubierto de Zn consiste de tres partes:

1. Una capa superficial o recubrimiento aleado.
2. Una capa interfacial entre la capa superficial y el substrato de acero que contiene una serie de compuestos intermetálicos.
3. El substrato de acero.

Cada una de estas regiones puede verse afectada por la temperatura del baño de Zn y el tiempo de estancia en el mismo, así como también la química del baño y del acero. El tiempo de inmersión puede variarse para controlar el espesor del recubrimiento. El buen control de enfriamiento es también necesario ya que el Zn puede continuar reaccionando con el substrato para producir aleaciones adicionales y afectar las propiedades del recubrimiento [18].

2.3.1 Equilibrio y cinética de fases

Cuando se sumerge la lámina dentro del baño de Zn líquido, se generan reacciones que dependen de la composición química del baño y los solutos que se encuentran en el acero. La Figura 2.3 muestra el diagrama de equilibrio de fases Fe-Zn, donde se muestran las diferentes fases que se forman en la reacción entre el acero y el recubrimiento. La Figura 2.4 muestra la ampliación de la porción del diagrama de fase donde ocurren las reacciones en la interfase [18].

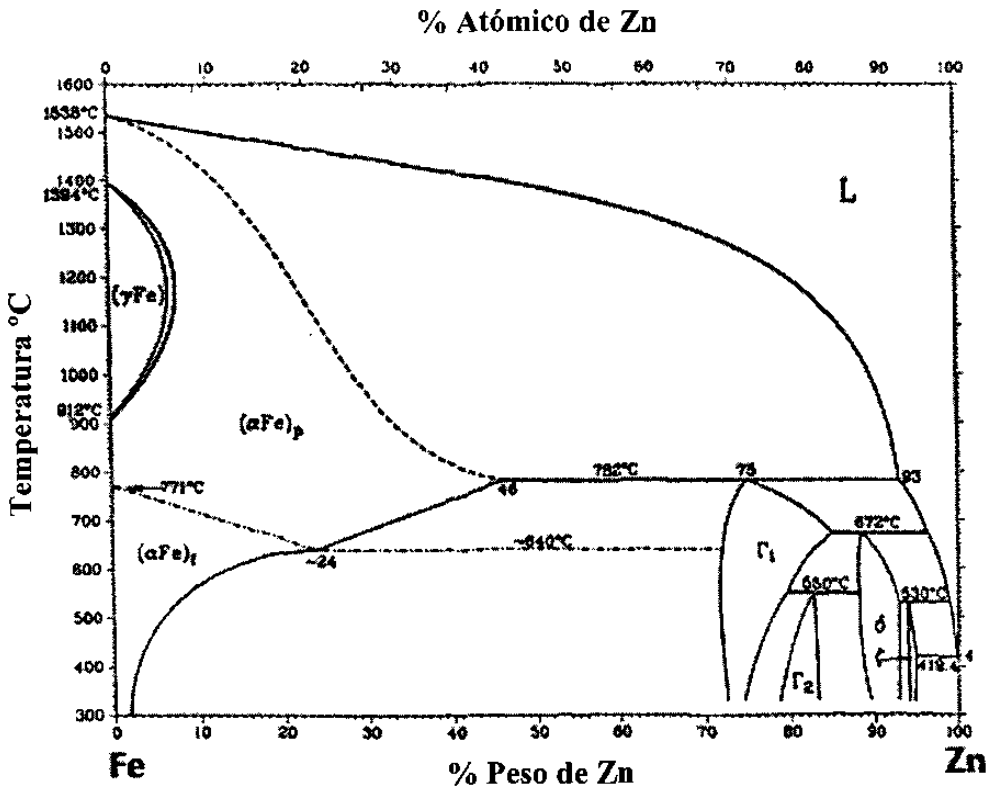

Figura 2.3 Diagrama de equilibrio de fases Fe-Zn [18].

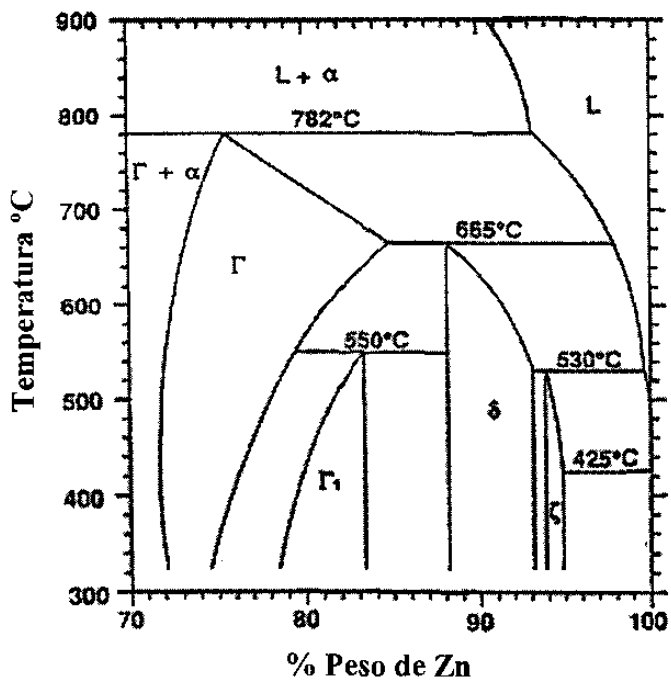

Figura 2.4 Ampliación de la zona de las fases Fe-Zn [18].

La Tabla 2.1 muestra las fases principales que se forman durante la inmersión o recocido post-inmersión:

Tabla 2.1 Características de las fases Fe-Zn [18]

Fase	Fórmula	Estructura Cristalina	Dureza Vickers
αFe	Fe(Zn)	BCC	104
Gamma Γ	Fe_3Zn_{10}	BCC	326
$Gamma_1$ Γ_1	Fe_5Zn_{21}	FCC	505
Delta δ	$FeZn_{10}$	Hexagonal	358
Zeta ζ	$FeZn_{13}$	Monoclínica	208
Eta ηZn	Zn(Fe)	HCP	52

Fase eta (η)

La fase eta no se encuentra representada en los diagramas, pero es una solución sólida de hierro en zinc con una solubilidad del Fe en un 0.03%.

Fase zeta (ζ)

Esta fase tiene un contenido de Fe aproximado del 5 al 6 %. Se forma de la reacción peritéctica que ocurre entre la fase δ y el Zn líquido a una temperatura de 530 ± 10°C.

Fase delta (δ)

Tiene una composición de Fe entre 7 y 11.5 %. Se forma de otra reacción peritéctica, fase Γ y líquido a 665 °C. Anteriormente esta fase era separada en dos morfologías, la fase δ_{1p} (encontrada hacia el lado rico en Zn) y δ_{1k} (encontrada en el lado rico en Fe), teniendo ambas la misma estructura cristalina, por lo que ahora se le conoce solamente como fase delta.

Fase Gamma$_1$ (Γ_1)

Está compuesta de aproximadamente 17 a 19.5 % de Fe. Se forma como resultado de la reacción peritectoide entre las fases gamma y delta a 550 ± 10°C. La fase Γ_1 aparece como una capa continua entre las capas Γ y δ y puede ser producida durante el calentamiento a bajas temperaturas sobre largos períodos de tiempo. Esta fase posee el valor más alto de microdureza reportado, Tabla 2.1.

Fase Gamma (Γ)

El rango de porcentaje de Fe en su composición es de 23.5 a 28 % a 450 °C. Se forma por una reacción pertitéctica a 782 °C entre el Fe α y el Zn líquido; la máxima solubilidad del Fe en el Zn es a la temperatura peritéctica de la fase delta a 665 °C [18].

2.3.2 Formación de las fases Fe-Zn

Horstmann [46, 47] propuso que cuando se sumerge el Fe en el Zn líquido a las temperaturas típicas de galvanizado (450-490 °C) las siguientes capas deberían de formarse: Feα con Zn saturado, una capa de fase gamma (Γ), una capa de fase gamma$_1$ (Γ_1), una capa de fase delta (δ), una capa de fase zeta (ζ) y una capa de fase eta (η). Sin embargo, la nucleación secuencial de las fases Fe-Zn ocurre en la interfase de la siguiente forma: comienza a formarse la fase ζ seguida de la fase δ y después de un tiempo de incubación aparece la fase Γ. En la Figura 2.5 se representa cronológicamente la secuencia de la reacción. El tiempo cero es representado por t_0 y el desarrollo de las fases ocurre de acuerdo al tiempo, de manera que $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$.

La Figura 2.6 muestra una morfología típica de un recubrimiento de galvanizado por inmersión en Zn puro. Las fases gamma ($\Gamma + \Gamma_1$) aparecen como una delgada capa con una interfase plana entre el substrato de acero y la capa de fase delta (δ), la cual presenta una morfología columnar como resultado del crecimiento preferencial perpendicular a la interfase. Después de un tiempo se forman grietas sobre la fase delta, que se pueden

extender hacia la fase zeta (por encima) y hacia la fase gamma (por debajo). La fase zeta tiene dos aspectos, que dependen de la sobresaturación del Fe en el líquido. La fase zeta sobresaturada en Fe crece en forma de columnas adyacentes a la fase delta. El crecimiento continuo de estos cristales ocurre en lugar de la formación de nuevos cristales de fase zeta. Sin embargo, si el Zn líquido está sobresaturado con Fe y hay suficiente nucleación de nuevos cristales se pueden formar un gran número de pequeños cristales de zeta en el líquido, que se separan unos de otros por la fase eta (η) solidificada.

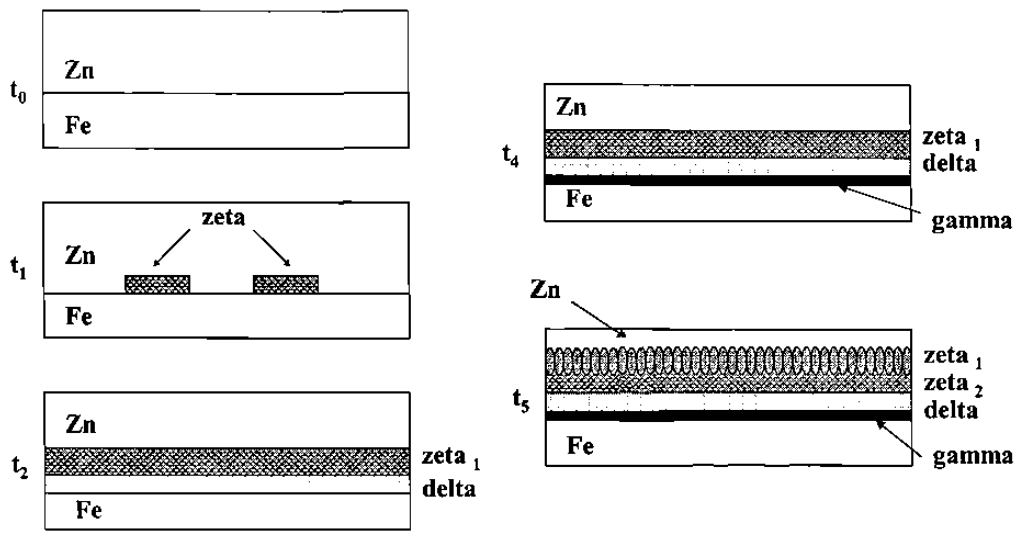

Figura 2.5 Secuencia cronológica de la formación de fases Fe-Zn [18].

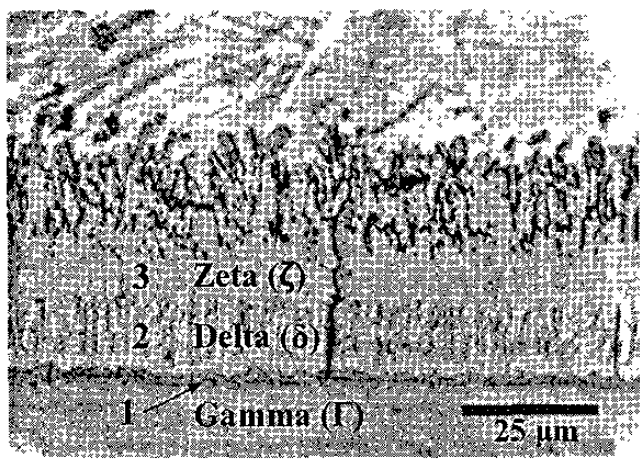

Figura 2.6 Microestructura típica del recubrimiento de Zn, 1) Fase gamma, 2) Fase delta y 3) Fase zeta [18].

2.3.3 Reacción cinética de las fases Fe-Zn

Cada una de las capas de fases en el recubrimiento de Zn exhibe un crecimiento cinético diferente, dependiendo de la temperatura de inmersión, que afecta la cinética de la capa total. Por ejemplo, a tiempos cortos de inmersión hasta 300 seg y 450 °C (Figura 2.7) la fase zeta crece rápidamente al principio, luego disminuye, mientras que la fase delta crece lentamente y después de un tiempo su espesor se incrementa más rápidamente. La fase gamma se forma solo después de largos períodos de tiempo y parece alcanzar un espesor máximo de alrededor de 1 μm. Horstmann [46, 47] reportó que existe un movimiento interior de la fase gamma hacia el Fe, mientras que la fase zeta se desplaza hacia el Zn líquido. La fase delta se expande en ambas direcciones, por lo general hacia el Zn. Además, conforme la fase gamma crece hacia el Fe es consumida por el crecimiento de la fase delta. De manera similar, la fase delta se expande en la creciente fase zeta que avanza hacia el Zn fundido. Todas estas transformaciones son controladas por la difusión del Zn hacia el substrato de Fe. Sin embargo, el Fe probablemente también se difunda hacia fuera a través de las fases de aleación en el Zn fundido, pero a una razón más lenta [18].

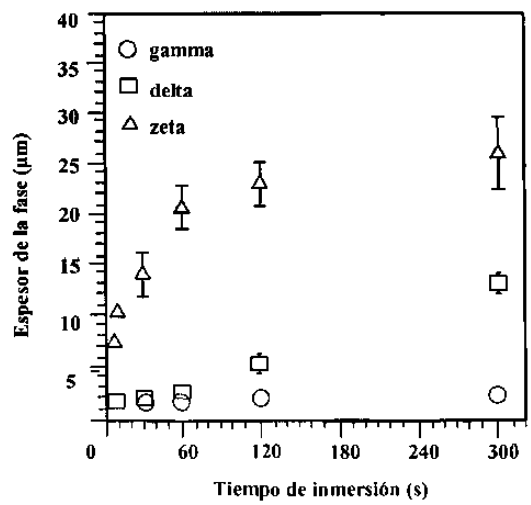

Figura 2.7 Ejemplo de la cinética de crecimiento de fases para un acero de bajo carbono [18].

2.3.4 Reacciones interfaciales

Las transformaciones de fases que suceden en la interfase Zn fundido/substrato deben ser entendidas para poder predecir y controlar la microestructura de los recubrimientos de galvanizado, lo cual se vuelve complejo debido al uso de adiciones de Al en el baño de Zn y de substratos que contienen elementos de solución agregados para mejorar las propiedades mecánicas del acero. Estas complejidades se relacionan con tres factores principales:

- Varias reacciones que ocurren al mismo tiempo, incluyendo 1) el mojado del acero en el Zn líquido, 2) la disolución del acero por el Zn, 3) la solidificación isotérmica de los compuestos intermetálicos de Fe-Zn, 4) las transformaciones de fases de difusión en estado sólido y 5) la solidificación de la aleación de Zn líquido.
- La velocidad de las reacciones son muy rápidas y en ocasiones suceden en menos de un segundo.
- La transformación de frontera se vuelve inestable y por lo tanto no es gobernada por simple equilibrio termodinámico.

2.3.5 Equilibrio del sistema Fe-Zn-Al

Para fundiciones de Zn-Al a 460 °C (tomado de un diagrama de fase ternario de equilibrio Zn-Fe-Al, Figura 2.8) se establecieron los siguientes equilibrios en las reacciones:

- Cuando el contenido de Al en el baño es menor que 0.1%, la fase en equilibrio con el líquido es la fase zeta.
- Cuando el contenido de Al en el baño se encuentra entre 0.1 y 0.14%, la fase en equilibrio con el líquido es la fase delta.

- Cuando el contenido de Al en el baño es mayor que 0.14%, la fase en equilibrio con el líquido es la fase eta ($Fe_2Al_5Zn_x$).

Estos resultados confirman que el límite de solubilidad del Fe disminuye continuamente con el incremento en el contenido de Al a una isoterma dada [18].

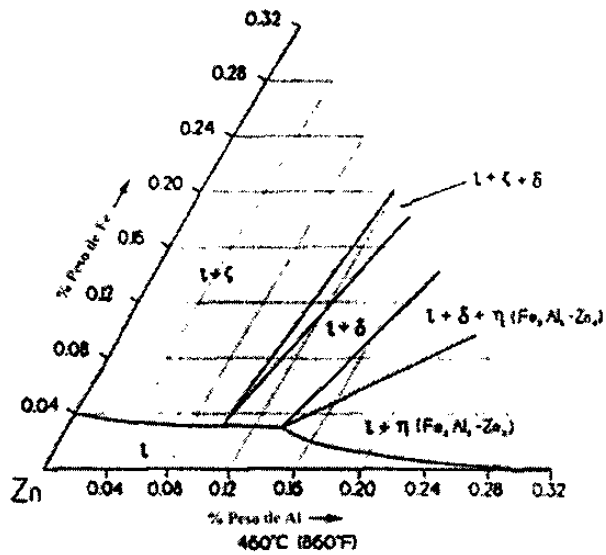

Figura 2.8 Esquina rica en Zn tomada de la sección isotérmica a 450 °C del diagrama de fase Fe-Zn-Al [18].

2.3.6 Elementos de aleación

Se ha demostrado que la presencia de elementos de aleación en el baño de galvanizado afecta grandemente la morfología, la cinética y el crecimiento de los recubrimientos de Zn durante el proceso de galvanizado. Al, Pb, Sn, Cu y Ni son los elementos más comunes, los cuales están presentes ya sea como adiciones o impurezas originadas de las materias primas utilizadas en el proceso.

El efecto del Al en bajas concentraciones (hasta 0.3%) es el de producir cambios significantes en la microestructura del recubrimiento y la inhibición de la formación de ciertas capas de fases.

La presencia de elementos como el Cu, Sn y Cd relativamente a altas concentraciones (de 1 a 2%) tiene un efecto sobre la apariencia y la estructura del recubrimiento. El Cu favorece el crecimiento de la fase delta.

El Ni impide la formación de fases indeseables como la fase zeta, la cual consiste de numerosos cristales pequeños y frágiles. El Al y el Ni juntos mejoran la formación de la fase exterior eta, la cual proporciona más protección galvánica debido al bajo contenido de Fe además de mejorar la calidad de los recubrimientos. La adición de Ni inhibe el crecimiento posterior de la fase zeta después de su formación inicial que resulta en la disminución del espesor del recubrimiento.

Adiciones de Pb alteran enormemente la orientación cristalográfica y la morfología superficial de la fase eta. También retrasa el engrosamiento de la fase sólida conforme el Pb disminuye la tensión superficial y promueve el crecimiento planar. [25].

2.3.7 Adiciones de Al (<1%)

La adición de Al en el baño de recubrimiento de Zn hace la capa de aleación muy delgada comparada con la que se recubre en un baño de Zn libre de Al. El Al actúa como un inhibidor que disminuye grandemente la razón de reacción Fe-Zn. Las capas de aleación delgadas permiten a los usuarios de los productos darle forma a la lámina en muchas morfologías complejas sin la pérdida por adhesión del recubrimiento [26].

Bajas adiciones se realizan para: 1) mejorar el brillo y el reflejo del recubrimiento, 2) reducir la oxidación del baño de Zn y 3) obtener un recubrimiento dúctil mediante la supresión de la formación de fases frágiles de Fe-Zn. En la práctica se agrega de 0.1-0.3 % de Al en el baño de galvanizado para inhibir la formación de compuestos intermetálicos de Fe-Zn. La inhibición es transitoria y resulta en un período de incubación que puede incrementarse con 1) el incremento en el contenido de Al en el baño, 2) el uso de bajas temperaturas en el baño, 3) un bajo contenido de Fe en el baño,

4) un aumento en la agitación, 5) un incremento en la presencia de Si en el acero y 6) una disminución en la rugosidad de la superficie [18].

2.3.8 Inhibición de las reacciones Fe-Zn

La primera reacción durante la inmersión en un baño de Zn que contiene Al es la reacción entre el Fe y el Al, es decir, la formación de la capa de inhibición. La capa de inhibición tiene que romperse antes de que las reacciones Fe-Zn tomen lugar [27].

La inhibición temporal de la formación de compuestos de Fe-Zn puede ser resultado del desarrollo de una capa continua del compuesto que está en equilibrio con el baño de Zn. Dependiendo del contenido de Al en el baño de Zn se pueden formar capas de fase zeta, delta o Fe_2Al_5 como se muestra en la Figura 2.9.

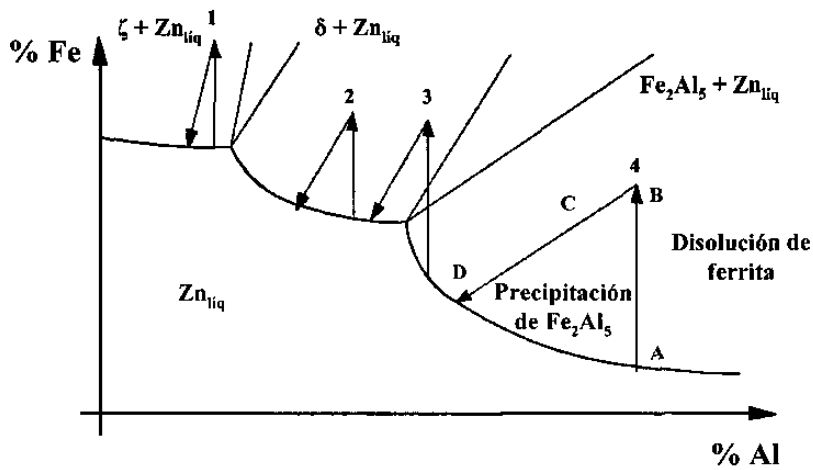

Figura 2.9 Mecanismo de formación de las capas de inhibición [18].

El control del Al en el baño de Zn es complejo debido a que el Al existe en dos formas. Parte del Al se encuentra disuelto en la fase líquida de Zn y el resto está presente en las partículas atrapadas en el baño. El Al en solución líquida comúnmente llamado activo o efectivo es el que puede desempeñar la función de inhibir la reacción Fe-Zn durante el galvanizado.

2.3.9 Formación de escoria en el baño de Zn

Los tipos de escoria que se forman en el baño de Zn se pueden clasificar como:

- Oxidos (Zn o Al)
- Compuestos intermetálicos (Zn-Fe y Fe-Al)

Los compuestos intermetálicos tienden a formar escorias en el recipiente del Zn cuando el Fe y el Al se encuentran presentes en el baño a concentraciones por encima de los límites de solubilidad, entre ellos se encuentran el $Fe_2Al_5Zn_x$ (escoria flotante en la parte superior del recipiente) y ($FeZn_7$) en la parte inferior del recipiente. Aun cuando el manejo correcto de la química del baño de Zn sea mantenido, la cristalización de la escoria es inevitable debido a las adiciones de Al en el baño, la disolución del Fe del substrato de acero y la insuficiente uniformidad de la temperatura y homogeneidad química del proceso [18].

2.3.10 Adiciones del substrato

De acuerdo a Hisamatsu [48], la reactividad del Fe-Zn en las fronteras de grano del substrato dependerá de la capacidad del elemento de solución en segregarse hacia estos sitios. Estas adiciones de aleación pueden ser separadas en elementos que segregan en las fronteras de grano (carbono, fósforo) y formadores de compuestos que precipitan en los límites de grano (titanio, niobio).

Carbono.- Este elemento se segrega hacia las fronteras de grano.

Fósforo.- Las adiciones de fósforo retardan el crecimiento de las fases de Fe-Zn. Se ha propuesto que este elemento se segrega hacia la superficie del acero durante la recristalización por recocido, estabilizando la capa de inhibición y retardando la razón de crecimiento de las fases Fe-Zn durante el galvanizado.

Silicio.- Pequeñas adiciones de silicio (0.1 %) conduce a un crecimiento linear en el cual el ataque usual en un baño de Zn puro caracterizado por las capas de Fe-Zn es reemplazado por una masa de cristales de fase zeta rodeado de Zn líquido [18].

2.4 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS

Los tipos de recubrimiento de Zn que se pueden obtener en una línea de galvanizado tipo Sendzimir son los siguientes: galvanizado, galvanneal, galvalume y galfan. Estos recubrimientos tienen diferente procesamiento, apariencia y propiedades mecánicas.

2.4.1 Galvanizado (Al< 1%)

Un recubrimiento de galvanizado es esencialmente Zn puro; el contenido de Al aproximado en el recubrimiento es de 0.2 a 0.3% [28]. El Al es probablemente el elemento más importante que se agrega al baño de Zn, con diferentes niveles requeridos para producir diferentes propiedades en el mismo. Niveles de Al de 0.005-0-02 % son agregados para darle brillo al recubrimiento inicial de la superficie. El efecto se encuentra relacionado a la formación de una capa continua de Al_2O_3 en la superficie del recubrimiento que inhibe la oxidación posterior actuando como una barrera protectora. Este efecto es también responsable de la reducción de la oxidación atmosférica del baño de Zn. Se agrega de 0.1 a 0.3% de Al para suprimir el crecimiento de las fases intermetálicas frágiles de Fe-Zn en la interfase del recubrimiento del acero, formando una capa de inhibición [$Fe_2Al_5(Zn)$]. El término de éste periodo de incubación es marcado por la interrupción de la capa inicial, seguido de un rápido ataque al substrato de acero. Además, durante la producción comercial, el tiempo de inmersión es mantenido bajo el periodo de incubación para obtener un producto altamente dúctil.

Los recubrimientos de galvanizado muy seguido ofrecen una estructura que consiste de un gran número de granos llamados flores como se muestra en la Figura 2.10. En sección transversal, se forma primero una capa de inhibición de $Fe_2Al_5(Zn)$, previniendo la formación cualquier fase intermetálica de Fe-Zn. La sobre-capa está formada de

dendritas de la fase eta (Zn puro) y aparece como una estructura policristalina. El tamaño de la flor está influenciado por las condiciones de enfriamiento durante la solidificación [18].

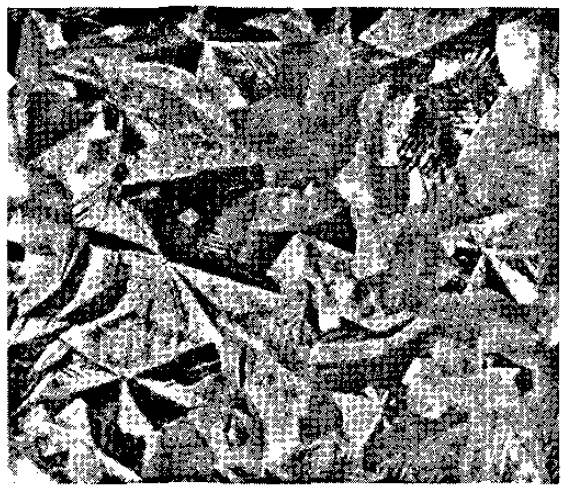

Figura 2.10. Ejemplo de la microestructura tipo flor de una lámina galvanizada [18].

2.4.2 Galvanneal

Durante la década pasada, la utilización de la aleación de recubrimiento Fe-Zn para inmersión en caliente conocida como galvanneal se ha expandido debido a las propiedades que le proporciona a la lámina, tales como la soldabilidad, el pintado y la resistencia a la corrosión, las cuales superan al recubrimiento de Zn puro [20].

El proceso de galvanneal involucra el recalentamiento de la lámina recubierta inmediatamente después de salir del baño de Zn y del sistema de control del espesor, de tal manera que la aleación entre el Zn y el Fe continúe por un período de tiempo suficiente para que el Fe se difunda hacia el Zn y a través de toda la superficie del recubrimiento. De esta manera el recubrimiento en lugar de ser Zn puro se convertirá en una aleación uniforme de Zn-Fe. La temperatura a la cual ocurre la razón más alta de aleación del Zn y el Fe se encuentra entre los 510 a los 565 °C. El uso de calentamiento por inducción asegura que las temperaturas en este rango sean producidas y controladas fácilmente con gran precisión.

Una ventaja de usar un horno de inducción es que prácticamente todo el calor es generado en la lámina de acero. La concentración de calor en la interfase no ferrosa promueve la mejor difusión del Fe al Zn. En contraste, cuando se utilizan métodos de flama convencionales, donde el calor radiado debe penetrar el recubrimiento sin alear, se requiere un mayor tiempo para lograr el mismo grado de aleación entre los dos metales. Esto significa que la lámina debe de permanecer más tiempo en el horno. En el proceso de inducción una vez que el grado de aleación deseado ha ocurrido la lámina abandona el horno para continuar con el proceso de enfriamiento. En el sistema convencional de calentamiento por gas, el efecto de la chimenea en la atmósfera caliente encima del horno inhibe el rápido enfriamiento de la lámina [29].

El recubrimiento final de Zn-Fe por lo general es una aleación de aproximadamente 90% Zn y 10 % Fe. La concentración final de Fe depende del ciclo de calentamiento, ya que la cantidad de difusión total es una función del ciclo de tiempo/temperatura [28]. Esto proporciona a la superficie exterior de la lámina una apariencia gris opaca en lugar del aspecto brillante del galvanizado convencional, así como se muestra en la Figura 2.11 [29].

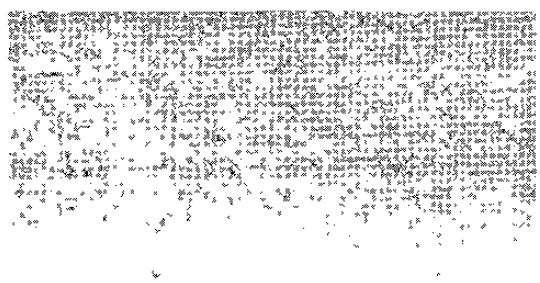

Figura 2.11 Apariencia superficial del recubrimiento tipo galvanneal [30].

Las variables involucradas en la producción de la microestructura de galvanneal y de sus propiedades deseadas son complejas. El buen control requiere que los efectos de la razón de calentamiento, la temperatura y el tiempo de sostenimiento y la razón de enfriamiento de las reacciones cinéticas del Fe-Zn sean bien entendidos, para que el recubrimiento óptimo para las propiedades deseadas pueda ser obtenido. Además de las variables de

proceso, las variaciones en la química del baño y de la composición del substrato contribuyen en la obtención de la microestructura final [18].

Para controlar la reacción Fe-Zn se agregan pequeñas cantidades de Al al baño de Zn, para inhibir el desarrollo de compuestos intermetálicos de Fe-Zn formando una capa delgada de Fe_2Al_5 que contiene Zn sobre la superficie del acero.

La cinética del galvanneal se encuentra determinada por dos procesos: la interrupción de la capa de inhibición y la reacción Fe-Zn. Como los dos procesos ocurren en la región interfacial acero/recubrimiento, se puede esperar que estos mecanismos sean influenciados por el estado superficial de la lámina después del recocido continuo. El estado de la superficie de la lámina está influenciado por la segregación en la superficie y la oxidación selectiva, además de la química del acero, la temperatura y la atmósfera del recocido [27].

2.4.2.1 Microestructura del galvanneal

La sección transversal de la microestructura de galvanneal ha sido clasificada como sigue:

Tipo 0

Recubrimiento sub-aleado en donde predomina la fase zeta (ζ) (Figura 2.12).

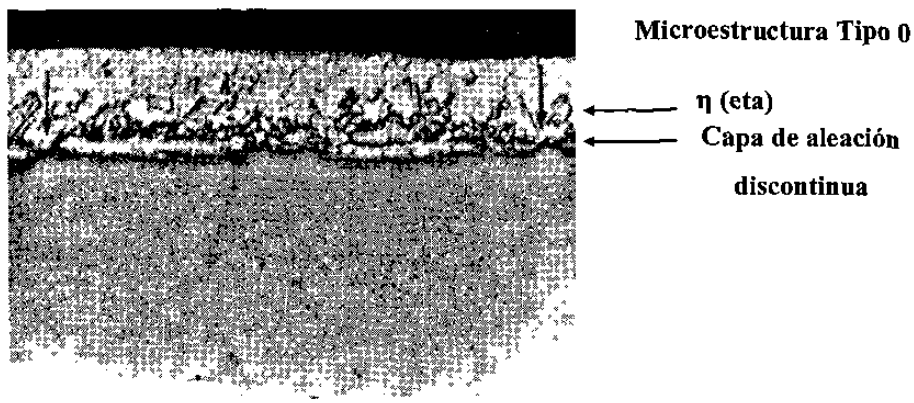

Figura 2.12 Microestructura de recubrimiento de galvanneal Tipo 0 [18].

Tipo 1

Recubrimiento óptimamente aleado con menos de 1 μm en la capa interfacial gamma (Γ) y una capa superior que contiene fase delta (δ) esparcida con una pequeña cantidad de fase zeta (ζ) (Figura 2.13).

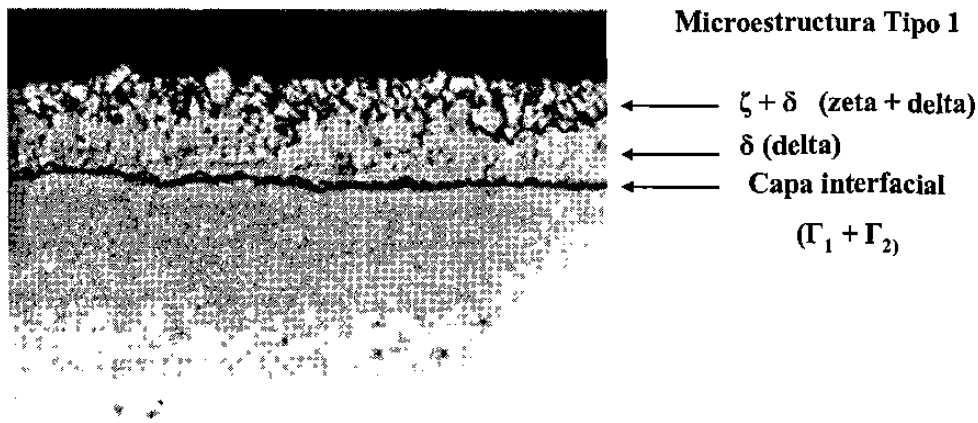

Figura 2.13. Microestructura de recubrimiento de galvanneal Tipo 1 [18].

Tipo 2

Recubrimiento sobre-aleado con una fase gamma (Γ) > 1μm y una capa superior de fase delta (δ) y en ocasiones fase zeta (ζ) (Figura 2.14) [18].

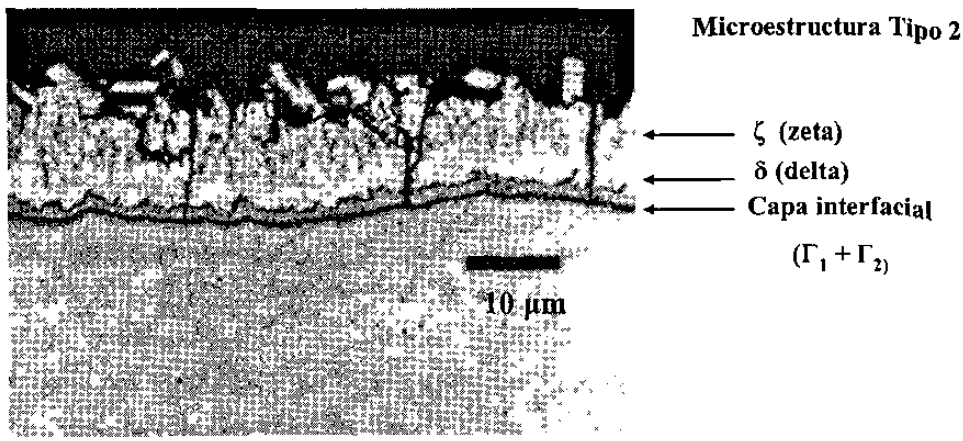

Figura 2.14. Microestructura de recubrimiento de galvanneal Tipo 2 [18].

2.4.2.2 Variables de proceso

Además de las variables asociadas con el galvanizado por inmersión en caliente (temperatura del baño, contenido de aleantes en el substrato y la composición del baño), la variable principal en el proceso de termogalvanizado es la velocidad de la línea, la cual controlará las variables del galvanneal tales como 1) la razón de calentamiento, 2) la temperatura y tiempo de sostenimiento y 3) la razón de enfriamiento [18].

2.4.3 Otros recubrimientos

El recubrimiento "galfan" está compuesto de Zn y 5% Al, mientras que el galvalume contiene un 55% de Al [18]. No se ampliará la explicación de cada uno de estos tipos de recubrimientos puesto que el objetivo de este proyecto se encuentra enfocado al análisis del galvanneal.

2.5 PROPIEDADES DEL RECUBRIMIENTO

Dependiendo del tipo de recubrimiento, la microestructura y composición de los constituyentes del substrato y el mismo recubrimiento se controlarán las propiedades deseadas. El substrato debe de cumplir los requerimientos de diseño del componente, de esta manera se selecciona en base a propiedades mecánicas como la resistencia, ductilidad, formabilidad, etc. Las propiedades importantes que tienen que ver con el uso de recubrimientos de Zn son principalmente la corrosión y la formabilidad y otras propiedades involucran la soldabilidad y el pintado.

2.5.1 Resistencia a la corrosión

Los recubrimientos de Zn son usados para mejorar la corrosión acuosa del acero mediante dos métodos, una barrera protectora o protección galvánica. En la barrera protectora, la capa de Zn, que separa el acero del ambiente corrosivo, se corroerá antes que dicho ambiente alcance al acero. En la protección galvánica, debido a que el Zn es

menos noble o anódico que el Fe a condiciones ambientales, se convertirá en un ánodo de sacrificio para proteger el substrato de acero, aun cuando éste pueda presentar cortes en las orillas o ralladuras en el recubrimiento [18].

2.5.1.1 Métodos anticorrosivos

Cuando se trata de productos galvanizados, las manchas de almacenaje es una forma de corrosión por manchas, por lo general blancas, aunque pueden ser de color gris o negro. Ya que la forma más común de decoloración es una apariencia blanca, también recibe el nombre de óxido blanco.

Las manchas pueden ocurrir cuando hojas de acero galvanizadas que están envueltas muy juntas (por ejemplo, cuando el producto es un rollo de lámina) se humedecen, ya sea por introducción de humedad o por condensación del aire atrapado entre las hojas contiguas. La decoloración es debida a los productos de corrosión que permanecen en la superficie de la lámina después de que el Zn reacciona con la humedad en la ausencia de la circulación de aire.

2.5.1.2 Tratamiento químico de pasivación

La mejor manera de minimizar la formación de óxido blanco, ya sea durante el transporte o el almacenamiento de rollos es la aplicación de un tratamiento superficial de pasivación. Este tratamiento de recubrimiento es aplicado en la línea de galvanizado. Es muy delgado y usualmente invisible.

La forma más común de pasivado es el recubrimiento de cromato a base de agua, el cual se aplica mediante un rociado de una solución a base de agua sobre la superficie o sumergiendo la lámina en un baño líquido que contenga la solución. Después de la aplicación del líquido, el exceso es retirado con unos rodillos cubiertos de hule, luego la capa es secada antes de que la lámina vuelva a ser enrollada a la salida de la línea de galvanizado [31].

2.5.1.3 Aceites de pasivación

Otro método para pasivar es el uso de aceites inhibidores de óxidos. Estos aceites contienen químicos específicos llamados inhibidores de corrosión. Se aplica en la línea de galvanizado, una manera común de aplicarlo es mediante aplicación electrostática. Estos aceites no intentan proporcionar buena lubricación para aplicaciones como el estirado, pero proveen de cualidades de lubricación que pueden ser útiles en operaciones de formado. Otro tipo de aceite es el supresor, el cual es un compuesto volátil que se evapora cuando se expone al aire y deja una cantidad de inhibidor de corrosión sobre la superficie de la hoja [31].

2.5.2 Formabilidad

El comportamiento de deformación y fractura de los recubrimientos base Zn en láminas de acero puede alterar el desempeño de los aceros en operaciones de estampado. Durante la deformación, el aumento en condiciones de fricción en la interfase acero/herramienta y las propiedades mecánicas del substrato pueden cambiar la respuesta a la formabilidad del material.

La ductilidad del recubrimiento depende de factores tales como el tamaño de grano, la orientación cristalográfica, la temperatura, el espesor del recubrimiento y la composición de fase de la capa intermetálica. La lubricación apropiada es esencial en el diseño de cualquier proceso de formado. Los recubrimientos de Zn fallan como resultado de la remoción de partículas durante el formado, ya sea por la formación de polvos, escamas y grietas.

La formabilidad es una propiedad importante en los recubrimientos de galvanneal ya que las fases intermetálicas se consideran frágiles. Como resultado, el desprendimiento de polvos y escamas del recubrimiento puede ocurrir durante la operación de formado, lo que resulta en la reducción de la resistencia a la corrosión y el pintado. La formabilidad ha sido evaluada a través de varias formas que incluyen: La doble copa Olsen, doblez en

U a 180°, la copa Swift y el doblez a 60°. Cada uno de las pruebas mide un tipo de desempeño ya que las pruebas evalúan diferentes modos de deformación.

Se ha encontrado que por lo general el grado de desprendimiento de polvos se incrementa con el contenido de Fe en el recubrimiento y el peso del mismo y las fallas han sido observadas en la interfase fase-gamma/substrato y la interfase fase-delta/fase gamma. También se ha reportado que el grado de agrietamiento depende de la presencia de fase gamma, la razón zeta/delta, o el gradiente de Fe dentro de las capas. Las fases delta y gamma son las fases frágiles en el recubrimiento Fe-Zn, mientras que la fase zeta es la más dúctil. La fase zeta puede liberar algo de las deformaciones en el recubrimiento y dar mejor resistencia a la formación de polvos como resultado de su plasticidad [18].

2.5.3 Soldabilidad

La soldabilidad de los recubrimientos de Zn es una propiedad importante del recubrimiento, ya que la mayoría del producto es unido mediante este proceso. Con la soldadura por puntos los recubrimientos de Zn reduce la vida útil de los electrodos debido a la aleación que se forma entre el Cu y el Zn. Cuando se trata de un acero galvanizado, la vida del electrodo puede ser tan pequeña como de 1500 a 2000 puntos de soldadura comparado con los 10000 puntos para un acero sin recubrimiento. Este efecto conlleva a que se presente una alta resistencia, calor localizado y un incremento de picaduras y erosión en la punta del electrodo. Como resultado, los costos de manufactura se incrementan porque la baja duración de la punta del electrodo reduce la productividad debido a los tiempos muertos en las operaciones de soldadura para rectificar las puntas.

El mecanismo de degradación de la soldadura por puntos se debe al hecho de que la temperatura en la interfase entre el electrodo y el recubrimiento (800°C) es más alta que el punto de fusión del Zn (419°C). El Zn se alea con el Cu del electrodo y forma latón, el cual tiene propiedades mecánicas menores que la aleación del electrodo produciendo de esta forma un efecto llamado de hongo (mushrooming) en la cara activa del mismo, el

cual se puede describir como si la cara del electrodo se fuera achatando conforme se efectúan los puntos de soldadura. Conforma la cara se incrementa la densidad de corriente disminuye bajando el tamaño de la soldadura. La soldadura de galvanneal es mejor que un galvanizado convencional, ya que es más difícil la aleación entre las fases Fe-Zn y el Cu del electrodo, mejorando de esta forma la vida útil del mismo [18].

2.5.4 Pintado

Los aceros recubiertos con Zn pueden utilizarse en su estado recubierto y para algunas aplicaciones requieren una superficie pintada, por lo que el pintado es una propiedad de diseño importante del recubrimiento [18].

Es difícil lograr una buena adhesión entre el recubrimiento de pintura y el galvanizado de la lámina. Por esta razón se acostumbra aplicar algún tipo de capa intermedia o pre-tratamiento, para desarrollar un buen desempeño. El pre-tratamiento mejora la adhesión mecánica entre la pintura y el recubrimiento de Zn y la resistencia a formar burbujas y perder pintura durante la exposición a ambientes corrosivos.

El pre-tratamiento de pintado mas comúnmente aplicado para desarrollar buena calidad de enlace entre la pintura y el recubrimiento es el fosfato de Zn. Primero debe hacerse una limpieza de la lámina para remover cualquier aceite residual, esto se hace aplicando una solución alcalina o con solventes desengrasantes. El siguiente paso es la etapa de acondicionamiento, en la cual se aplica fosfato de Ti para preparar la superficie para la formación de una capa superior de fosfato de Zn. Después se aplica el fosfato de Zn ya sea por inmersión o por rociado sobre la superficie, cuando la lámina deja de estar en contacto con la solución se lava y se seca. Se puede aplicar después del lavado un enjuague con cromatos como protección contra la corrosión. Cuando el recubrimiento con fosfato está realizado apropiadamente, la adhesión resultante de la pintura es grandemente mejorada, ya que parte del filme de fosfato que está áspero y poroso permitirá el enlace entre el fosfato y la pintura [32].

CAPITULO III

SOLDADURA POR RESISTENCIA ELECTRICA POR PUNTOS

3.1 INTRODUCCIÓN

La soldadura por resistencia eléctrica por puntos (RSW-Resistance Spot Welding) ha sido ampliamente utilizada desde 1950 [33] y es el principal proceso de unión de hojas de metal en varias industrias tales como la automotriz y la aeroespacial. La soldadura por resistencia fue inventada por Elihu Thomson en 1877 y ha crecido enormemente desde que el primer automóvil soldado fuera introducido en 1933. Este proceso se ha convertido el medio predominante para el ensamblaje automotriz [34].

3.2 SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA

La soldadura por resistencia eléctrica, es un proceso en el cual superficies en contacto son unidas con uno o varios puntos mediante la generación de calor debido a la resistencia al paso de una corriente eléctrica que circula a través de unos electrodos que sujetan y aplican presión a las piezas que se desean unir. Las superficies en contacto en la región de concentración de la corriente son calentadas por un pulso de corto tiempo de bajo voltaje, un alto amperaje de corriente para formar la unión soldada. Cuando el flujo de corriente cesa, la fuerza del electrodo es mantenida mientras que el metal soldado se enfría rápidamente [35].

En la Figura 3.1 se muestra un diagrama del proceso de soldadura por resistencia, así como también una gráfica con la variación de la resistencia que se genera en diferentes puntos del contacto lámina-lámina.

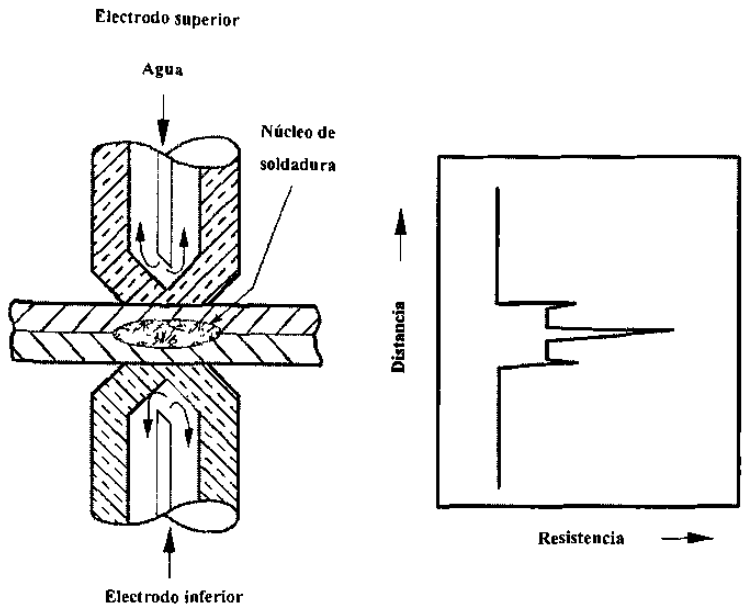

Figura 3.1. Esquema representativo de la soldadura por puntos [36].

3.3 MORFOLOGÍA DEL PUNTO DE SOLDADURA

Un punto de soldadura se puede dividir en tres partes:

1. **Botón de soldadura:** que representa la huella que los electrodos dejan impresa en la lámina cuando éstos sujetan las piezas de trabajo.

2. **Núcleo de soldadura o zona de fusión:** es el corte transversal del botón de soldadura que representa el material que se ha fusionado.

3. **Zona afectada por el calor (HAZ - heat affected zone):** zona alrededor del núcleo en la cual el material no se ha fusionado pero su microestructura ha sido alterada.

3.4 CICLO DE SOLDADURA

El ciclo típico de soldadura por puntos consiste generalmente de varios pasos o etapas que se describen a continuación:

Tiempo de presión (ST-squeeze time): es proporcionado antes de que la corriente comience a fluir y permite que los electrodos desarrollen la fuerza necesaria para sujetar las piezas de trabajo. En este punto, los contactos de soldadura son energizados y la corriente empieza a fluir.

Tiempo de soldadura (WT-weld time): es el tiempo total de flujo de la corriente. La corriente puede alcanzar abruptamente el nivel de la corriente se soldadura, o se puede programar una acumulación gradual de la corriente (upslope). Para aplicaciones automotrices, este tiempo por lo general alcanza valores tan pequeños como varios ciclos (1 ciclo = $^{1}/_{60}$ seg) hasta ½ seg.

Tiempo de sostenimiento (HT-hold time): cuando la corriente deja de fluir, el tiempo de sostenimiento asegura la coalescencia apropiada del punto de soldadura. En esta etapa las piezas de trabajo se encuentran sujetas y dentro de los electrodos hay un flujo de agua que permite el enfriamiento de los mismos.

Tiempo de separación (OT-off time): es el tiempo en el cual la fuerza de los electrodos es liberada de las piezas de trabajo [36].

3.5 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

La energía calorífica es generada cuando una corriente eléctrica pasa a través de una resistencia eléctrica. La razón a la cual el calor es generado está dada por:

$$W = I^2R \quad \text{(Ec. 3.1)}$$

Donde

W = Potencia eléctrica (Watts)

I = Corriente (Amperes)

R = Resistencia (Ohms)

Si la potencia aplicada es sobre un intervalo de tiempo t (seg), el calor generado en la resistencia es:

$$Q = I^2Rt \quad \text{(Ec. 3.2)}$$

Donde

$$Q = \text{Watts-seg o Joules}$$

3.5.1 Gradiente de temperatura

La Figura 3.2 muestra el gradiente de temperatura de un punto de soldadura debido a las resistencias totales de los elementos involucrados en el proceso y en la Figura 3.3 se puede apreciar las temperaturas que normalmente se generan durante la soldadura:

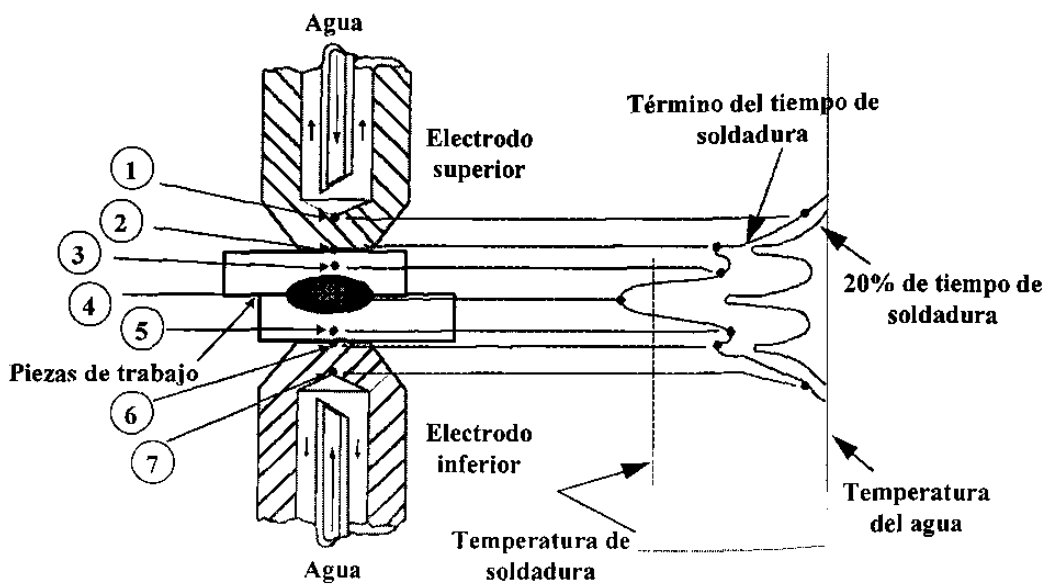

Figura 3.2 Gradiente de temperaturas para un punto de soldadura [37].

Hay siete resistencias conectadas en serie:

1. Electrodo superior.
2. Contacto entre el electrodo superior y la lámina superior.

3. Lámina superior
4. Contacto entre las láminas superior e inferior.
5. Lámina inferior.
6. Contacto entre la lámina inferior y el electrodo inferior.
7. Electrodo inferior.

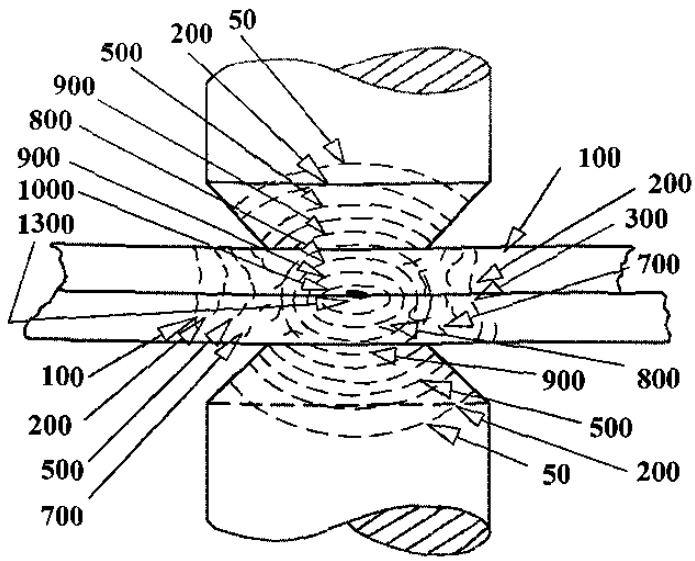

Figura 3.3. Temperaturas (en °C) que se generan en las piezas de trabajo y sus alrededores durante el proceso de soldadura [37].

El calor será generado en cada una de éstas secciones en proporción a la resistencia de cada una. Sin embargo, se requiere que el calor para la soldadura se concentre en el punto 4 y es necesario reducir el calor lo más que se pueda en los demás puntos. Al inicio de la soldadura la temperatura en todas las partes está representada por la línea vertical de temperatura del agua. El punto con la resistencia más alta es el 4 y es aquí donde se genera rápidamente el calor. Los puntos con las resistencias más altas subsecuentes al 4 son 2 y 6, y la temperatura también se eleva en estos puntos, pero a una menor razón.

El calor generado en 2 y 6 se disipa rápidamente en los contactos con los electrodos 1 y 7, mientras que el calor en 4 es parcialmente atrapado y la disipación es más lenta.

Conforme el tiempo de soldadura progresa, la razón para que el punto 4 se eleve será más rápido que para 2 y 6. La temperatura de soldadura está indicada con una línea punteada [37].

3.5.2 Electrodos

Deben tener una alta conductividad eléctrica para mantener el calor interno generado en un mínimo y una alta conductividad térmica para disipar el calor rápidamente de las zonas 2 y 6. También requieren de resistencia física a la deformación causada por la fuerza aplicada a éstos [37].

3.5.3 Superficies de contacto

Están definidas por las zonas 2 y 6. De nuevo, la resistencia eléctrica debe mantenerse en el mínimo, esto puede hacerse de dos maneras: teniendo una superficie de trabajo suave y limpia y controlando la fuerza del electrodo. Si las superficies están sucias, con óxidos y con huecos, la temperatura en estos puntos se elevará casi tan rápido como en las superficies en contacto, lo que resulta en la expulsión de metal, erosión del electrodo, etc.

Cuando las superficies están sujetas a una baja fuerza el contacto metal-metal puede ser solo un pequeño porcentaje del área total de contacto superficial. Conforme la fuerza se incrementa estos altos puntos son oprimidos, incrementando el contacto metal-metal real, reduciendo de esta manera la resistencia. Este incremento en la fuerza del electrodo también disminuye la resistencia en el contacto de las superficies [37].

3.5.4 Materiales de trabajo

En la práctica se supone que los dos electrodos son idénticos y que las piezas de trabajo son del mismo espesor y de material similar. Si esta relación cambia, entonces el gradiente de calor (Figura 3.2) ya no será simétrico [37].

150556

3.5.5 Tiempo

Debido a que el calor generado es igual a la multiplicación de la potencia por el tiempo en el que es aplicada (Ec. 3.2), el tiempo en el que la corriente de soldadura existe se convierte en uno de los factores que controlan el calor total generado.

En la Figura 3.2 se observa que el tiempo se mueve hacia la izquierda desde el punto de inicio (línea sólida vertical). Si el tiempo se proyecta más allá de lo que se muestra en la figura, la temperatura en la zona 4 sobrepasará el punto de fusión en áreas diminutas del material de trabajo causando depósitos con gas. El resultado será la expulsión de partículas del material o chispas. Si los puntos 2 y 6 tienen óxidos también puede suceder lo anterior. La continua aplicación de corriente causará que los picos sean menos pronunciados, el núcleo de soldadura completará su crecimiento hacia las caras del electrodo y las zonas 3 y 5 se volverán plásticas, produciendo una severa distorsión en las caras de los electrodos. Además, la zona afectada por el calor se desviará hacia las láminas más allá de los electrodos. En la mayoría de los casos, en un tiempo durante este intervalo, las pérdidas por radiación serán iguales al calor de entrada, de este modo se detendrá el incremento posterior de temperatura.

De las ecuaciones (3.1) y (3.2) se demuestra que la generación de calor es proporcional al cuadrado de la corriente. De esta forma, despreciando pérdidas, al duplicar la corriente se cuadriplicará el calor desarrollado sobre cualquier período de tiempo. A una cierta prolongación, el tiempo y la corriente pueden ser complementarios, esto es, un cambio deseado de calor puede asegurarse ya sea por un cambio en el tiempo o en la corriente. La transferencia de calor es cuestión del tiempo, y en el desarrollo del tamaño adecuado del núcleo, el elemento tiempo no puede ser acortado mucho a pesar del incremento de corriente.

Los primeros efectos de la insuficiencia de tiempo se notan cuando el calor se genera demasiado rápido en los tres contactos de las superficies, lo que provoca picaduras y chispas, sobre todo en las superficies de los electrodos en contacto.

Cuando la corriente cesa, la generación de calor se detiene y las piezas de trabajo comienzan a enfriarse. Debido a la conductividad térmica de los electrodos, su enfriamiento con agua permitirá que rápidamente alcancen la temperatura del agua de enfriamiento. Las superficies en contacto 2 y 6 conducen calor a los electrodos, además de nivelar casi de inmediato los picos en estos puntos, entonces el centro se enfría gradualmente. La razón de enfriamiento se determina por las mismas condiciones que gobiernan la cantidad de calor de entrada. Sin embargo, si los electrodos son levantados inmediatamente después de que la corriente se detiene no serán capaces de absorber el calor de la soldadura, los picos en las superficies del electrodo se incrementarán, los valles entre los picos desaparecerán y el enfriamiento será retardado. Debido a que la presión se remueve mientras que la soldadura todavía está plástica o fundida, la soldadura puede ser de baja calidad [37].

3.5.6 Fuerza de soldadura

Para una geometría dada del electrodo y una condición superficial de la pieza de trabajo, la resistencia de contacto es inversamente proporcional a la fuerza del electrodo. Si la cara del electrodo tiene forma de radio, una mayor fuerza aumenta el área efectiva de contacto y reduce la densidad de corriente. Además, un incremento en la fuerza del electrodo reduce el calor generado [37].

3.5.7 Efecto de desviación

Al efectuar un patrón de soldaduras, si un punto de soldadura se hace cerca de otro, se presentará un efecto de desviación (shunting), el cual equivale a tener dos resistencias en paralelo. La corriente circulará a través de las dos rutas en proporción inversa a su resistencia. La acción de la primera soldadura elimina la resistencia de la interfase en ese punto y como las superficies en contacto de los electrodos son las mismas, la división de la corriente dependerá de la razón de la resistencia de la segunda soldadura a la resistencia de la ruta de la corriente a través de la primera soldadura.

En la Figura 3.4 se aprecia que el metal entre los electrodos se vuelve un circuito dividido; parte de la corriente se desvía hacia A mientras que el resto circula en B. Si la distancia entre los puntos A y B es grande, entonces la resistencia de A será alta comparada con B y el efecto puede ser despreciado. Si la distancia es corta, una parte apreciable de la corriente se desviará [37].

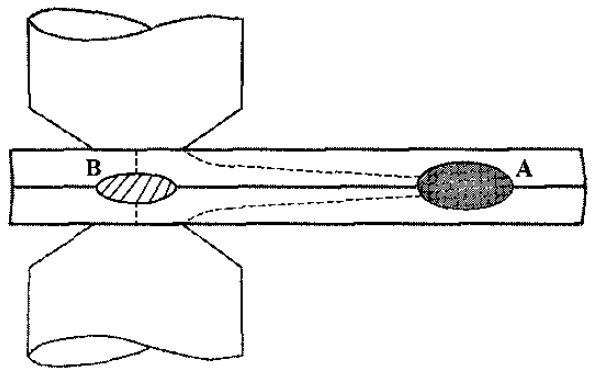

Figura 3.4 Efecto de desviación entre dos puntos de soldadura [37].

3.5.8 Impulsos múltiples

Cuando se sueldan láminas gruesas se usan con frecuencia impulsos múltiples. La principal ventaja de este programa se debe a que durante el tiempo de enfriamiento entre los impulsos, la alta conductividad térmica de los electrodos disipa más calor de las superficies externas de las piezas de trabajo que la que se disipa de la zona de soldadura. Esto incrementa el gradiente de temperatura entre la zona soldada y las superficies externas de la pieza de trabajo permitiendo una mayor entrada de calor sin excesivo sobrecalentamiento de los electrodos con las áreas de contacto comparado con la soldadura con un solo impulso [37].

3.6 MEDICIÓN DE PARÁMETROS DE SOLDADURA

Los cuatro valores medidos más comúnmente para asegurar el proceso adecuado de soldadura y su aceptabilidad son:

- El tiempo de soldadura, generalmente medido en ciclos.
- La corriente de soldadura que puede ser medida en el transformador de la máquina soldadora.
- La fuerza del electrodo que generalmente es establecida mediante la variación de la presión de aire del cilindro móvil del electrodo. La fuerza se mide utilizando un manómetro o una celda de carga
- La resistencia del material, puede ser medida como la suma de las resistencias de contacto y de volumen [36].

3.7 CURVA DE SOLDABILIDAD

Es posible establecer un intervalo de corriente en el cual los puntos de soldadura tengan un tamaño aceptable y se obtengan en un tiempo de soldadura particular. Este intervalo se puede expandir para otros tiempos de soldadura y producir de esta forma una región o curva de soldadura en la cual el núcleo de soldadura producido sea aceptable. La figura 3.5 ejemplifica una curva de soldadura.

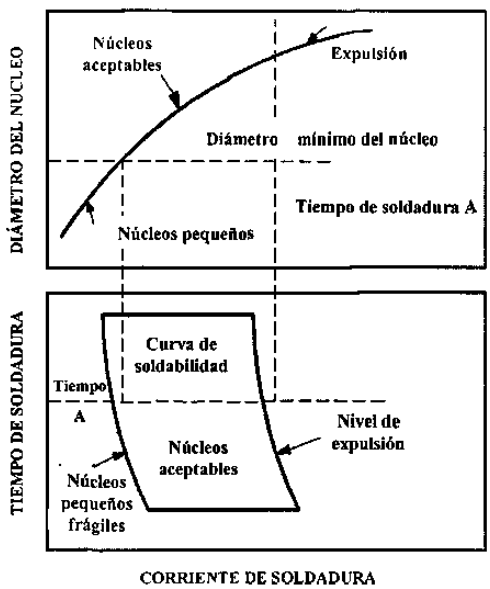

Figura 3.5 Representación de una curva de soldadura [36].

Conforme la corriente se incrementa, el diámetro del núcleo se incrementa hasta o, en la mayoría de los casos, más allá del nivel de corriente de expulsión. Soldaduras hechas

con corrientes o tiempos que exceden la curva más alta de expulsión (Figura 3.5) se consideran inaceptables. Asimismo las soldaduras realizadas con corrientes o tiempos debajo de la curva más baja (Figura 3.5) tienen núcleos de tamaño insuficiente o exhiben ruptura interfacial durante las pruebas y son también inaceptables. Solamente las soldaduras efectuadas con corrientes y tiempos que se encuentren dentro del área de la curva de soldadura serán aceptables [36].

3.8 EQUIPO

Las máquinas de soldadura por puntos están compuestas por tres elementos principales:

- **Circuito eléctrico:** que consiste en un transformador de soldadura, un interruptor de rosca y un circuito secundario.
- **Circuito de control:** que inicia y mide la duración del flujo de corriente y regula la corriente de soldadura.
- **Sistema mecánico:** consiste de una caja, material fijo y otros dispositivos que sostienen y sujeta la pieza de trabajo y aplican la fuerza de soldadura [35].

3.9 PARÁMETROS QUE AFECTAN LA SOLDADURA

Existen varios factores que afectan la formación del núcleo, sus propiedades y las características de desgaste en los electrodos. Estas variables pueden dividirse en dos clases: las relacionadas con el proceso de soldadura y las relacionadas con el acero.

Variables del proceso de soldadura

1. Material del electrodo.
2. Diseño del electrodo.
3. Fuerza del electrodo.
4. Tiempo de soldadura.
5. Corriente.

6. Tiempo de sostenimiento.
7. Secuencia de soldadura/desviación.
8. Templado posterior a la soldadura.

Variables relacionadas con el acero

1. Composición química.
2. Limpieza.
3. Proceso de laminación.
4. Condición superficial.
5. Recubrimiento.
6. Espesor.

En general, los factores principales que afectan el intervalo y el nivel de corriente son aquéllos que:

1. Causan variaciones en la resistencia de la superficie (fuerza del electrodo, condición superficial).
2. Causan variaciones en la energía de entrada (tiempo de soldadura, corriente, desviación).
3. Promueven falla interfacial prematura del núcleo (tiempo de sostenimiento, química, procesado).

Los factores que fomentan el rápido deterioro del electrodo son aquéllos que promueven alta temperatura o esfuerzos mecánicos al electrodo (resistencia del material, diseño y fuerza del electrodo, tiempo de soldadura, corriente de soldadura) y los que promueven la aleación y fusión no homogénea del electrodo (química, condición superficial, recubrimientos).

Las propiedades mecánicas de las soldaduras pueden verse afectadas por muchos factores, entre los cuales se encuentran:

1. Geometría del espécimen, espesor de la lámina y el arreglo de los puntos de soldadura.
2. Condiciones de soldadura (tiempo de soldadura y sostenimiento, corriente de soldadura).
3. Tratamientos post-soldadura.
4. Condiciones de prueba (temperatura de prueba, velocidad, atmósfera) [36].

3.9.1 Soldadura de aceros recubiertos

Los recubrimientos con contenidos de Zn, Sn o Al son muy usados en láminas de acero, principalmente para mejorar la resistencia a la corrosión. Estos recubrimientos presentan problemas en cuanto a su soldadura [36].

Las condiciones de soldadura dependen del tipo de recubrimiento. Los recubrimientos de Fe-Zn tienen una mayor resistencia superficial que los que contienen Zn puro y por lo tanto requieren solamente de corrientes de soldadura un poco más altas que los aceros sin recubrir de espesor equivalente [38]. El problema más serio es que al tener el acero un recubrimiento causa un deterioro muy rápido del electrodo, el cual se manifiesta por picaduras y agrandamiento del diámetro del electrodo. Esto causa una gran reducción en la densidad de corriente con una reducción correspondiente en el diámetro del botón. En estos casos, solamente se pueden hacer unos cuantos de miles de puntos antes de que el electrodo requiera rectificación, comparado con los 10000 puntos que se pueden realizar en materiales sin recubrir sin que el electrodo se rectifique [36].

Muchos aceros de alta resistencia tienen rangos de corriente muy reducidos. En algunos casos, esta restricción en la soldadura se debe a las fallas interfaciales de los núcleos de soldadura [49], lo que resulta en una zona de fusión aparentemente más pequeña. Yamanchi y Taka [50] han demostrado que los aceros de alta resistencia pueden ser más susceptibles a la expulsión de material durante la soldadura y esto se adjudica a su alta resistividad eléctrica, aunque la alta resistividad permite que se produzcan puntos de soldadura utilizando menores corrientes [39].

3.9.2 Electrodo

Los materiales de los electrodos para la soldadura por resistencia eléctrica deben tener suficiente conductividad térmica y eléctrica y baja resistencia de contacto para prevenir la incineración de la superficie de la lámina y la formación de aleación en la cara del electrodo. Además, el electrodo debe tener una resistencia adecuada para resistir la deformación a las presiones y temperaturas de operación [35].

Los materiales utilizados en los electrodos son por lo general aleaciones base Cu y pueden ser reforzadas o endurecidas mediante la adición de pequeñas cantidades de elementos de aleación. Las aleaciones de Cu usadas en la soldadura por resistencia eléctrica han sido clasificadas por la Resistance Welding Manufacturer's Association (RWMA) [36]. En el Anexo II se amplia la explicación de las diferentes clases de electrodos para soldadura por resistencia eléctrica.

La forma de la cara del electrodo es muy importante para tener una soldadura satisfactoria. Los electrodos de cono truncado con área de contacto plana se recomiendan para soldar aceros galvanizados. El ángulo del electrodo debe de ser de 120-140° para el mejor desempeño. El diámetro de la cara de contacto deberá ser de cuatro a cinco veces el espesor del material a ser soldado [40]. En la Figura 3.6 se muestran las diferentes geometrías que pueden tener los electrodos.

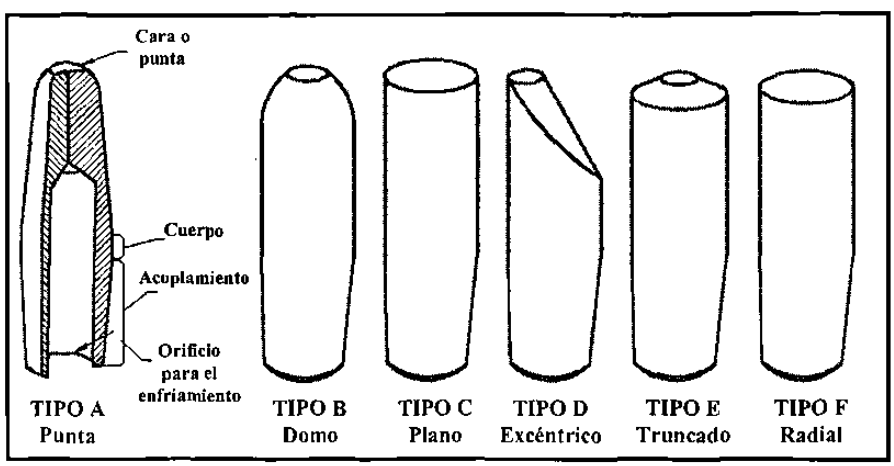

Figura 3.6 Geometrías de electrodos para soldadura por puntos [35].

3.9.3 Deterioro del electrodo

Wristen [51] examinó la difusión del Zn hacia el Cu del electrodo y encontró en los electrodos que mostraban mayor deterioro que el Zn se difundía a una mayor profundidad. La presencia del Zn a mayor profundidad causa un incremento en la resistividad eléctrica del electrodo con calentamiento posterior resultando en la formación de cráteres y un aplastamiento de la cara del electrodo. Dykhno [52] indica que la transferencia del Zn del recubrimiento al electrodo es por sublimación del Zn en huecos microscópicos debido a la rugosidad superficial del recubrimiento, seguida de la condensación de la superficie enfriada del electrodo y, tal vez, la subsecuente difusión hacia el electrodo.

En general, la aleación de la punta del electrodo parece ser perjudicial. Parte del latón formado tiende a ser frágil y se rompe en astillas formando hoyos. Sin embargo, existe indicación que parte de la aleación en la punta del electrodo es beneficial ya que previene que el electrodo se pegue y disminuye la excesiva expulsión del Zn en las piezas de trabajo. Por otro lado Freytag [53] sugirió que el desgaste de los electrodos es causado por condiciones térmicas desfavorables establecidas en la interfase del electrodo como resultado de la alta conducción térmica y el estrecho contacto del electrodo establecido por la presencia del recubrimiento de Zn [36].

3.9.4 Fuerza del electrodo

Se ha demostrado que el uso de menores fuerzas de los electrodos que las usadas para soldar aceros sin recubrir resultan en diámetros soldaduras más consistentes y alargamiento de la vida del electrodo. Para materiales de mayor resistencia se requieren mayores fuerzas del electrodo para asegurar que las partes que se sueldan estén haciendo contacto. Una fuerza muy baja causará expulsión prematura del Zn que puede resultar en la pérdida del Zn en la superficie mientras que una alta fuerza demanda una corriente de soldadura excesiva que tenderá a reducir la vida del electrodo [36].

3.9.5 Tiempo de soldadura

Los tiempos de soldadura recomendados para acero galvanizado alcanzan de un 50 a un 100% más que los usados en aceros sin recubrimiento de espesores equivalentes. Este tiempo extra es aparentemente necesario para desplazar el Zn de la zona de soldadura antes de que se genere el calor suficiente para producir la fundición del metal en la misma.

Tiempos de soldadura largos o excesivamente cortos reducen la vida del electrodo. Se creía que el tiempo largo daba una vida reducida debido al incremento de la duración del contacto con el recubrimiento de Zn fundido y el incremento resultante en la interdifusión Cu/Zn, además que los largos tiempos llevaban a la erosión de los electrodos. Se pensaba que los tiempos cortos proporcionaban una corta vida debido a los ciclos severos de calentamiento/enfriamiento [36].

3.9.6 Corriente de Soldadura

Debido a la disminución en la resistencia de contacto de las interfases de Zn, los requerimientos de corriente para soldar aceros galvanizados son siempre mayores que para los aceros que no lo son. Este incremento en corriente puede ser de un 25 hasta un 50% más grande, además de que puede causar calentamiento elevado en el electrodo y reducir su vida.

Autores como Freytag [53] y Green [54] suponen que la razón principal para las altas corrientes es que la resistencia en la superficie de contacto del acero galvanizado es mucho más baja que para un acero laminado en frío sin recubrir. Los recubrimientos de Zn más suaves y de alta conductividad proveen de un buen contacto entre los electrodos y las piezas de trabajo.

Orts [55, 56, 57] examinó el efecto de la acumulación de Zn alrededor del núcleo en el plano de contacto y asocia la alta corriente con el desvío a través del Zn, el cual disminuye la

densidad de corriente en las superficies de contacto. Este incremento en corriente sigue fluyendo y la cara del electrodo se vuelve más caliente de lo que estaría en un acero sin recubrir [36].

3.9.7 Tiempo de sostenimiento

Se ha encontrado que cuando el tiempo de sostenimiento se mantiene en un mínimo se reduce la tendencia de la punta del electrodo a pegarse, lo cual es la principal causa del desgaste de la punta, picaduras y aleación del Zn. Por otro lado, tiempos muy cortos y altas corrientes provocan una disminución o remoción completa del recubrimiento de Zn en la zona de soldadura, que puede convertirse en un problema de corrosión [36].

3.9.8 Desviación de la corriente

Para un acero sin recubrimiento la corriente de soldadura se restringe a la ruta del estrecho contacto entre los electrodos. Cuando aceros recubiertos se sueldan, el recubrimiento en el plano de contacto forma una ruta de desvío, por lo tanto se requieren altas corrientes para mantener la densidad de corriente necesaria. La alta densidad de corriente eleva la temperatura del electrodo e incrementa el desgaste. Este efecto se puede apreciar en la Figura 3.7 [36]:

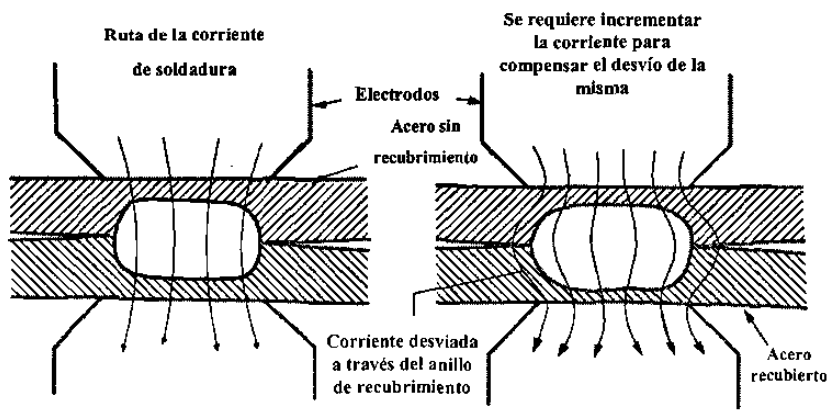

Figura 3.7 Comparación del efecto de desviación de corriente de soldadura en aceros recubiertos y aceros no recubiertos [36].

3.9.9 Enfriamiento del electrodo

El enfriamiento del electrodo puede mejorar la vida del mismo, ya que la temperatura en las caras de los electrodos es mayor cuando se suelda acero galvanizado que cuando el acero no es recubierto. Temperaturas de 830 hasta 925 °C se reportaron para soldadura de acero galvanizado y para acero no recubierto temperaturas de 537 hasta 648 °C [36].

3.9.10 Espesor del recubrimiento/lámina

Autores como Friedman [58, 59] y Diebold [60] indicaron que la vida de la punta del electrodo disminuye conforme el espesor del recubrimiento aumenta. Se ha observado que materiales más delgados son más sensibles al deterioro del electrodo. Investigaciones hechas por Orts [56, 57, 58] indican que el porcentaje de aumento en la corriente para soldar acero galvanizado comparado con un acero al carbono fue mayor para los materiales más delgados. Esto se debe a que la pérdida de calor del plano de contacto con los electrodos es mayor con piezas de trabajo delgadas, lo cual resulta en un mayor calentamiento del electrodo que provoca un deterioro más rápido. Además, entre mayor sea la proporción del espesor de Zn con el espesor del acero, más efecto tiene el recubrimiento en la reducción de la vida del electrodo [36].

3.9.11 Contaminación superficial

La presencia de contaminantes superficiales, tales como escorias del baño de Zn, causan desgaste rápido en el electrodo, que puede ser causado por el calentamiento local no uniforme del electrodo en el punto de contacto causado por tales contaminantes [36].

3.9.12 Sensibilidad al tiempo de sostenimiento

La sensibilidad al tiempo de sostenimiento por lo general se manifiesta por la tendencia a que se presenten fallas interfaciales después de largos tiempos de sostenimiento durante la prueba de soldadura [36].

Gould, Lehman y Colmes [61] sugirieron que la susceptibilidad a la falla interfacial es debido a los siguientes factores: un estado de esfuerzos desventajoso de la soldadura, la presencia de rutas preferenciales de grietas en el núcleo y una microestructura susceptible. La presencia de rutas preferenciales de grietas, como la porosidad o grietas de solidificación, podrían permitir que se inicie una grieta en la superficie de contacto y propagarse desde una porosidad o grieta hacia otra a lo largo de la superficie de contacto de la soldadura. Una microestructura con gran cantidad de martensita puede producir fractura frágil por hendimiento.

La martensita se puede formar en los puntos de soldadura, aún a bajos contenidos de carbono. La dura martensita facilita una ruta para que la grieta se propague. Además, razones de enfriamiento rápido pueden conducir a que se quede atrapada alguna porosidad hacia las orillas externas de la soldadura donde se concentran los esfuerzos cuando se efectúan pruebas de desprendimiento.

También el enfriamiento rápido se ha asociado con la tendencia a que ocurra el agrietamiento por solidificación, que puede unirse a que se presente falla interfacial. Con tiempos cortos de sostenimiento puede permitírsele a la soldadura enfriarse a una razón más baja y así minimizar el agrietamiento.

La química del acero es un factor contribuyente a la sensibilidad. Adiciones de P, por lo general en aceros endurecidos por solución sólida, se asocian con la porosidad en el núcleo de soldadura solidificado. Se sabe que el C y el Mn ayudan a la formación de martensita en el enfriamiento.

El espesor del material puede alterar el modo de solidificación. Lentas razones de enfriamiento pueden reducir la tendencia al agrietamiento por solidificación además de reducir la formación de martensita. También tienden a cambiar de lugar porosidades lejos de la periferia del núcleo [41].

3.10 FORMACIÓN DEL PUNTO DE SOLDADURA

Conforme el núcleo del punto de soldadura crece, calienta el metal circundante. Durante la producción de un punto de soldadura, el material calentado experimenta varias etapas diferentes que incluyen la expansión, recristalización, transformaciones de estado sólido, deformación plástica, fundición, vaporización, solidificación y en ocasiones agrietamiento. El diagrama de la Figura 3.8 muestra una curva de resistencia dinámica donde se puede apreciar las diferentes etapas para la formación de los puntos de soldadura.

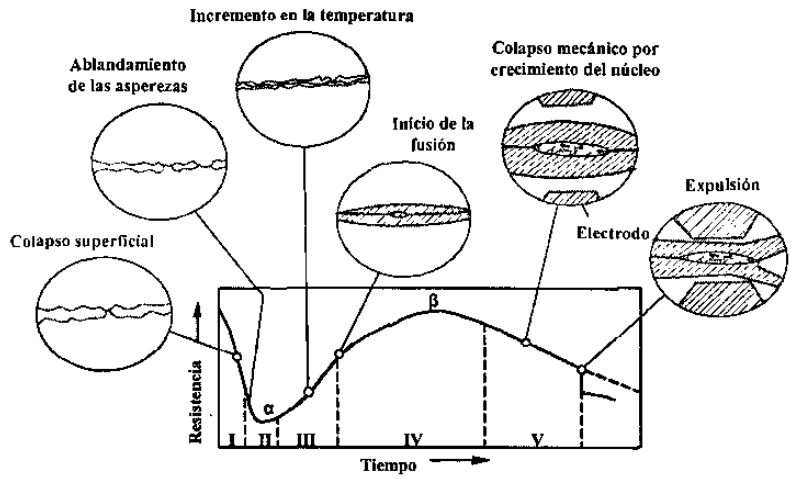

Figura 3.8 Curva de resistencia-tiempo en las etapas de formación del núcleo de soldadura [36].

Etapa I

Las piezas de trabajo hacen contacto debido a la fuerza de los electrodos. Esto crea áreas de contacto eléctrico en los puntos donde las asperezas de la superficie se tocan. Se aplica el voltaje entre los electrodos, causando el flujo de la corriente en los puntos de micro contacto. La resistencia inicial es muy alta debido a las posibles impurezas presentes en la superficie, por lo tanto la generación de calor inicial se concentrará en las superficies, sobre todo en el punto de contacto entre las piezas y los electrodos, este calor causará que los contaminantes colapsen y provoquen una caída en la resistencia.

Etapa II

Después que los contaminantes colapsan se presenta el contacto metal-metal. Sin embargo la resistencia en la superficie sigue siendo relativamente alta debido al área limitada para el flujo de la corriente proporcionada por los contactos de las asperezas. Conforme el calor aumenta las asperezas se suavizan y el área de contacto se incrementa causando que la resistencia disminuya. Al mismo tiempo, el incremento en temperatura provoca que la resistividad aumente provocando un efecto opuesto. La competencia entre estos dos mecanismos determina si la resistencia se incrementa o disminuye, y entonces determina la posición del mínimo α. Eventualmente el incremento en el área de contacto será superado por el efecto del aumento en la temperatura y la resistencia total comenzará a elevarse.

Etapa III

Durante este período el aumento en la resistividad debido al incremento en temperatura domina la curva de resistencia. El término de esta etapa debería corresponder a la fusión local que empieza a ocurrir en el contacto de las asperezas.

Etapa IV

La compresión de las piezas de trabajo continúa con el incremento en la temperatura, causando que la resistencia y la resistividad aumenten. Pero el calor que se genera también causa derretimiento adicional que ocurre en las superficies, acrecentando el tamaño de la región derretida y el área transversal disponible para el flujo de corriente. Este mecanismo origina que la resistencia se reduzca. También la creciente suavización puede provocar un colapso mecánico, acortando el camino para el flujo de corriente y bajando la resistencia. El pico β se debe a la estabilización de la temperatura, mientras que el crecimiento del núcleo y el colapso mecánico empiezan a dominar y de esta manera la resistencia comienza a aminorarse.

Etapa V

Más allá del pico β, el crecimiento del núcleo líquido y el colapso mecánico continúan. Si el núcleo crece a un tamaño tal que no puede ser contenido por el metal sólido circundante bajo la compresión de los electrodos la expulsión puede ocurrir [36].

3.11 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas de un punto de soldadura dependen principalmente de:

- El tamaño y dureza del núcleo de soldadura.
- La profundidad de la impresión del electrodo en la superficie de la soldadura, lo que ocasiona el adelgazamiento del núcleo.
- La microestructura de la zona afectada por el calor (HAZ), la cual domina su resistencia y ductilidad.

Sin embargo, la resistencia de un punto de soldadura es competitiva en naturaleza entre la capacidad de resistir la carga del núcleo y la del HAZ. Para alcanzar una resistencia máxima, un punto de soldadura debe tener un tamaño de núcleo suficiente para proporcionar mayor resistencia a la fractura comparada con la de la zona afectada por el calor. Existen posibilidades de formar martensita revenida en la región externa del HAZ, ésta martensita puede debilitar la región. El incremento en la energía de entrada engruesa la ferrita acicular que puede formarse en la soldadura y de esta forma debilita la región [42].

3.12 MODO DE FRACTURA

Investigadores como Gould, Workman [62], Ferrasse, Verrier y Messemaecker [63] han demostrado que el agrietamiento puede ser una combinación de modos de fractura dúctil y frágil. La grieta se inicia en la superficie de contacto de las láminas que se sueldan. De

ahí se propaga a través del núcleo siguiendo una trayectoria de las fases frágiles y duras como la martensita o siguiendo una trayectoria de una porosidad [41].

3.13 DEFECTOS EN LA SOLDADURA

Los tipos de defectos o discontinuidades que pueden encontrarse en la soldadura por resistencia son los siguientes:

- **Porosidades.-** Discontinuidad tipo cavidad que se forma por gas atrapado durante la solidificación. La porosidad por lo general es encontrada en la línea central del núcleo de fusión. Puede ser causada por el sobrecalentamiento, presión inapropiada, liberación prematura de la presión o aplicación tardía de presión.
- **Falta de fusión.-** Condición donde la fusión no es completada. Se manifiesta como una cavidad en la línea central de fusión. Es causada por las mismas condiciones que las porosidades.
- **Falta de penetración.-** Condición en la cual la penetración en la unión es menor que la especificada.
- **Huecos por encogimiento.-** Discontinuidad tipo cavidad que se forma normalmente por el encogimiento durante la solidificación.
- **Grietas.-** Discontinuidad tipo fractura que se caracteriza por una punta afilada y una alta razón de longitud/ancho al desplazamiento de apertura. Las grietas pueden ser inducidas por sobrecalentamiento, por remover la presión antes de que el enfriamiento de la soldadura sea completado, carga inapropiada, traslape de unión pobre o la expulsión del exceso de metal de la soldadura.
- **Fisuras.-** Pequeñas discontinuidades parecidas a las grietas con solo una diminuta separación (desplazamiento de apertura) de la superficie fracturada.

La apariencia de la soldadura en la superficie debe ser uniforme en la forma y relativamente lisa y debe estar libre de fusión superficial, indentaciones profundas de los

electrodos, incrustaciones del electrodo, agujeros, grietas, separación entre láminas y coloración anormal alrededor de la soldadura. Sin embargo, la apariencia superficial no siempre es un buen indicador de la calidad de la soldadura, ya que la desviación de corriente y causas de insuficiente calentamiento o penetración incompleta no dejan efectos visibles en la pieza de trabajo [35].

3.14 EFECTOS DE ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN LA SOLDADURA

Azufre (S)

Debe mantenerse debajo de 0.035% y no sobrepasar 0.05%, arriba de esta cantidad el metal tiende a exhibir fragilidad en caliente, lo que ocasiona grietas en la soldadura y en la zona afectada por el calor, debido a que no tiene la suficiente resistencia a altas temperaturas para soportar los esfuerzos a los que se somete durante el enfriamiento.

Carbono (C)

Si la concentración de C no excede del 0.2% virtualmente no tiene efecto en la soldadura. El incremento del contenido de C promueve la formación de productos de transformación de bajas temperaturas [35, 37].

Cobalto (Co)

Las aleaciones con Co son soldables, pero debido a su alta tenacidad y resistencia requieren de grandes fuerzas de soldadura

Cromo (Cr)

Utilizado para incrementar resistencia a la abrasión, desgaste y corrosión además de endurecer el acero y sus efectos en la soldadura son iguales a los del Ni.

Fósforo (P)

Se considera una impureza y no tiene un efecto beneficial en la soldadura, por lo que su concentración se debe mantener lo más bajo posible. Por encima de 0.04% tiende a hacer las soldaduras frágiles y causa grietas.

Manganeso (Mn)

En concentraciones hasta 1% no tiene efecto en la soldadura, del 1-2% afecta de tal modo que las variables del proceso deben tener un mejor control, por encima del 2% todavía es soldable, pero se deben elaborar programas de soldadura y tratamientos térmicos.

Molibdeno (Mo)

Como en el caso del Ni, para soldar se requieren elevadas fuerzas de soldadura, debido a que el Mo proporciona endurecimiento al acero.

Níquel (Ni)

Tiene mínimo efecto en las operaciones de soldadura por resistencia, ya que es soldable en todas las concentraciones. Debido a que la adición de este elemento aumenta la dureza o tenacidad de una aleación, por consecuencia las presiones de soldadura deben ser incrementadas.

Silicio (Si)

Hasta 0.35% no causa efecto alguno, cuando se usa en más altos porcentajes (1-3%) no es soldable [37].

3.15 ESTÁNDARES DE CALIDAD

Existen tres diferentes tipos de estándares identificados en la literatura, los cuales son:

1. **Práctica recomendada.-** Han sido establecidos para la soldadura de aceros por la American Welding Society (AWS) [64] y la Resistance Welding Manufacturer´s Association (RWMA) [65, 66]. En la práctica recomendada se establecen parámetros de soldadura recomendados para aceros de bajo carbono, los cuales varían con los espesores de las partes que se van a soldar.

2. **Proceso de estándar.-** Es utilizado para asegurar la calidad de la producción en línea de soldadura por puntos.

3. **Procedimiento de calificación del punto de soldadura.-** Se usa para valorar la soldadura de un material para inclusión o exclusión de éste de una lista de proveedores calificados de un material particular. Estos procesos son utilizados por Ford Motor Company, Fisher Body Division of GMC y Chrysler Corporation para calificar a los proveedores de material. Cada compañía tiene especificaciones para materiales recubiertos y no recubiertos [36].

3.16 FACTOR ECONÓMICO

La característica de la soldadura por resistencia eléctrica que tiene gran significado económico es la rápida velocidad de operación. Los puntos de soldadura individuales por lo general se efectúan en fracciones de segundos, así que las tasas de producción son determinadas por el tiempo que se requiere para alimentar la pieza de trabajo en el proceso y removerla después que se ha completado la soldadura. En el caso de la mayoría de las aplicaciones, ningún otro proceso puede cumplir tal operación en tan poco período de tiempo.