

CAPITULO II

EL ACERO ESTRUCTURAL

2.1. FABRICACIÓN DEL ACERO

El acero se obtiene de la naturaleza, su principal componente es el hierro, el cual no se encuentra en estado puro, sino con unos componentes denominados mineral de hierro. Para llegar al acero, en la calidad que lo conocemos en el mercado, se siguen varios pasos; primeramente se mezclan los minerales de hierro con carbón de coque y piedra caliza y se someten a temperaturas elevadas de aproximadamente 3,000°C. Una vez que se encuentre en fusión, se le inyecta aire con el propósito de que se reduzcan los óxidos de hierro. El proceso ocurre en los altos hornos, que son enormes torres cilíndricas de más de 60 mts. de altura, con un diámetro principal de 6 a 9 mts. Existen otros procesos para tratar el mineral, pero ninguno ha sido capaz de competir con el alto horno de coque, en costo y eficiencia. El coque, la clave del éxito en el proceso de alto horno, es el combustible que da el calor necesario para fundir el mineral; proporciona el carbono, agente reductor que se combina con el oxígeno y los separa. Debido a que es un mineral duro y poroso, una columna central de coque parcialmente quemado, es capaz de soportar el peso de cientos de toneladas de carga que presionan sobre la base del alto horno.

Los materiales, o sea mineral de hierro, coque o piedra caliza, se cargan por la parte superior del horno y poco a poco desciende a través de zonas cada vez más calientes. Una corriente de aire caliente, a menudo enriquecida de oxígeno, es inyectada al alto horno a través de aberturas hechas cerca de la base.

El oxígeno, hace que el combustible arda y se combine con parte del carbono del coque, para formar monóxido de carbono, éste a su vez, actúa sobre el mineral de hierro, para producir hierro metálico y bióxido de carbono, aumentando la intensidad del calor durante el proceso. El hierro fundido se acumula en la base del horno.

El mineral de hierro, contiene una cantidad considerable de impurezas terrosas que también entran al horno y deben ser separadas como escoria. Esto se lleva a cabo mediante el uso de la piedra caliza, que es como se mencionó anteriormente, parte de la mezcla original; ésta es convertida en cal por el intenso calor, y forma una escoria con la mayor parte de las impurezas que se escurren, hasta quedar flotando sobre el hierro fundido, que es más pesado.

El hierro convertido en hierro colado (también llamado arrabio o hierro de primera fusión), es recogido en la base del horno cada 5 o 6 horas, en purgas de 150 a 350 toneladas y trasladado para su posterior tratamiento. La escoria es recogida con más frecuencia y llevada al horno como desperdicio; sin embargo, la industria puede utilizar gran cantidad de esta escoria en lugar de grava, para la elaboración de concreto, o transformándola en mineral aislante. La operación del alto horno es continua, el mineral de hierro, el coque y la piedra caliza son vertidos sin interrupción por la parte superior y escurren por el horno a razón de 4 a 5 mts. por hora, y el hierro colado y escoria salen por la base.

El hierro colado o arrabio, es un metal que contiene entre el 90 y el 95% de hierro, pero que aún tiene una cierta cantidad de impurezas, entre ellas aproximadamente un 4% de carbón, 1% de manganeso y cantidades menores de silicio, azufre y fósforo. Este mineral es poco apropiado para fines estructurales debido a su alta fragilidad.

Para eliminar la mayor cantidad posible de impurezas, el hierro colado es llevado a otro lugar, aún fundido, para ser purificado en hornos de reverbero, el método más común es el *Siemens-Martin* o de hogar abierto, en el que se emplea un recipiente inclinado llamado convertidor y sistemas a base de hornos eléctricos. Son en realidad pilas u hogares poco profundos, de alrededor de 30 mts. de largo por 8 mts. de ancho, donde se deposita el metal hasta una altura de 60 a 80 cms. El hierro constituye sólo una parte de la carga. Hay además, piedra caliza para separar las impurezas y formar la escoria, mineral de hierro que puede constituir del 2 al 20% de la carga, y chatarra de

acero que puede llegar hasta casi la mitad de la carga. Estos materiales sólidos, son sometidos a temperaturas de 1600°C durante casi dos horas, para fundirlos parcialmente, y luego se les añade el hierro colado fundido hasta reverbero. El exceso de carbón es separado por su combinación con el oxígeno del mineral de hierro y las impurezas son absorbidas por la escoria.

Todo el proceso es sometido a una constante observación, de manera que puede controlarse la composición de la mezcla. Transcurridas unas diez horas, la carga ya queda convertida en acero fundido, y puede verterse el acero en moldes de 5 a 25 toneladas de capacidad, para solidificarse en lingotes. Este es el acero ordinario al carbono. Si este acero no se requiere para laminar perfiles estructurales, sino que se piensa destinar a otros elementos específicos, tales como barcos, aviones, tuberías, etc., se hace necesario añadir cantidades determinadas de ciertos elementos de aleación como cromo, níquel, o tungsteno, dándonos por resultado, aceros con propiedades diferentes al acero de carbón.

2.2. PROPIEDADES DEL ACERO

Se presentan aquí las principales propiedades mecánicas del acero, ya que éstas son de gran importancia en el comportamiento de un miembro estructural. Estas, a su vez, dependen principalmente, de la composición química de los mismos, los procesos de laminado y el tratamiento térmico a que estén sometidos. Si se considera que las propiedades mecánicas se obtienen como resultados de pruebas de laboratorio en los diferentes aceros, se deberán tomar en cuenta otros factores que afectan esas propiedades, tales como la rapidez de carga de la muestra, las condiciones y la geometría de las mismas, el trabajo en frío, y la temperatura existente al llevarse a cabo la prueba.

Es usual en los aceros, someter el espécimen de prueba a una carga de tensión y se supone que para todos los fines prácticos, el comportamiento a compresión es similar;

siempre y cuando la esbeltez del espécimen sea lo suficientemente pequeña para que no ocurra el pandeo antes de que alcance su resistencia. Sin embargo, en virtud que resulta más sencilla efectuar la prueba de tensión, la mayoría de las propiedades mecánicas, se toman de una gráfica esfuerzo-deformación a tensión.

Un diagrama típico de esfuerzo-deformación de un acero estructural al carbono (véase la figura 2.2.1) se caracteriza por la existencia de una zona inicial en la que los esfuerzos y deformaciones están relacionados entre sí linealmente, seguida por la llamada región plástica, donde tienen lugar deformaciones considerables a esfuerzos constantes, y termina en una región de endurecimiento por deformación, en el cual un incremento de deformación es nuevamente acompañado por un incremento de esfuerzo, hasta llegar finalmente a la ruptura.

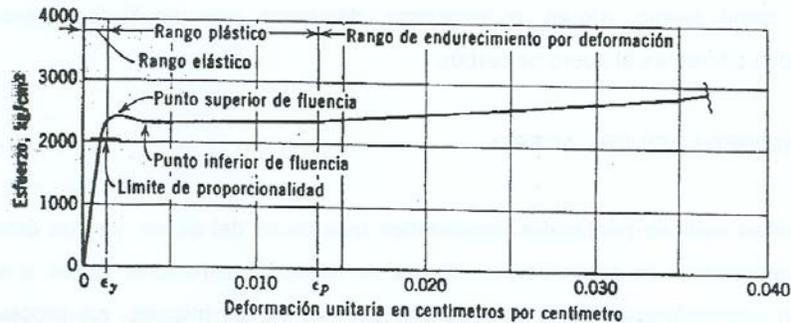


Figura 2.2.1 Diagrama esfuerzo-deformación característico de un acero con bajo contenido de carbono.

La deformación unitaria plástica ϵ_p que precede al endurecimiento por deformación es de diez a veinte veces mayor que la deformación unitaria correspondiente a la iniciación del flujo plástico, ϵ_y , por lo tanto, un miembro que desarrolle está deformación plástica sufrirá grandes deformaciones antes de fallar.

En la figura 2.2.1 se indica una porción del diagrama esfuerzo-deformación, hasta el punto en que se indica el endurecimiento por deformación, la cual es aplicable para todos los aceros de la construcción que tienen un punto de fluencia bien definido.

A continuación se definirán las propiedades mecánicas que caracterizan a los aceros.

2.2.1. Elasticidad

Es la propiedad que tiene los cuerpos de recuperar tamaño y forma después de la deformación. Si el material se somete a la acción de una carga, sufrirá una deformación. Si al eliminar la carga, el material vuelve a su forma y tamaño original, se habrá producido en el una deformación elástica. Al esfuerzo se le llama elástico, cuando se produce dentro del intervalo elástico

2.2.2. Límite de elasticidad

Es el esfuerzo máximo uniaxial que se puede aplicar a un material sin causarle ninguna deformación permanente. El intervalo elástico es aquel donde los esfuerzos son menores que el límite elástico.

En un cuerpo elástico, no se requiere que la carga y la deformación sean linealmente proporcionales dentro del intervalo de la elasticidad. Por lo general, esto sí ocurre dentro de la mayor parte de las gráficas de esfuerzo deformación, pero la linealidad no es una condición necesaria para que un material sea elástico. Muchos materiales de ingeniería se comportan como lo indica la figura 2.2.2a y 2.2.2b, aún así, muchos lo hacen como se muestra en la figura 2.2.2 c, cuando trabajan en intervalos elásticos.

Es frecuente que un diseñador hable del límite de elasticidad al referirse más bien al límite de proporcionalidad. Esto ocurre, porque en la mayor parte de los materiales empleados en ingeniería, los esfuerzos correspondientes a los límites de elasticidad y de

proporcionalidad son aproximadamente iguales. No debe de olvidarse, que el límite de proporcionalidad, en virtud de su propia definición, debe de obtenerse a partir de la gráfica esfuerzo-deformación, pero el límite de elasticidad, no puede ser obtenido con precisión de tal gráfica solamente. Si se desea mayor precisión el límite elástico se puede determinar en base a un ensayo de laboratorio.

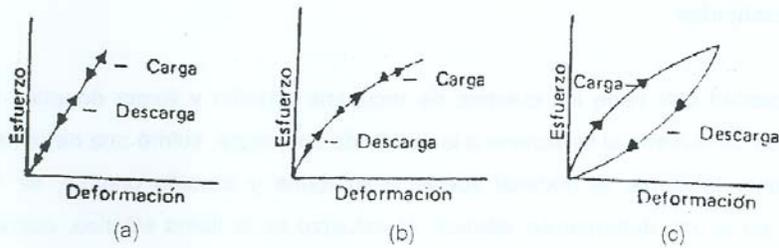


Figura 2.2.2 Comportamientos en diferentes material utilizados para la construcción

2.2.3. Plasticidad

Es una propiedad contraria a la elasticidad, ya que permite a los cuerpos conservar la deformación después de suprimir la carga.

2.2.4. Límite de fluencia

Es el esfuerzo a partir del cual el material presenta un gran incremento en sus deformaciones, sin existir incrementos correspondientes en el esfuerzo. Este punto se localiza en un diagrama de esfuerzo-deformación, en donde al trazar una tangente a dicha curva, ésta quedaría en posición horizontal.

La forma de definir el límite de fluencia, es diferente según la clase de acero. En la mayoría de los aceros laminados en caliente, el límite de fluencia está claramente definido, y en ellos se puede apreciar un límite superior y un límite inferior (ver figura 2.2.1). Sin embargo, existen aceros en los cuales sólo hay un límite de fluencia, y en los

aceros forjados en frío, no existe un límite de fluencia convencional, sino que se fija donde la curva esfuerzo-deformación cambia de pendiente en forma considerable. El límite inferior de fluencia, es el que aparece en las especificaciones de diseño de los aceros.

2.2.5. Módulo de elasticidad

Se define Módulo de Elasticidad, a la relación del esfuerzo y a la deformación en la región elástica inicial de la curva esfuerzo-deformación. Se determina este valor por medio de la pendiente de dicha porción elástica del diagrama. Por consiguiente, el módulo de elasticidad puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$E = \sigma_e / \epsilon \quad 2.2.1$$

En la mayoría de los materiales estructurales, el valor de "E" es el mismo en tensión que en compresión.

2.2.6. Módulo de cortante

Se representa por "G" y se le denomina también como módulo de elasticidad al esfuerzo cortante o módulo de rigidez; éste valor lo obtenemos a partir de una de las constantes elásticas denominada relación de Poisson (μ) y esta dado por la siguiente expresión:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad 2.2.2$$

2.2.7. Resistencia al impacto

La resistencia al impacto es una medida para determinar la capacidad que tiene un acero de absorber una cantidad de energía, al hacerle aplicaciones de cargas rápidas.

Una medida confiable de la resistencia al impacto se puede obtener a través de la tenacidad. La tenacidad es la habilidad del acero para soportar cargas que produzcan fractura. Un material tenaz es definido en función de la resistencia a la propagación inestable de una fractura en presencia de una muesca.

Para tensión uniaxial, la tenacidad puede ser expresada como el área total bajo la curva del diagrama esfuerzo-deformación fuera del punto de fractura donde termina el diagrama. Pero, en general, es muy difícil encontrar un elemento en una estructura con solo esfuerzos uniaxiales de tensión requiriéndose un método numérico más complejo para determinar la tenacidad de un material.

Sin embargo, existe una medida para determinar el grado de tenacidad para un metal antes de que inicie la propagación de una grieta; este es a través de la prueba de *Charpy* de muesca en "V". En esta prueba, una pequeña barra rectangular de dimensiones estandarizadas y una muesca en forma de "V" al centro de la barra es apoyada libremente en sus extremos (Simplemente apoyada) y fracturada por medio de un péndulo que se suelta desde una altura ya establecida. La cantidad de energía requerida para fracturar al espécimen se calcula a partir de la altura alcanzada por el péndulo después de romperlo. Se determinan las cantidades de energía requeridas para romper especímenes iguales a distintas temperaturas dentro de un rango determinado, y se traza una gráfica como la que se ilustra en la figura 2.2.3 y en ella se ve la transición del comportamiento dúctil y frágil.

El valor de 207 kg-cm (15 pies-libras) de energía se ha aceptado como referencia para evaluar al material, mientras que el punto "A" es el punto de transición de la temperatura.

Desde el punto de vista del diseño, mientras más baja sea la temperatura de transición, mejor será la clasificación del acero para resistir cargas de impacto. La temperatura de transición varía con el espesor del material, razón por la cual deberá

tenerse especial cuidado en la selección del espesor adecuado para evaluar la tenacidad del material.

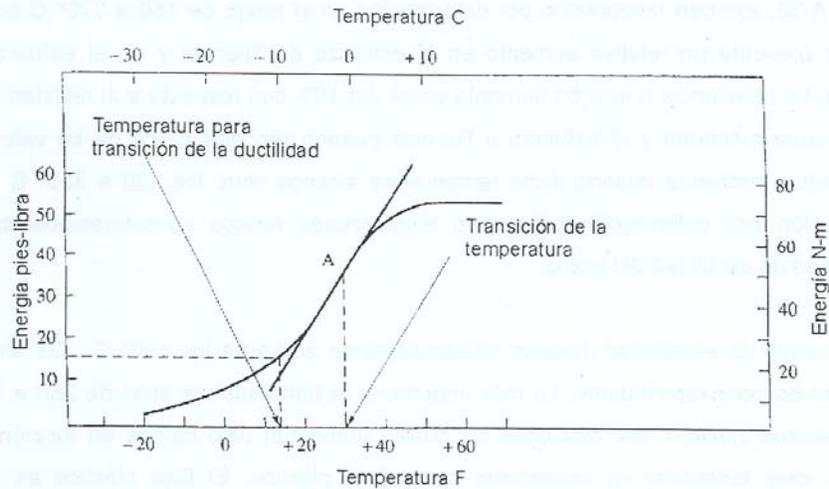


Figura 2.2.3 Curva de la transición de temperatura para acero al carbono obtenida de la prueba *Charpy*

2.3. FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DEL ACERO

2.3.1. Comportamiento a altas temperaturas

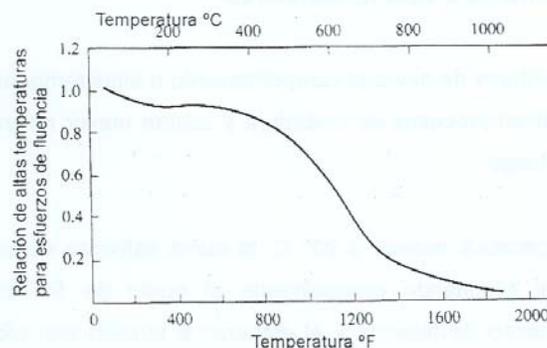
En diseño de estructuras de acero el comportamiento a altas temperaturas es de interés cuando se especifican procesos de soldadura y cobran mayor relevancia en presencia de los efectos del fuego.

Cuando la temperatura excede a 93°C , la curva esfuerzo deformación empieza a volverse no lineal eliminando gradualmente el punto de fluencia. El módulo de elasticidad, el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo a tensión son reducidos cuando se incrementa la temperatura. En el rango de 430 a 540°C es donde la velocidad de la tasa de decrecimiento es mayor. Aunque cada acero, debido a la variación en la estructura

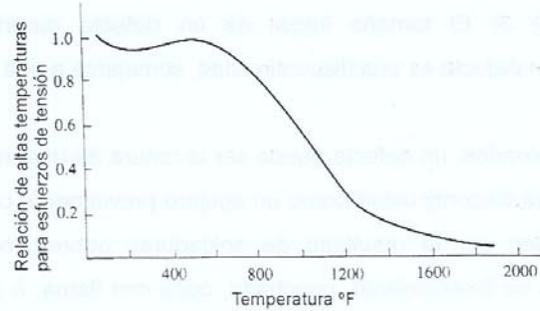
química y micro estructura se comportan diferente, las relaciones generales son vistas en la figura 2.3.1. Aceros con porcentajes de carbono relativamente alto, como el acero ASTM A-36, exhiben maduración por deformación en el rango de 150 a 370° C por lo que se presenta un relativo aumento en el esfuerzo de fluencia y en el esfuerzo a tensión. La resistencia a tensión aumenta cerca del 10% con respecto a la resistencia a temperatura ambiente y el esfuerzo a fluencia pueden recobrar cerca de su valor de temperatura ambiente cuando dicha temperatura alcance entre los 260 a 320° C . La maduración por deformación bajo altas temperaturas reduce considerablemente la capacidad de ductilidad del acero.

El módulo de elasticidad decrece moderadamente arriba de los 540° C . De ahí en adelante decrece rápidamente. Lo más importante, a temperaturas altas de 260 a 320° C los aceros exhiben deformaciones las cuales aumentan bajo cargas en función del tiempo; este fenómeno es reconocido como flujo plástico. El flujo plástico es bien conocido en estructuras de concreto y en el acero no ocurre bajo temperatura ambiente.

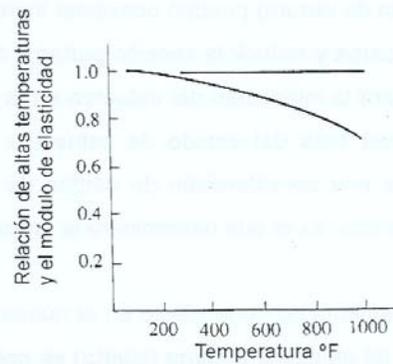
Otros efectos de alta temperatura son: a) incremento de la tenacidad de 65 a 95° C. b) incremento en la fragilidad por cambios metalúrgicos. c) la resistencia a la corrosión de los aceros estructurales se incrementa para temperaturas alrededor de 540° C .



a) Porcentaje de altas temperaturas en esfuerzos de fluencia



b) Porcentaje de altas temperaturas en esfuerzos de tensión



c) Típico efecto de altas temperaturas en el módulo de elasticidad

Figura 2.3.1 Típicos efectos de altas temperaturas en las propiedades de aceros estructurales y la curva esfuerzo deformación.

2.3.2. Resistencia a la fatiga

Los patrones repetitivos de carga y de descarga (primordialmente a tensión) pueden eventualmente resultar en la falla por fatiga, aun cuando el esfuerzo de fluencia no sea excedido. El término de fatiga significa falla bajo la acción de cargas cíclicas. Esta es una falla progresiva, donde se presentan propagaciones inestables de grietas. La resistencia a la fatiga es gobernada por tres variables: 1) El número de ciclos de las cargas, 2) El rango de esfuerzos por cargas de servicios (la diferencia entre el esfuerzo

máximo y mínimo) 3) El tamaño inicial de un defecto durante el proceso de manufacturación. Un defecto es una discontinuidad, semejante a una grieta pequeña.

En ensambles soldados, un defecto puede ser la ranura de una intercepción entre de dos elementos o una discontinuidad como un agujero previamente cortado de una viga. Los defectos pueden ser el resultado de soldaduras pobremente hechas, bordes rugosos resultantes de sisallamiento, punchado, corte con flama, ó pequeños agujeros. Tales desperfectos pueden ser no relevantes; sin embargo, el defecto sometido a muchos ciclos de carga (efecto de ranura) pueden ocasionar incrementos en longitud de una grieta con cada ciclo de carga y reducir la sección portante de la carga, con lo que consecuentemente incrementará la intensidad del esfuerzo en la parte no agrietada. La resistencia a la fatiga depende más del estado de esfuerzos que de la resistencia estática. La fatiga siempre es una consideración de cargas de servicio. El estado de esfuerzo real por cargas de servicio es el que determinará la propagación de grieta.

El grado del acero aparentemente no tiene efecto en el número de ciclos a la falla, y el efecto de esfuerzo mínimo (el atribuible a carga muerta) es considerado despreciable para fines de diseño. Sin embargo, la geometría del espécimen, incluyendo la condición de la superficie y la sanidad interna de la soldadura tienen un efecto considerable. Estos factores están reflejados en las reglas del código de soldadura estructural (AWS) para el diseño de estructuras soldadas.

Las especificaciones AISC en LRFD-Apéndice K3 y ASD-Apéndice K4 prescriben que el efecto de la fatiga puede ser despreciada para menos de 20,000 ciclos, que representa aproximadamente dos aplicaciones diarias durante 25 años. Como la mayoría de las cargas en edificios coinciden con esta categoría, generalmente no se considera la fatiga. La excepción son las trabes carril para grúas viajeras y las estructuras soportantes de maquinarias. En el diseño de puentes para carreteras la fatiga siempre es considerada, para los cuales son esperados en exceso de los 100,000 ciclos por cargas.

2.3.3. Resistencia a la corrosión

Desde los primeros usos del acero, una desventaja importante era que requería ser pintado para prevenir el deterioro del metal debido a la corrosión. Los aceros al carbono de baja resistencia eran más baratos pero muy vulnerables a la corrosión. La resistencia a la corrosión puede mejorarse mediante la adición de cobre como un elemento de aleación, Sin embargo, los aceros con aleación de cobre son demasiado costoso para el uso general.

Los aceros de alta resistencia y baja aleación son varias veces más resistentes a la corrosión que el acero estructural al carbono, con o sin la adición del cobre, como se muestra en la figura 2.3.2. Los aceros de alta resistencia y baja aleación no se deterioran tan severamente como los aceros al carbono y el óxido que forman se convierten en un recubrimiento protector para prevenir un mayor deterioro. Con ciertos elementos de aleación, los aceros de alta resistencia y baja aleación desarrollan un recubrimiento protector de óxido que es agradable en apariencia. Estos aceros que se utilizan sin pintura son llamados aceros intemperizados.

Como puede ser esperado, las propiedades anticorrosivas del acero, incluyendo los aceros intemperizados, dependen de su composición química, el grado de contaminación en la atmósfera, y la frecuencia del ataque cíclico de humedad y secado .

Desde sus primeros usos en 1958 para el centro administrativo *Deere and Company en Moline Illinois*, el uso de aceros intemperizados a recibido una considerable atención. Al inicio, tales aceros eran especificados bajo las normas ASTM A242.

Con la adopción de los aceros A588 en 1969 y A709 en 1975, el acero A242 esta ahora esencialmente obsoleto. El acero A588 es generalmente usado como acero resistente a los ataques atmosféricos en edificios y el acero A709 grado 50W y 100W como aceros intemperizados en puentes (Ver tabla 2.1.).

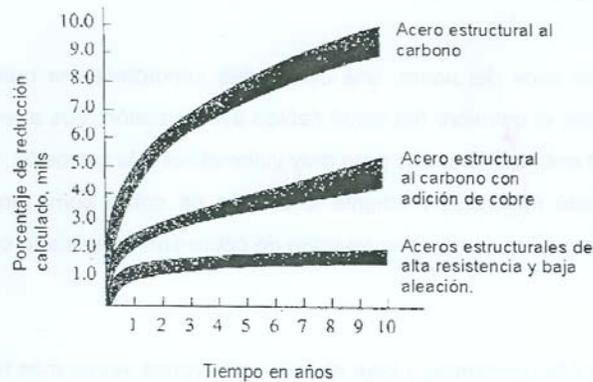


Figura 2.3.2 Comparación de la corrosión en aceros al intemperismo atmosférico.

Las áreas sombreadas indican El rango individual del espécimen.

La fabricación y montaje de los aceros intemperizados requieren cuidado. Muecas insignificantes, rayones y filos dentados deberán de prevenirse. La acción de pintarlos, incluyendo las marcas para identificación deberán de minimizarse, y todas las marcas deberán de ser removidas después de completar el montaje. Las escamas y la decoloración debido a la acciones de soldadura también deberán ser removidas. El gasto extra resultante de la fabricación y el montaje es diferido por la eliminación de la pintura durante la vida útil de la estructura.

Se recomiendan los siguientes lineamientos para el uso óptimo de aceros intemperizado:

- 1) Para un óptimo desempeño en la condición sin pintura, la estructura deberá estar altamente expuesta a los elementos naturales.
- 2) El desarrollo de la capa de óxido protector se obtiene mejor bajo exposición normal, incluyendo las superficies que están húmedas en la noche por la formación de brisa y secas durante las horas de luz diaria.

- 3) El ciclo de humedecimiento y secado no puede ocurrir cuando el acero esta enterrado en el suelo o inmerso en agua, el óxido protector no se formará y el desempeño se asemejará al del acero dulce al carbono expuesto a las mismas condiciones.

Tabla 2.1 Propiedades de aceros usados para la construcción

| Designación ASTM | F _y Mínimo esfuerzo a la fluencia Kg/cm ² | F _u Esfuerzo último Kg/cm ² | Máximo espesor para placas (mm) | Tipo de acero |
|--|---|--|---|------------------|
| A36 | 2249.824 2531.05 | 4077.81-5624.56 4077.81-5624.56 | 4077.81- 5624.56 4077.81- 5624.56 | C |
| A53 Grado B | 2460.74 | 4218.42 | | C |
| A242 | 2952.89 3234.12 3515.35 | 4429.34 4710.57 4921.49 | De 40 hasta 200 De 20 hasta 40 Hasta 20 | HS-LA |
| A441 Descontinuado en 1989; Reemplazado por A572 | | | | HS-LA |
| A500 Grado A | 2320.13 | 31363.81 | Redondos | C |
| Grado B | 2952.89 | 4077.81 | Redondos | |
| Grado C | 3234.12 | 4359.03 | Redondos | |
| Grado A | 2741.97 | 3163.81 | Laminados | C |
| Grado B | 3234.12 | 4077.81 | Laminados | |
| Grado C | 3515.35 | 4359.03 | Laminados | |
| A501 | 2531.05 | 4077.81 | | C |
| A514 | 6327.63 7030.70 | 7030.70-9139.91 7030.70-9139.91 | De 65 hasta 150 Hasta 65 | A |
| A529 | 2952.89 | 4215.42-5976.09 | Hasta 13 | C |
| A570 Grado 40 | 2812.28 | 3866.88 | | C |
| Grado 45 | 3163.81 | 4218.42 | | |
| Grado 50 | 3515.35 | 4596.95 | | |

Tabla 2.1 Continuación

| Designación ASTM | F _y Mínimo esfuerzo a la fluencia Kg/cm ² | F _u Esfuerzo último Kg/cm ² | Máximo espesor para placas (mm) | Tipo de acero |
|--|---|--|---------------------------------------|------------------|
| A572 Grado 42 | 2952.89 | 4218.42 | Hasta 150 | HS-LA |
| Grado 50 | 3515.35 | 4569.95 | Hasta 100 | |
| Grado 60 | 4218.42 | 5273.02 | Hasta 32 | |
| Grado 65 | 4569.95 | 5624.56 | Hasta 32 | |
| A588 | 2952.89 | 4429.34 | De 125 hasta 200 De 100 | HS-LA |
| | 3234.12 | 4710.57 | hasta 125 | |
| | 3515.35 | 4921.49 | Hasta 100 | |
| A606 | 3163.81 | 4569.95 | | HS-LA |
| | 3515.35 | 4921.49 | | |
| A607 Grado 45 | 3163.81 | 4218.42 | | HS-LA |
| Grado 50 | 3515.35 | 4569.95 | | |
| Grado55 | 3866.88 | 4921.49 | | |
| Grado60 | 4218.42 | 5273.02 | | |
| Grado65 | 4569.95 | 5624.56 | | |
| Grado 70 | 4921.49 | 5976.09 | | |
| A611 Grado C | 2320.13 | 3374.74 | | C |
| Grado D | 2812.28 | 3655.96 | | |
| Grado E | 5624.56 | 5765.17 | | |
| A618 Grado I,II | 3515.35 | 4921.49 | Hasta 20 | HS-LA |
| Grado III | 31515.35 | 4569.95 | | |
| A709 Grado 36 | 2531.05 | 4077.81-5624.56 | Hasta 100 | C |
| Grado 50 | 3515.35 | 4569.95 | Hasta 100 | H-S,LA |
| Grado50w | 3515.35 | 4921.49 | Hasta 100 | H-S,LA |
| Grado100 y 100w | 6327.63 | 7030.70-9139.91 | De 64 hasta 102 | A |
| Grado100 y 100w | 7030.70 | 7733.77-9139.91 | Hasta 64 | A |
| C aceros al carbono | | | | |
| HS-LA aceros de alta resistencia y baja aleación | | | | |
| A aceros de baja aleación | | | | |

2.3.4. Laminado en frío y endurecimiento por deformación

Después de que la deformación en el inicio de la fluencia ($\varepsilon_y = F_y/E_s$) se ha excedido apreciablemente, y el espécimen es descargado, la recarga puede generar una relación de esfuerzo deformación diferente a lo observado durante la carga inicial. La carga y descarga elástica no produce deformación residual; sin embargo, las cargas iniciales mayores al del punto de fluencia, tal como el punto A de la figura 2.3.3, resultará al descargarse una deformación indicada en el punto B. Cuando se ha producido una deformación permanente (indicado como el punto B), la capacidad de ductilidad se reducirá desde una deformación OF a una deformación BF. La acción de recarga exhibe un comportamiento como si el origen de la curva esfuerzo deformación fuera el punto B; La zona plástica antes del endurecimiento por deformación también se habrá reducido.

Cuando la carga ha ocurrido hasta alcanzar el punto C, la descarga seguirá la línea punteada mostrada hasta el punto D. El origen para una nueva recarga será el punto D. La mayor longitud de la línea CD indica que el punto de fluencia se ha incrementado. El incremento al punto de fluencia es referido como un efecto de endurecimiento por deformación; la ductilidad restante al aplicar carga cuando la deformación está en el punto D es menor de su valor original. El proceso de carga más allá del rango elástico causará un cambio en la ductilidad disponible; cuando esto es hecho a temperatura ambiente es conocido como trabajo en frío.

Cuando los perfiles estructurales son laminados en frío con placas a temperatura ambiente, se presentan deformaciones inelásticas en los puntos de doblez. El trabajar en frío dentro del rango de endurecimiento por deformación incrementa el esfuerzo de fluencia debido a los puntos de doblez. Para el diseño de miembros estructurales laminados en frío sujetos a un proceso de carga y descarga durante un período de tiempo, el acero a adquirido diferentes propiedades y se ven representada por los puntos D, C y E de la figura 2.3.3, en ella se ve una considerable reducción de ductilidad en el acero. Este fenómeno es conocido como maduración por deformación.

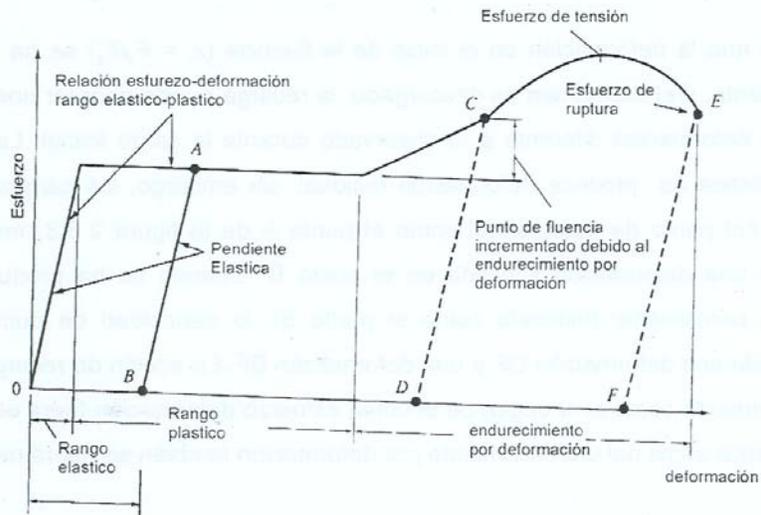


Figura 2.3.3 Efectos en las deformaciones producidas por carga y descarga.

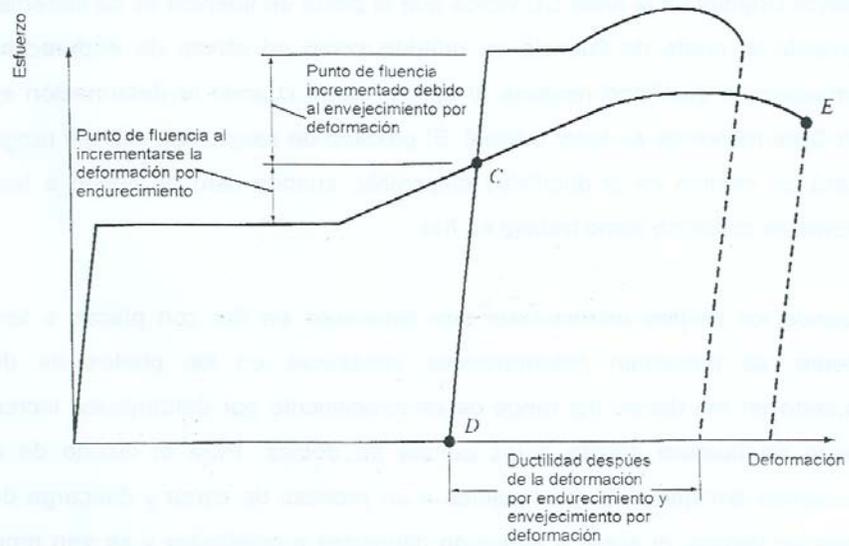


Figura 2.3.4 Efectos de la maduración por deformación después de un proceso de descarga.

La maduración por deformación (ver figura 2.3.4) produce un incremento adicional en el punto de fluencia, restaurando una zona plástica de esfuerzo constante y generará una nueva zona de endurecimiento por deformación en un esfuerzo más elevado. El perfil original del diagrama esfuerzo deformación es restaurado, pero la ductilidad es reducida. El nuevo diagrama esfuerzo deformación puede ser usado como si este fuera el diagrama típico para analizar secciones laminadas en frío.

2.3.5. RESISTENCIA POR DESGARRE LAMINAR

El desgarramiento laminar es una forma de fractura frágil que ocurre en planos esencialmente paralelos de las superficie de laminado de una placa cargada de gran espesor. Debido a que las deformaciones resultantes bajo cargas de servicio son bajas, las cargas normales no son responsables de iniciar la propagación del desgarramiento laminar. En un alto número de juntas soldadas las deformaciones son inducidas por la contracción de la soldadura.

El desgarramiento laminar a recibió una considerable atención al inicio de los años 70', teniendo como resultado la tendencia de los ingenieros estructuristas de culpar al desgarramiento laminar de muchas fallas y fracturas.



Figura 2.3.5 Dirección típica del laminado en secciones I

Como resultado de la operación de manufacturación del laminado en caliente, las secciones de acero tienen diferentes propiedades en la dirección paralela al laminado (vea la figura 2.3.5) que en la dirección transversal. En el rango elástico, tanto la dirección paralela como la transversal al laminado, exhiben un comportamiento similar; para la dirección transversal, el límite elástico es solo ligeramente inferior que el de la dirección paralela al laminado. Sin embargo, la ductilidad (capacidad para deformarse) en la dirección transversal al espesor, puede ser muy baja comparada con la dirección paralela al laminado.

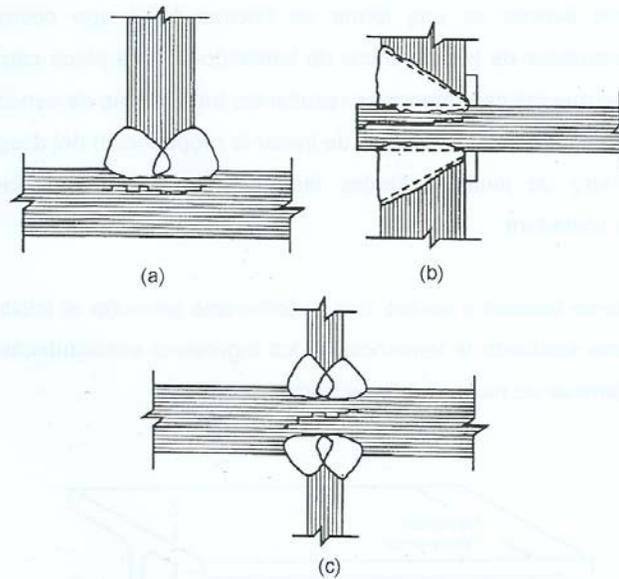


Figura 2.3.6 Típicas juntas con desgarre laminar resultado de grandes zonas soldadas

Generalmente, los perfiles de acero de sección "I" son adecuadamente dúctiles cuando son cargados en la dirección ya sea paralela o perpendicular al laminado. Estos se deforman localmente para deformaciones mayores que la deformación de fluencia (F_y/E_s), soportando las cargas con parte del material actuando al esfuerzo de fluencia y llevando al material adyacente a participar, si es necesaria una mayor resistencia. Sin

embargo, cuando la deformación es localizada en la dirección del espesor del patín, existirá una restricción a la deformación debido a que la deformación no puede redistribuirse desde el patín, a través del alma, hacia el patín opuesto. La mayor deformación localizada en la dirección del espesor del patín puede exceder las deformaciones de fluencia, causando una decohesión que promoverá un desgarre laminar.

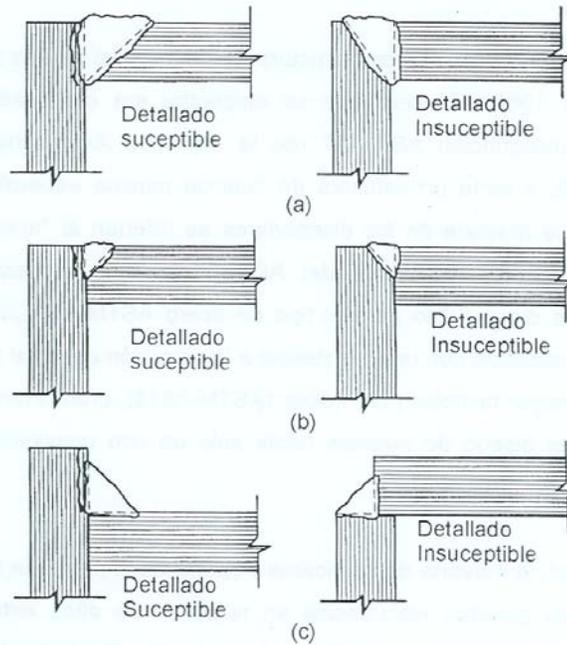


Figura 2.3.7 Detallado en conexiones susceptibles e in susceptibles de desgarre laminar.

La figura 2.3.6 muestra las condiciones que promueven el desgarre laminar en las uniones soldadas. La unión empotrada interna es la que inhibirá mayores deformaciones resultantes de la contracción por soldadura que puede potencialmente causar desgarros laminares. La figura 2.3.7 indica que la contracción por soldadura en la dirección transversal al espesor incrementa la susceptibilidad al desgarre laminar. Los detalles de soldadura deberán ser hechos de tal forma que la contracción de la soldadura ocurra en

la dirección del laminado, tal que las contracciones jalen a las fibras longitudinales en su orientación mas fuerte.

2.4. ACEROS Y SUS PROPIEDADES

2.4.1. Aceros estructurales

Desde la introducción de los aceros estructural como material para la construcción hasta aproximadamente 1960, el acero que se empleaba era clasificado como acero al carbono con la designación ASTM-A7 (de la *Sociedad Americana para Pruebas y Materiales ASTM*), y tenía un esfuerzo de fluencia mínimo especificado de 2,320.13 kg/cm² (33 ksi). La mayoría de los diseñadores se referían al "acero" sin una mayor descripción, y las especificaciones del AISC prescribían esfuerzos permisibles y procedimientos de diseño solo para el tipo de acero ASTM-A7. Otros tipos de acero como los de baja aleación con una resistencia a la corrosión especial (ASTM-A242) y los aceros con una mayor facilidad para soldar (ASTM-A373), eran raramente utilizados en la construcción; el diseño de puentes hacia solo un uso ocasional de estos aceros diferentes.

En la actualidad, la mayoría de los aceros disponibles le permiten al diseñador el uso de materiales con grandes resistencias en regiones de altos esfuerzos en vez de requerir miembros con gran tamaño. El diseñador puede decidir cual es el atributo más deseable entre la máxima rigidez y/o el mínimo peso.

La resistencia a la corrosión que en consecuencia elimina la frecuencia de pintado, puede ser un factor importante. Algunos aceros oxidados forman un recubrimiento protector denso, no requieren de pintarse por lo que puede ser económico el uso de estos "aceros resistentes al ambiente" ó "aceros intemperizados" aún cuando el costo inicial es algo mayor que los aceros al carbono tradicionales.

Algunos aceros proporciona una mejor soldabilidad que otros; algunos son más recomendables para tanques a presión, otros a muy bajas o muy altas temperaturas.

Los aceros estructurales, normalmente son referidos por su designación ASTM o también nombrados por sus propiedades principales. Para fines de diseño, el esfuerzo de fluencia a tensión es la cantidad referida por el AISC para establecer la resistencia o los esfuerzos permisibles. El término esfuerzo de fluencia es usado para definir el "punto de fluencia", el cual define el punto donde se termina el rango elástico mostrado por la mayoría de los aceros estructurales comunes y empieza la zona conocida como rango plástico. Los aceros que en la actualidad están disponibles, cuentan con esfuerzos de fluencia desde 1,687.37 hasta 7,030.70 kg/cm² (24 a 100 ksi).

Los aceros para uso estructural en aplicaciones de laminados en caliente, pueden clasificarse como:

- a) Aceros al carbono.
- b) Aceros de alta resistencia y baja aleación.
- c) Aceros de aleación.

Los requerimientos generales para tales aceros, son cubiertos por la especificación ANSI/ASTM-A6. La Tabla 2.1, lista los aceros más comunes, su esfuerzo de fluencia mínimo y su resistencia a la tensión.

2.4.1.1 Aceros al carbono

Se dividen en cuatro categorías de acuerdo al porcentaje de carbono que contienen: Bajo carbono (menos del 0.15%); dulce al carbono (0.15-0.29%); mediano carbono (0.30-0.59%); y alto carbono (0.60-1.7%).

Los aceros estructurales al carbono, están en la categoría de acero dulce al carbono; un acero tal como el A36 tiene un contenido máximo de carbono que varía entre 0.25 a 0.29% dependiendo de su espesor. Estos aceros estructurales exhiben un punto de fluencia bien definido como se muestra en la curva (a) de la figura 2.4.1 . Algunos aceros clasificados en esta categoría son : A36, A53, A500, A501, A529, A570, A611 y el A709 grado 36.

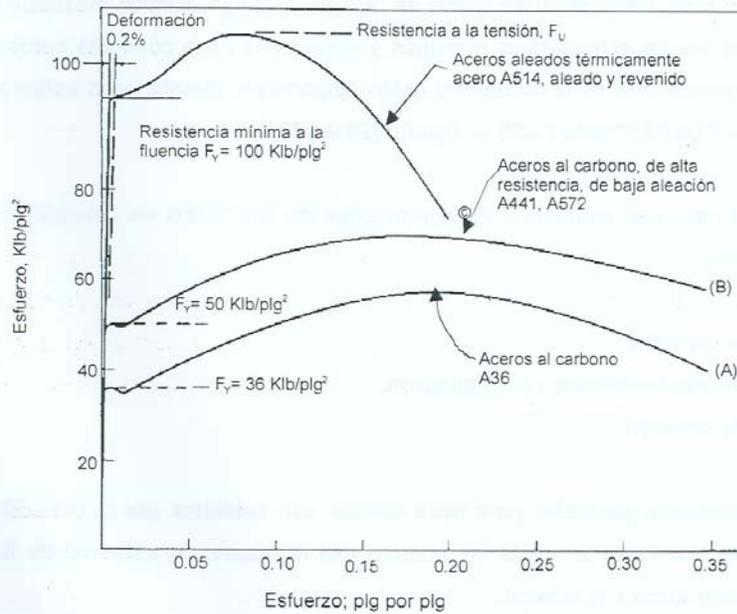


Figura 2.4.1 Curvas típicas esfuerzo-deformación de los diferentes tipos de acero.

2.4.1.2 Aceros de alta resistencia y baja aleación

Esta categoría incluye aceros que tienen un esfuerzo de fluencia entre 2,812.28 y 4921.49 kg/cm², y exhibe un punto de fluencia bien definido como se muestra en la curva (b) de la figura 2.4.1, muy similar a la de los aceros al carbono. El adicionar a los aceros al carbono pequeñas cantidades de elementos de aleación como el Cromo,

Columbio, Cobre, Manganeso, Molibdeno, Níquel, Fósforo, Vanadio, Circonio, mejoran alguna de las propiedades mecánicas.

Así como los aceros al carbono obtienen una mayor resistencia al incrementar su contenido de carbono, los elementos de aleación presentan el incremento de resistencia debido a una fina micro estructura obtenida durante el enfriamiento del acero.

Los aceros de alta resistencia y baja aleación no usan tratamientos por calentamiento y por citar algunos de la Tabla 2.1: A242, A441, A572, A588, A606, A607, A618 y el A709 grado 50 o grado 50W.

2.4.1.3 Aceros de aleación

Los aceros de aleación pueden ser templados por enfriamiento para obtener resistencias de fluencia de 5,624.56 a 7,733.77 kg/cm² (80 a 110 ksi). La resistencia de fluencia es usualmente definida como el esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria del 0.2%, ya que estos aceros no exhiben un punto de fluencia bien definido como se muestra en la curva típica © de la figura 2.4.1.

Estos aceros son soldables y ordinariamente no requieren un tratamiento por calentamiento después de soldados. Para usos especiales, puede requerirse el relevado de esfuerzos. Algunos aceros al carbono tales como los usados para tanques a presión, pueden ser templados por enfriamiento para darles una resistencia a la fluencia en el rango de 5,624.56 kg/cm² (80 ksi), pero la mayoría de los aceros con esta resistencia son aceros de aleación. Estos aceros de aleación generalmente tienen un contenido máximo de carbono aproximado de 0.20% con el objeto de limitar el endurecimiento de cualquier micro estructura con grano grueso (Martensita, fase frágil formada por una solución sólida de hierro y carbono) que pueda formarse durante el tratamiento por calentamiento o soldado, con lo que se reduce el peligro de agrietamiento.

El tratamiento térmico consiste en enfriar rápidamente con agua o aceite, desde al menos 1650°F (900°C) hasta 300-400°F; después se temple por calentamiento hasta al menos 1150°F (620°C) y se deja enfriar. Esta "sintonización fina" de las propiedades mecánicas del acero consiste en formar primero un material martensítico por completo mediante un rápido templado. Después este acero se hace menos frágil mediante un recalentado cuidadoso a una temperatura donde sea posible la transformación a las fases de equilibrio en las micro estructuras. Al recalentar durante un lapso breve a una temperatura moderada, se obtiene un producto de alta resistencia y baja ductilidad. Al recalentar por lapsos más prolongados se presenta una ductilidad más grande (debido a menos volumen de Martensita). A este proceso se le denomina revenido. Para una información más detallada concerniente a la metalurgia del tratamiento térmico, referirse al manual de soldadura del AWS, Vol. 1, "*Welding technology*" u otra referencia como "*Ciencia de Materiales para Ingenieros*" de James F. Shackelford.

Por citar algunos aceros de este tipo en la Tabla 2.1: A514 y el A709 grado 100 o grado 100W.

2.4.2. Clasificación del acero estructural según la ASTM

2.4.2.1. Aceros estructurales

El material que se ajuste a una de las siguientes especificaciones estándar es aprobado para utilizarse en las especificaciones LRFD.

ASTM A36: Acero estructural.

ASTM A53, Gr.B: Tubería, acero, negro y recubierto en caliente por inmersión, revestimiento de zinc soldado y sin costura, tubería de acero.

ASTM A242: Acero estructural de alta resistencia y baja aleación.

ASTM-A441: Acero estructural de alta resistencia y baja aleación al manganeso-vanadium.

ASTM-A500: Tubular estructural de acero al carbono formado en frío, soldado y sin costura en redondos y perfiles.

ASTM-A501: Tubular estructural de acero al carbono formado en caliente, soldado y sin costura.

ASTM-A514: Placas de aleaciones de acero en alta fluencia templadas, recomendables para soldar.

ASTM-A529: Acero estructural con límite mínimo de fluencia de 2,952.9 kg/cm² (42 ksi)

ASTM A570 Gr. 40, 45 Y 50: Acero, planchas y soleras, al carbono, laminado en caliente, calidad estructural.

ASTM A572: Acero de columbio-vanadio en calidad estructural, de alta resistencia y baja aleación.

ASTM A588: Acero estructural de alta resistencia y baja aleación con límite mínimo de fluencia de 3,515.3 kg/cm² (50 ksi), y hasta 4 pulg. de espesor.

ASTM A606: Acero, planchas y soleras, alta resistencia, baja aleación, laminado en caliente o en frío, con mejoras en la resistencia a la corrosión atmosférica.

ASTM A607: Acero, planchas y soleras, alta resistencia, baja aleación, al columbio o vanadio, o ambos, laminado en caliente o en frío.

ASTM A618: Tubular estructural de alta resistencia y baja aleación, soldados y sin costuras laminado en caliente.

ASTM A709: Acero estructural para puentes.

ASTM A852: Placas de acero estructural de baja aleación, templadas con límite mínimo de fluencia de 4,921.5 kg/cm² (70 ksi) y hasta 4" de espesor.

Reportes certificados del molino, o de pruebas realizadas por el fabricante o de algún laboratorio de pruebas de acuerdo con las normas ASTM A6 o A568 son aplicables y la especificación constituirá suficiente evidencia de conformidad con uno de los estándares ASTM antes mencionados. Adicionalmente, el fabricante debe si se le requiere, proveer una garantía de que el acero estructural empleado cumple con los requerimientos del grado especificado.

2.4.2.2. Acero no identificado

El acero no identificado si esta libre de imperfecciones en la superficie, es permitido para partes de menor importancia, o para detalles irrelevantes, donde la precisión de las propiedades físicas del acero y su soldabilidad no afectan la resistencia de la estructura.

2.5. VENTAJAS DEL ACERO ESTRUCTURAL

El acero como material estructural, es ampliamente solicitado ya que proporciona ventajas atractivas al constructor y/o diseñador, pudiendo citar entre las principales a las siguientes:

2.5.1. Alta resistencia

La alta resistencia del acero estructural permite al diseñador proporcionar secciones esbeltas en comparación con otros materiales; por ejemplo, para un mismo edificio, las columnas de concreto de cualquier nivel, suelen ser mucho más robustas que si fueran de acero, reduciendo considerablemente las de cargas muertas correspondiente al peso propio de la estructura.

2.5.2. Uniformidad

El acero estructural, tiene la ventaja de que conserva sus propiedades a través del tiempo a temperaturas atmosféricas.

2.5.3. Elasticidad

Se apega más a la hipótesis de diseño elástico, porque sigue la ley de *Hooke* hasta esfuerzos relativamente altos.

2.5.4. Ductilidad

Debido a esta propiedad, las estructuras se deforman considerablemente antes de la falla; o lo que es lo mismo, se puede detectar inminencia la falla de una estructura cuando se observa una deformación excesiva.

2.5.5. Rapidez en el proceso de montaje

Una vez que el acero ha sido habilitado, el montaje del mismo se puede efectuar en un tiempo relativamente corto, en comparación con estructuras de otros materiales, por ejemplo el concreto.

2.5.6. Valor de rescate

Toda vez que se desmantele una estructura de acero, podría usarse de nueva cuenta o en el peor de los casos, venderse como chatarra, situación que proporciona una recuperación económica de la misma.

2.6. DESVENTAJAS DEL ACERO ESTRUCTURAL

2.6.1. Costo del mantenimiento

Como se mencionó anteriormente, el acero requiere un constante mantenimiento para prolongar su buen funcionamiento dentro de la estructura, ya que se corroe al estar expuesto libremente al aire, lo cual, puede alterar sus propiedades; por lo tanto, es necesario pintarlo, galvanizarlo ó darle un tratamiento que evite la corrosión.

2.6.2. Costos de protección contra incendios

A pesar de que el acero es un material incombustible, cuando se somete a elevadas temperaturas, la resistencia del mismo, puede reducirse considerablemente. Por lo tanto, se debe proteger la estructura contra el fuego, recubriéndola con un material apropiado, lo cual incrementa el costo de la misma.

2.6.3. Susceptibilidad de pandeo

Debido a la alta resistencia de algunos aceros, las secciones diseñadas resultan bastantes esbeltas; está situación puede crear problemas de pandeo en miembros sujetos a compresión.