

# EFFECTO DEL BORO EN LA TEMPLABILIDAD DE LOS ACEROS

FABIO ALEJANDRO URIBE ISAZA

*Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Colombia.  
Facultad de Minas.*

HORACIO SIERRA RESTREPO

*Profesor Titular, Universidad Nacional de Colombia.  
Facultad de Minas, Ingeniería Mecánica.*

## RESUMEN

El boro tiene un marcado efecto en la templabilidad de los aceros con bajo contenido de carbono, retrasando la transformación de la austenita en ferrita lo cual facilita la obtención de martensita o de bainita. Ha sido ampliamente reconocido que el boro o compuestos de boro se precipitan en los límites de grano austenítico por lo que reduce la energía interfacial en dichos límites.

Debe tenerse en cuenta que la influencia del boro sobre la templabilidad depende de los otros elementos de aleación. El nitrógeno, por ejemplo, tiene un papel muy importante en su efecto ya que, dependiendo de la adición de titanio y circonio, elementos de protección del boro, se logrará el efecto total de éste en la transformación austenítica.

## PALABRAS CLAVES.

Templabilidad, boro, precipitación de compuestos de boro.

## ABSTRACT

Boron has a very great effect on the hardenability of low carbon steels in that it slows down the transformation of austenite and promotes the formation of martensite or bainite because of the delaying of the transformation of austenite to ferrite. It has been widely recognized that boron or boron constituents precipitate to the austenite grain boundary, thereby reducing its interfacial energy.

But the influence of the boron on the hardenability depends on other alloy elements. For instance, nitrogen

has an important roll on its effect because; depending on the adding of protection elements, the total boron effect on the austenite transformation will be gained.

## KEY WORDS.

Hardenability, boron, precipitation of boron constituents.

## 1. INTRODUCCIÓN

El constante proceso tecnológico ha llevado a investigar formas económicas para la producción de aceros de alta resistencia y baja aleación (High - Strength Low - Alloy Steels, HSLA) y a implementarlos a escala industrial. La adición de pequeñas cantidades de boro a los aceros de baja aleación y bajo contenido de carbono ha sido una forma eficiente de incrementar la templabilidad en los aceros a muy bajo costo; pero, debido a un aparente efecto no reproducible de éste sobre la templabilidad y a una aparente influencia sobre la fragilidad, fue rechazado por muchos de los fabricantes.

Recientemente, se ha renovado el interés en este tipo de aceros porque el avance tecnológico ha permitido un estudio más o menos detallado de la influencia del boro y de los otros elementos de aleación en las propiedades del acero, sumado a la ventaja económica que su uso representa. Respecto al estudio de la influencia del boro en los aceros, aunque no pueda predecirse con exactitud el efecto de éste en la templabilidad, se ha logrado establecer con cierta precisión algunos de los factores que afectan directamente el efecto total del boro:

- La composición y el proceso de obtención del acero son factores muy importantes puesto que la presencia de otros elementos de aleación, tales como el nitrógeno y el oxígeno, debilitan la eficiencia del boro.
- La naturaleza de la transformación austenítica y el tamaño de grano austenítico también son factores importantes.
- El contenido de boro necesario para lograr un efecto sobre la templabilidad es muy pequeño, lo que hace difícil su control. Por tanto, una excesiva adición no controlada no logrará el máximo efecto en el mejoramiento de la templabilidad, fin último de la adición del boro.
- El historial térmico del acero y la temperatura de austenización influyen en el efecto del boro ya que de ellos depende la redisolución de los borocarburos, los cuales afectan la descomposición austenítica.

## 2. EFECTO DEL BORO EN LA TEMPLABILIDAD

A partir de 1930 los aceros al boro comienzan a ser reconocidos y utilizados por sus características de templabilidad. Fue Grossman quien estableció las tres generalidades de la adición del boro en los aceros<sup>1</sup>

- Pequeñas adiciones de boro afectan notablemente la templabilidad de un acero.
- La influencia de la templabilidad varía notablemente con el contenido de carbono del acero.
- El efecto del boro viene, además, limitado por la adición de otros elementos, tales como el nitrógeno, titanio, aluminio, niobio y elementos desoxidantes, y por el historial térmico del acero.

Sin embargo y a pesar de las ventajas, un efecto no reproducible de este elemento sobre la templabilidad, determinado en un periodo de poca investigación, tal vez por motivos económicos y tecnológicos, limitó su uso industrial como consecuencia de la dificultad de lograr una respuesta uniforme en la templabilidad. Además, el efecto cuantitativo del boro en la templabilidad no puede predecirse satisfactoriamente

de manera constante. Este efecto no reproducible se atribuye a<sup>2</sup>:

- El contenido de boro requerido para la templabilidad es extremadamente pequeño.
- Cuando el boro se combina con el nitrógeno y el oxígeno resulta inefectivo y, en consecuencia, el efecto sobre la templabilidad está marcadamente influido por la práctica para la obtención del acero y por los aditivos de boro empleados.
- Aún cuando la cantidad de boro efectivo sea controlada, la magnitud del efecto en la templabilidad del boro depende en gran medida de la composición base y del tamaño de grano austenítico del acero.
- La temperatura de austenización, al igual que el historial térmico previo, ejerce una influencia considerable en la templabilidad.

Los primeros estudios<sup>2</sup> del efecto del boro en la templabilidad mostraron que el boro incrementaba la templabilidad de los aceros hipoeutectoides mediante el retardo de la nucleación de la ferrita proeutectoide en los límites del grano de la austenita y en menor grado, de la bainita superior (la cual es nucleada por ferrita) sin afectar, apreciablemente la tasa de crecimiento de estos compuestos. El boro no retarda la formación de perlita.

Posteriormente, fueron propuestos numerosos mecanismos para explicar el efecto del boro en la templabilidad, los cuales se basaron en la solución del boro en la austenita y su segregación en los límites de grano austenítico durante el enfriamiento, lo cual disminuye la energía libre lo suficiente para inhibir la nucleación de la ferrita y la bainita en los límites. Otros estudios confirmaron que el boro decrecía significativamente la energía en los límites de grano de la austenita.

Esta afirmación fue rebatida por Sharma y Purdy<sup>3</sup> quienes lanzaron una nueva hipótesis sobre el mecanismo de cómo el boro afecta la templabilidad de los aceros y demostraron que las pequeñas cantidades de boro adicionadas al acero son insuficientes para producir cambios significativos en la energía libre a los

límites de grano. Su hipótesis, luego ratificada por Maitrepierre<sup>4</sup> y otros, propone que en las etapas iniciales de la transformación, precipitados muy finos de compuestos de boro  $\{M_{23}(BC)_6\}$  pueden tener un efecto inhibidor en la nucleación de la ferrita a través de su semicoherencia con uno de los granos de austenita adyacentes. Estos borocarburos tienen estructura cúbica de cara centrada con un parámetro de red;  $a = 10.6 \text{ \AA}$ . Estos nuclean en la austenita con una relación de orientación paralela (cubo-cubo) con uno de los granos vecinos<sup>2,4</sup>. La nucleación de la ferrita es inhibida en ese lado del límite de grano debido a una disminución sustancial de la energía interfacial de la intercara semicoherente entre el precipitado y el grano.

Con el engrosamiento de los precipitados, la intercara llega a ser incoherente y actúa como sitio de nucleación de ferrita y en consecuencia, la templabilidad disminuye.

## 2.1. ESTADO DEL BORO EN LOS ACEROS

En principio, podría pensarse que el boro es un elemento que puede estar presente en solución sólida intersticial o formando compuestos químicos como consecuencia de su gran afinidad con el nitrógeno y con el oxígeno. Cuando estos elementos están en forma libre, el boro se combinaría con ellos para formar nitruros y óxidos<sup>5</sup>.

La segregación de los átomos de boro en los límites de grano durante el enfriamiento se postuló con base en información disponible acerca de la solubilidad intersticial del boro en la austenita y en alguna evidencia experimental discutida en varias fuentes<sup>2</sup>. Sin embargo, el boro, con un radio atómico de  $0.87 \text{ \AA}$ , resulta lo suficientemente grande como para considerarse como un elemento intersticial, teniendo en cuenta que el radio del intersticial octaédrico en la austenita es de tan sólo  $0.53 \text{ \AA}$ .<sup>6</sup>

Las adiciones de boro a los aceros, por medio de lo que se denomina ferroburos, suelen ir acompañadas de la adición de elementos desoxidantes y desnitrurantes<sup>5</sup>. En primera instancia, el boro se encuentra disuelto, pero luego en presencia de

carburos entra en sustitución formando borocarburos o borocementita. Ambos precipitan generalmente al límite de grano, lugar en el cual el boro ejerce su influencia sobre la templabilidad. La detección del boro en los aceros requiere de técnicas sensibles a la presencia del boro, como la *Alfagrafía*, o a la detección de elementos trazas, como la *Espectroscopia Secundaria de Masa*. Sin embargo, la presencia del boro en la forma de borocarburos conlleva a una serie de características microestructurales que pueden ser puestas en evidencia por técnicas estándares, tales como el uso de microscopía electrónica para la detección de los borocarburos<sup>7</sup>  $M_{23}(B, C)_6$  y de borocementita<sup>1</sup>  $Fe_3(B, C)$ .

La clasificación, a un nivel muy general, de los distintos compuestos de boro se hace de la siguiente manera<sup>5,7</sup>:

- Fracción boro soluble. Corresponde, en forma aproximada, a la cantidad de boro disuelto como soluto en la matriz o en la forma de borocarburos o borocementita.  $\{M_{23}(B, C)_6\}$  y  $Fe_3(BC)$
- Fracción boro insoluble. Corresponde a la cantidad de boro en forma de nitruro de boro y, posiblemente, algunas inclusiones no metálicas.

Respecto a los óxidos de boro no se logró establecer la clasificación en alguno de los dos grupos anteriormente mencionados. De acuerdo a Villanueva<sup>5</sup> no se ha definido este aspecto.

La relación entre boro soluble e insoluble está controlada por el contenido de nitrógeno libre y, por tanto, por la presencia de elementos formadores de nitruros, la cual depende de la forma de adición de éstos. Así, cuando se adicionan elementos tales como el titanio, que es un fuerte formador de nitruros, y/o el aluminio, que es un formador más débil de nitruros, la relación puede ser controlada.

La utilización de titanio es más popular en Estados Unidos y la del aluminio en Europa y Japón. El titanio presenta un efecto negativo sobre las propiedades de tenacidad y fatiga<sup>7</sup>, la adición de aluminio es la preferida, a pesar de que se requieren mayores cantidades de éste para el control del nitrógeno.

## 2.2. LOS COMPUESTOS DE BORO

Se tienen fundamentalmente dos compuestos de boro: el borocarburo  $M_{23}(B, C)_6$  y la borocementita  $Fe_3(B, C)$ . Otros compuestos son los óxidos de boro, los nitruros de boro y las inclusiones no metálicas de boro.

Cuando un acero al boro con contenido bajo de nitrógeno libre (nitrógeno protegido) es analizado bajo las técnicas de microscopía de transmisión electrónica, se encuentran borocarburos del tipo  $M_{23}(B, C)_6$  ó borocementita del tipo  $Fe_3(B, C)$ , y algunos óxidos complejos con contenido de boro. Cuando el contenido de nitrógeno del acero es aumentado a niveles superiores a las 80 ppm., una fracción de boro se asocia con el nitrógeno en forma de boronitruros<sup>5</sup>.

En la relación estequiométrica del borocarburos  $M_{23}(B, C)_6$ , M representa la fracción metálica que, gracias al empleo del microanalizador EMMA 4, se ha podido constatar que es principalmente hierro (Fe) y enriquecida, respecto a la matriz, de otros elementos como el molibdeno y cromo<sup>7</sup>. Estos elementos promueven la formación de precipitados finos en ciertos tratamientos térmicos e influyen en las cinéticas de la precipitación<sup>2</sup>.

## 2.3. PRECIPITACIÓN DE LOS COMPUESTOS DE BORO

Los compuestos del boro: los borocarburos y la borocementita precipitan a los límites de grano austenítico. Originalmente, estos precipitados fueron identificados como boruros de hierro ( $Fe_2B$ ) pero trabajos recientes los han identificado como borocarburos. El borocarburo  $M_{23}(B, C)_6$  es una fase más estable que la borocementita<sup>2</sup>; lo cual explica porque estos compuestos son formados durante el enfriamiento en el intervalo de 900°C a 595°C. Sin embargo, a temperaturas menores a 595°C, la borocementita puede formarse como una fase metaestable intermedia en los límites de grano.

La cinética de la reacción de precipitación es muy rápida, especialmente en el intervalo de temperatura de 700 a 800°C, donde es prácticamente imposible trazar cualquier tipo de curva en C.

Adicionalmente, el boro puede reemplazar hasta el 80% del carbono en la cementita para formar  $Fe_3(CB)$ ,

la cual ha sido observada en aleaciones Fe-B-C recocidas a 1000°C y el boro, también se disuelve extensamente en carburos comunes en aceros, tales como:  $V_4C_3$  y  $CbC$ .

Así, de acuerdo a lo reportado por Kapadia<sup>2</sup>, dependiendo del tratamiento térmico previo, ambos borocarburos y borocementita están generalmente presentes en aceros al boro. Estos carburos permanecen sin disolverse a temperaturas normales de austenización produciendo un decrecimiento de la templabilidad al reducir la cantidad de boro disuelto en la austenita y al promover la nucleación de la ferrita. Temperaturas de austenización de 1100°C o mayores son requeridas para disolver completamente los carburos.

Los principales parámetros que controlan las reacciones de precipitación son:

- La temperatura de austenización, a mayor temperatura más rápida será la reacción.
- El contenido de boro, el cual parece influenciar fundamentalmente, el crecimiento y el engrosamiento de los precipitados
- La presencia de elementos aleantes; ciertos elementos formadores de carburos (Cr, Mo, Nb) parecen promover la formación de precipitados más finos para un tratamiento térmico específico. Esto parece particularmente claro en el caso de adición de niobio (0.050%) en aceros de bajo carbono.

No todos los aceros logran la redisolución completa a la misma temperatura, ésta última depende del contenido de boro y, al parecer, no del contenido de carbono<sup>1</sup>. Sin embargo, para aceros al boro, aún con pequeños contenidos de éste (<30 ppm), a las condiciones estándares de austenización (850°C a 925°C) se aprecian borocarburos no disueltos a la temperatura de austenización.

La precipitación de borocarburos  $M_{23}(B, C)_6$  se da, principalmente, a lo largo de los límites de grano austeníticos, lo que conduce a implicaciones especiales puesto que los límites de grano austeníticos son los sitios de nucleación para las reacciones de descomposición de la austenita<sup>7</sup>.

## 2.4. CONTENIDO ÓPTIMO DE BORO

De las investigaciones que se han realizado, se ha podido deducir que hay un intervalo o nivel óptimo de boro disuelto o boro soluble, en el cual el efecto de este elemento en la templabilidad es máximo, y por encima del cual la templabilidad decrece considerablemente.

El valor del contenido óptimo de boro es algo en lo que no hay un acuerdo general. Algunos autores lo aceptan en el intervalo entre 15 y 30 ppm. de boro soluble, figura 1<sup>4</sup>, aunque otros autores lo asumen en el intervalo entre 3 y 30 ppm. Esta discrepancia puede ser debida a que durante la determinación de la cantidad de boro soluble, algunos óxidos de boro (estos óxidos no tiene ningún efecto en la templabilidad) se disuelvan en la solución utilizada, obteniéndose así datos erróneos<sup>4</sup>.

Otros factores que afectan la determinación del contenido óptimo de boro, son la correcta protección para evitar la interacción con otros elementos como nitrógeno y oxígeno, formando compuestos que no contribuyen a la templabilidad. Adicionalmente el tamaño de grano austenítico y el contenido de carbono en el acero pueden afectar este valor.

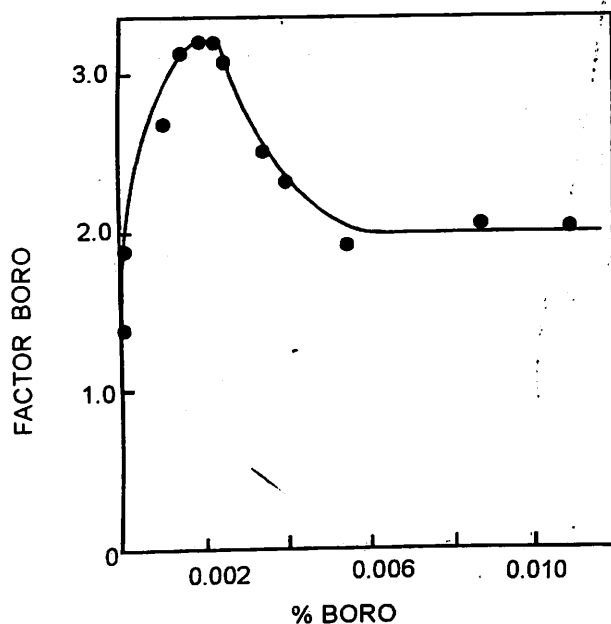


Figura 1 Factor de la templabilidad del boro mostrado como una función del contenido de boro para aceros de la serie A514-J<sup>1</sup>

Kapadia y otros, han determinado el efecto del boro en la templabilidad como función de un contenido de boro "efectivo",  $\beta$ , deducido de la interacción del titanio y el circonio, adicionados con el boro para controlar el nitrógeno en el acero, la expresión obtenida se muestra a continuación<sup>1, 2</sup>.

$$\beta_{eff} = B - \left[ (N - 0.002) - \frac{Ti}{5} - \frac{Zr}{15} \right] \geq 0$$

## 2.5. INFLUENCIA DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ACERO

Debido a la afinidad que tiene el boro por el oxígeno y el nitrógeno, los cuales usualmente están presentes en los aceros, la forma en que se fabrica éste es de gran importancia para el efecto total que producirá el boro en la templabilidad de dicho acero<sup>2</sup>.

Este efecto está relacionado con la cantidad de boro libre o soluble y no con la cantidad de boro presente en el acero. Es de gran importancia la desoxidación por medio de la adición de silicio, aluminio y otros desoxidantes antes de agregar el boro, además, de la adición de formadores de nitruros como titanio y circonio.

Sin embargo, como las cantidades de boro que se agregan al acero son muy pequeñas, las variaciones normales en el contenido de oxígeno y nitrógeno del acero, colada a colada, han producido variaciones en la templabilidad en grados específicos de aceros. A pesar de que este problema ha sido ampliamente superado, los aceros al boro todavía gozan de una reputación de inconsistentes.

## 2.6. EFECTO DEL CONTENIDO DE CARBONO

Aunque se tenga la cantidad de boro óptima, su efecto en la templabilidad puede variar con el contenido de carbono en el acero. Varias investigaciones han determinado que el boro es más efectivo en aceros de bajo contenido de carbono y es completamente ineficiente en los que contengan más de 0.9% de carbono<sup>1, 2, 7</sup>. Se ha concluido que el factor de

templabilidad del boro  $F_B$  decrece con el incremento del contenido de carbono, de acuerdo a la siguiente relación:

$$F_B = 1 + 1.5(0.9 - \%C)$$

De acuerdo con esta relación, el boro es más efectivo en aceros de bajo contenido de carbono, pero es completamente ineficiente en aceros de 0.9% de carbono.

Diferentes investigadores han reportado algunas relaciones para predecir el efecto del boro pero todas ellas presentan una alta dispersión, lo que impide su uso para estimar el efecto real, a pesar de mostrar la dependencia existente entre los contenidos de carbono y boro. En un intento de clarificar la situación, Grange<sup>2</sup> condujo una serie de experiencias, utilizando aceros de alta pureza, obtenidos en horno de vacío, con contenidos de carbono entre 0.1 y 1.2 % y con 0.002%B y sin boro. La información obtenida por él, se presenta en la figura 2, pudiéndose estimar con ella en forma acertada el efecto del boro.

El efecto negativo que se presenta en los aceros hipereutectoides, obedece a que el alto contenido de carbono hace que se precipiten borocarburos en el límite de grano, acelerando la formación de carburos y perlita, produciendo un efecto adverso en la templabilidad.

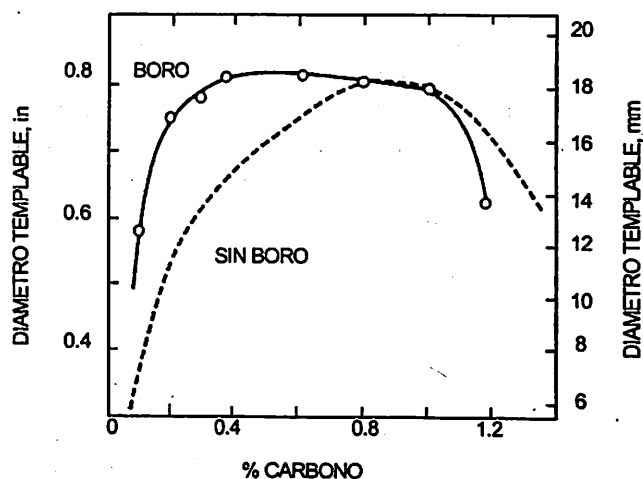


Figura 2 Diámetros endurecidos a 50% de martensita al centro, temple en agua de acuerdo con 0.5 % Mn con y sin boro

## 2.7. EFECTO DE LOS ALEANTES

El efecto del boro sobre la templabilidad es afectado por el contenido de manganeso, cromo y/o molibdeno existente. Al parecer, los contenidos altos de manganeso y cromo conllevan a que el boro pierda su efecto, inclusive para bajos contenidos de carbono. En los niveles intermedios de manganeso y cromo, el boro pierde totalmente su eficiencia en contenidos de carbono inferiores a 0.8%. El contenido de carbono a partir del cual el boro comienza a ser inefectivo disminuye con el incremento en el contenido de aleantes<sup>1, 2</sup>.

Los elementos de aleación más comunes, incluyendo el carbono, incrementan la templabilidad y retardan la nucleación y el crecimiento de la ferrita proeutectoide y de la bainita, por lo tanto, el incremento del contenido de carbono o del contenido de aleantes disminuye el efecto del boro<sup>2</sup>. Otros elementos, como el molibdeno, al parecer aumentan fuertemente la influencia del boro. En particular, el molibdeno retarda la reacción perlítica mucho más que cualquier otro elemento de aleación, aunque suprime la transformación de la ferrita proeutectoide. Esta característica del molibdeno es, probablemente, la responsable de la reacción sinérgica con el boro, lo cual resulta en una alta templabilidad bainítica en los aceros 0.5% Mo - B. Se ha sugerido que una interacción similar puede darse entre el manganeso y el boro<sup>2, 7</sup>.

El niobio, de acuerdo a Maitrepierre<sup>7</sup>, mejora el efecto del boro cuando está en solución. Tiene un efecto sinérgico con el boro, dando como resultado una fuerte inhibición de la reacción de descomposición austenítica. A bajas temperaturas de austenización este efecto no es observado, es más, se presenta alguna pérdida de templabilidad debido al refinamiento del grano por carburos de niobio indisolubles. La presencia de estos carburos no permite un efecto completo del boro. A temperaturas de austenización mayores a 1100°C se presenta la disolución de NbC.

## 2.8. EFECTO DEL TAMAÑO DE GRANO AUSTENÍTICO

Al igual que en los aceros simples al carbono, en los aceros aleados con boro, éste juega un papel importante en la templabilidad.



En los aceros al boro, el tamaño de grano tiene un doble papel sobre la templabilidad a través de su efecto en la cinética de transformación de la austenita, así como en la distribución de boro en los límites de grano de la austenita.

En los aceros simples al carbono de baja templabilidad, donde ésta está dada por la transformación de la austenita a ferrita o perlita nucleadas en los límites de grano (temple ferrítico - perlítico), al incrementar el tamaño de grano austenítico se incrementa la templabilidad por la disminución de los sitios propicios para la nucleación. Debido a que el boro inhibe la transformación por nucleación al límite de grano, la adición de boro a tales aceros disminuye el efecto en la templabilidad del tamaño de grano. Alternativamente, puede pensarse que el boro tiene un efecto relativamente mayor en la templabilidad en aceros al carbono de grano fino que en aceros al carbono de grano basto<sup>2</sup>.

En los aceros de baja aleación y bajo contenido de carbono, en los cuales la templabilidad está limitada por la transformación de la austenita en bainita (temple bainítico), la situación es diferente porque la transformación bainítica no tiene lugar como nucleación en los límites de grano por lo que en este tipo de temple, el efecto del boro no se ve afectado por el tamaño de grano.

## 2.9. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE AUSTENIZACIÓN

En los aceros libres de boro, el incremento en la temperatura de austenización produce un ligero aumento en la templabilidad, debido a un crecimiento en el tamaño de grano, por la completa disolución de los carburos y por una mayor homogeneización de la austenita. Cuando un acero al boro es austenizado a temperaturas normales de austenización (850°C - 925°C), el boro tiene una tendencia inherente a promover el crecimiento del grano. Sin embargo, la adición de aluminio, titanio, circonio, o vanadio con boro puede controlar en gran parte este efecto. Los aceros al boro comercialmente producidos son de grano fino<sup>2</sup>.

En contraste con los aceros simples al carbono, investigadores como Kapadia<sup>2</sup> reportan una marcada disminución de la templabilidad de los aceros conteniendo boro al incrementar la temperatura de austenización (900-1095°C), independiente de si el boro fue protegido con titanio, circonio en adición con aluminio.

La pérdida de templabilidad con el incremento de la temperatura de austenización obedece a una excesiva precipitación de compuestos de boro a los límites de grano, lo cual resulta en un incremento de concentración de boro en dichos límites y por tanto, reduce la templabilidad. La restauración de la templabilidad se logra sosteniendo a una temperatura inferior (temperatura de temple) y se atribuye a un exceso de boro disuelto en la matriz en vez de estar en los límites de grano, antes de iniciar la transformación.

En conclusión, la variación de la templabilidad con la temperatura de austenización es dependiente de una serie de factores que incluyen: contenido de boro, contenido de carbono, temperatura de temple y tamaño de grano.

## 2.10. EFECTO DE CALENTAMIENTOS PROLONGADOS A ALTAS TEMPERATURAS

Calentamientos prolongados o ciclos repetidos de calentamiento a altas temperaturas, superiores a 1095°C, pueden resultar en una total o parcial pérdida del efecto del boro en la templabilidad<sup>2</sup>. Este efecto es conocido como "desaparición del boro" y es irreversible. Así, bajo ciertas condiciones una pérdida del efecto del boro en la templabilidad puede ocurrir durante los procesos de enfriamiento anteriores al rolado o a la forja.

Las adiciones de aluminio, vanadio o columbio con ferroburos no proveen una protección adecuada contra dicha pérdida, pero una adición apropiada de titanio y circonio puede retardar suficientemente el efecto de tal forma que no represente una dificultad práctica. Además, el tiempo requerido para la pérdida del efecto del boro durante el recalentamiento es inversamente relacionado a la temperatura<sup>2</sup>.

### 3. APLICACIONES

- La compañía "Canadian Chain" emplea los aceros al boro para la fabricación de sus cadenas SUP-R-BORON CHAIN por sus características de tenacidad y porque su tratamiento de endurecimiento normalmente incrementa la vida de la cadena en un 30%.<sup>8</sup>
- Acero para aplicaciones automotrices. La idea del mejoramiento en la fabricación de las partes automotrices con fines de seguridad y economía ha llevado a la fabricación de partes en aceros al boro en muchos países para utilizarlos en aplicaciones en la industria automotriz. Tal es el caso de la compañía Porsche<sup>9</sup>, la cual fabrica la estructura trasera de sus automóviles en acero al boro. La compañía Ford<sup>10</sup>, en su serie de vehículos Contour, fabrica las estructuras interiores de las puertas para resistencia al impacto en aceros al boro.
- Discos de Arados. Algunas compañías utilizan aceros al boro con contenidos de carbono inferiores a 0.3% debido a que, de acuerdo a ellos, no se requiere el revenido, lo que se traduce en ahorros de energía y tiempos.

### 4. REFERENCIAS

1. SIEBERT, Clarence A., DOANE, Douglas V. and BREEN, Dale H. The Hardenability of Steels- Concepts, Metallurgical Influences and Industrial Applications. American Society for Metals. Metals Park, Ohio, 1977, p. 218.
2. KAPADIA, Behram M. Prediction of the Boron Hardenability, Effect in Steel - A Comprehensive Review, Proceeding of Symposium "Hardenability Concepts with Applications to Steel, p. 448-480. October 24-26, 1977.
3. SHARMA R.C. and PURDY, G.R., Nucleation Limitation and Hardenability.. Metallurgical Transactions. Vol. 4. Pp. 2303-2311. October. 1973.
4. MAITREPIERRE D, THIVELLIER and TRICOT R., Influence of Boron on the Decomposition of Austenite in Low Carbon Alloyed Steel. Metallurgical Transactions. Vol. 6<sup>a</sup>. Pp. 287-300. February 1975.
5. VILLANUEVA, Roberto A. Tratamientos Termomecánicos de los Aceros. Siderurgia Latinoamericana No. 327. Pp. 2-4. Julio 1987.
6. CULLITY, B.D. Elements of Ray x Diffraction Department of Metallurgy University of Notre Dame. 2<sup>a</sup>. Ed. London-England 1956. 514 p.
7. MAITREPIERRE, THIVELLIER, D., ROFES-VERNIS J., ROUSSEAU, D., and TRICOT R. Microstructure and Hardenability of Low Alloy Boron- Containing Steels. Proceedings of a Symposium "Hardenability Concepts with Applications to Steel pp. 422-447. October 24-26, 1977.
8. Canadian Chain: [www.canadianchain.com/canchain/html/features.htm](http://www.canadianchain.com/canchain/html/features.htm)
9. Compañía Porsche: [www.porsche.com/PoPk-2html](http://www.porsche.com/PoPk-2html)
10. Compañía Ford: [www.digitel.net/ravenel/contour.html](http://www.digitel.net/ravenel/contour.html)