



Tema: Solidificação / Lingotamento

APERTURA DE PUNTA DURANTE LA LAMINACIÓN DE PRODUCTOS LARGOS: ¿CALIDAD DE PALANQUILLA O PROCESO DE LAMINACIÓN?*

Jorge Madías¹

Resumen

Durante la laminación de barras y alambrones para construcción civil; perfiles y ángulos estructurales y barras redondas y hexagonales de aceros de corte libre puede presentarse la apertura de la punta o la cola y el estallido central, con la consiguiente parada y caída de la productividad, y pérdida de rendimiento metálico. En este trabajo se analizan las diversas causas que confluyen para que este problema ocurra. Se analiza la influencia de posibles defectos en las palanquillas, las características del corte de las mismas y otros problemas de calidad. Se revisa el rol del precalentamiento previo a la laminación, la refrigeración de los cilindros, el diseño de pasadas y la respuesta del material en función de su ductilidad. Se presentan diversos casos industriales para ilustrar las diferentes razones detrás del problema de la apertura de punta.

Palabras clave: Palanquilla; Laminación; Apertura de punta; Ductilidad en caliente.

SPLIT ENDS DURING LONG PRODUCTS ROLLING: BILLET QUALITY OR ROLLING PROCESS?

Abstract

During rolling of rebar and wire rod, shapes, and free cutting round and hexagonal bars, split ends/alligatoring/central bursting may occur. This brings about a rolling mill delay, and losses in productivity and metallic yield. In this paper, the reasons behind this problem are analyzed. The influence of billet defects, billet cutting, and other quality problems is discussed. The role of reheating, roll cooling, pass design and billet ductility is discussed. Several cases are presented to illustrate the reasons behind this problem.

Keywords: Billet; Rolling; End splitting; Hot ductility.

¹ Ingeniero Metalúrgico, Director, Metallon, miembro de la ABM, San Nicolas, Buenos Aires, Argentina.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas que suelen presentarse durante la laminación de productos largos en trenes continuos o semi continuos, es la apertura de punta y/o cola, y el estallido central. En la figura 1 se presenta el aspecto típico de la apertura de punta en muestras de palanquillas laminadas. Se lo suele denominar también *boca de jacaré* en portugués y *alligatoring, end splitting* o *split ends* en inglés. Este fenómeno se suele presentar en las pasadas de desbaste de las palanquillas, particularmente en trenes abiertos. Afecta la producción de aceros de corte libre, aceros para barras de refuerzo de hormigón, alambrones y perfiles. También, aunque escapa al alcance de este trabajo, puede presentarse durante la laminación de productos planos.

A título de ejemplo, en la Figura 1 se presenta el aspecto de barras abiertas en la caja 10 de un laminador de barras de refuerzo de hormigón de Tata Steel Jamshedpur, que opera a partir de palanquillas de 130 x 130 mm, y del estado de las varillas al final de la laminación [1]. Como se puede ver, el problema puede dar lugar a un coble, con riesgo para la seguridad del personal que está en la plataforma del laminador, o puede generar un defecto crítico en las barras terminadas.

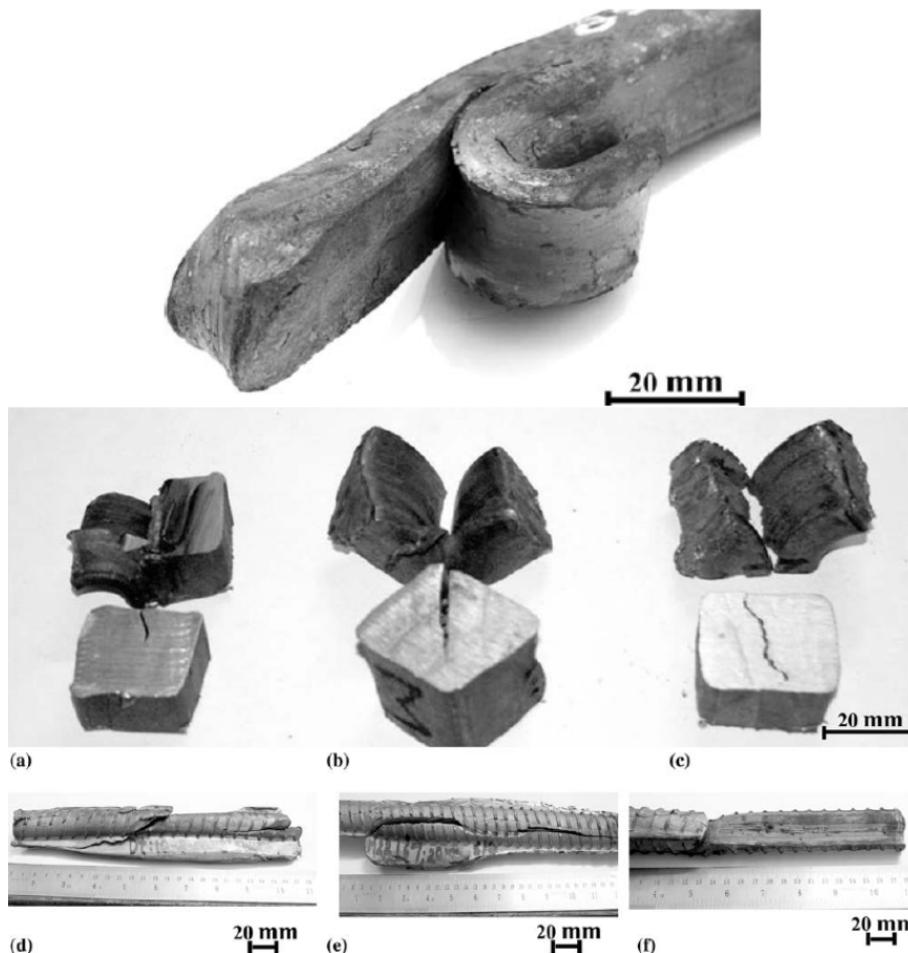


Figura 1. Arriba: aspecto típico de un extremo abierto de una barra con coble en la caja 10 de un laminador de Tata Steel que parte de palanquillas de 130 x 130 mm. Centro: otras barras con apertura de punta en caja 10. Abajo: barras laminadas afectadas, al final del proceso de laminación, caja 14 [1].

El estallido central se suele dar en forma simultánea con la apertura de punta o separadamente. Da también lugar a la formación de cobles. En la Figura 2 se

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



presenta el aspecto de este defecto (izquierda) y de un coble causado por el mismo, durante la laminación de barras de refuerzo de hormigón.



Figura 2. Apertura central durante la laminación de barras de refuerzo de hormigón. Derecha: Coble generado a partir de apertura central.

En este trabajo se analizan las posibles causas que dan origen a estos problemas, tanto en lo que hace a la calidad de las palanquillas que se someten a laminación, como con respecto a los problemas que lo pueden generar durante este último proceso.

2 CALIDAD DE PALANQUILLAS

Existen aspectos intrínsecos que afectan la ductilidad en caliente de las palanquillas, así como otros aspectos que tienen que ver con cómo se laminan. En este párrafo se discuten otros aspectos que pueden afectar la ductilidad en caliente, relacionados con la calidad de las palanquillas. Los aspectos que se suelen mencionar son la calidad del corte y la presencia de grietas groseras.

Respecto a los dos primeros factores, grietas y calidad de corte, una experiencia en una planta muestra que existe una sinergia entre ambos y una incidencia sobre la apertura de punta [2]. La presencia de una grieta central grosera (Figura 3), da lugar a la formación de un importante bajorrelieve (Figura 4, izquierda). Se verificó mediante la laminación de palanquillas en las que se introdujo artificialmente el defecto mediante soplete de oxígeno, que daban lugar a la apertura de punta durante la laminación (Figura 5).



Figura 3. Cortes transversales de palanquillas con grieta central grosera [2].

* *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.*



Figura 4. Clasificación del corte a soplete de la palanquilla desde el punto de vista de la apertura de punta en la laminación. Izquierda: Corte inaceptable, con alta propensión a generar apertura de punta, generalmente asociado a la presencia de una grieta central como la de la Figura 3. Centro: Corte intermedio, con media propensión a apertura de punta. Derecha: Corte satisfactorio, con baja propensión a apertura de punta [2].



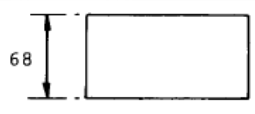
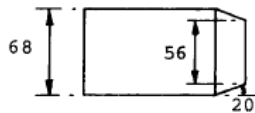
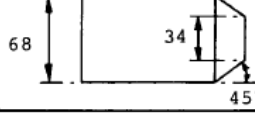
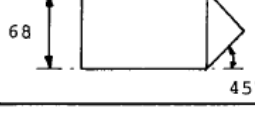
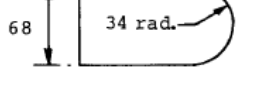
Figura 5. Palanquillas con defecto creado artificialmente en el corte transversal mediante soplete de oxígeno (izquierda) y barras con apertura de punta generada durante la laminación de las palanquillas con defecto artificial [2].

Una investigación inglesa de mediados de los 80, que es la más detallada con respecto a la apertura de punta, y se centra en los aceros resultados y al plomo, incluye un estudio detallado de la influencia del corte [3]. La investigación se basa en ensayos en un laminador piloto, en que se le laminaban barras de $\text{Ø } 68 \text{ mm } 200 \text{ mm}$ de longitud. La tendencia a la apertura de punta se evaluaba en función de cuántas pasadas soportaba el material sin abrirse, sobre un total de quince pasadas. En este caso se probaron cortes con cizalla, oxicorte y a sierra, cortes revestidos con aleaciones metálicas y con cemento y cortes con formas determinadas.

Curiosamente, con los cortes a cizalla había menos tendencia a la apertura de punta que con los cortes con sierra. Un estudio metalográfico sugirió que la razón era que en la zona del corte con cizalla, por el efecto de la deformación, los sulfuros no estaban alineados longitudinalmente: quedaban a un ángulo de 45° con respecto a la dirección de laminación, con lo que se inhibía la iniciación y propagación de grietas en el extremo de la barra.

Con respecto a los cortes con forma, las barras con extremo cortado a 45° y las que tenían la punta redondeada completaban la secuencia sin abrirse, mientras que las cortadas con sierra o las con extremo cortado a 20° se abrían en la sexta pasada (ver Figura 6). Se argumentó que en las primeras había resistencia a formar un extremo cóncavo, concentrador de tensiones, lo que prevenía la iniciación de la grieta y su propagación.

* *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.*

Bar End Profile Dimensions in mm	Sulphur Content, %	Initial Rolling Temps., °C	No. of Passes to Splitting
	0.38	1060	6
	0.38	1082	6
	0.38	1105	15*
	0.38	1076	15*
	0.38	1077	15*

* Completed the maximum number of passes without splitting

Figura 6. Ensayos en laminador piloto con barras de acero de corte libre, con extremo redondeado cortado con sierra o maquinado con diversas formas [3].

Estos ensayos si bien no tienen una aplicación práctica concreta, ya que introducir otro corte que no sea a soplete y en forma plana complicaría la operación, muestran que el tipo y la forma del corte influyen en la tendencia a la apertura de punta, facilitándola o dificultándola. También se verifica que la alineación de los sulfuros tiene un papel importante.

Se ha mencionado las grietas centrales groseras como un factor importante en la calidad del corte y la tendencia a la apertura de punta. Se trata de un defecto producido durante la solidificación, por tensiones mecánicas y/o térmicas que superan la resistencia del material, en dos caras opuestas, correspondientes en este caso al radio interno y externo de la máquina, y que se continúan hasta el centro de la palanquilla (Figura 3). Las grietas de solidificación están usualmente en posiciones interdendríticas y en ellas se suelen encontrar abundantes sulfuros de manganeso.

Otras grietas groseras generadas durante la solidificación, cuya presencia se ha asociado a la apertura de punta son las grietas diagonales, ver Figura 7. Estas grietas suelen estar asociadas a romboidicidad pronunciada [4].

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.

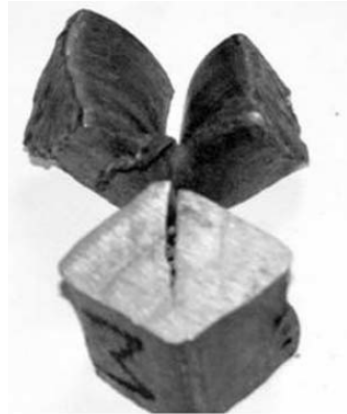


Figura 7. Apertura de punta asociable a una grieta diagonal previa en la palanquilla [1].

Como la apertura de punta o cola se produce siempre en el plano correspondiente al espacio entre cilindros, cabe suponer que en la pasada donde el fenómeno se desarrolla debe haber una coincidencia, aunque sea parcial, entre el plano de la grieta y el del espacio entre cilindros (ver Figura 8, izquierda).

Cabe mencionar que en muchos casos no es posible asociar la apertura de punta con defectos groseros en la palanquilla. En la figura 8 se presentan dos cortes de una barra de acero de corte libre al plomo con apertura de punta, uno en la zona donde la apertura está ya desarrollada (izquierda) y otro inmediatamente anterior a la apertura (derecha), donde luego de un ataque con reactivo de Oberhoffer se observa la estructura remanente de la solidificación, que no presenta defecto alguno.

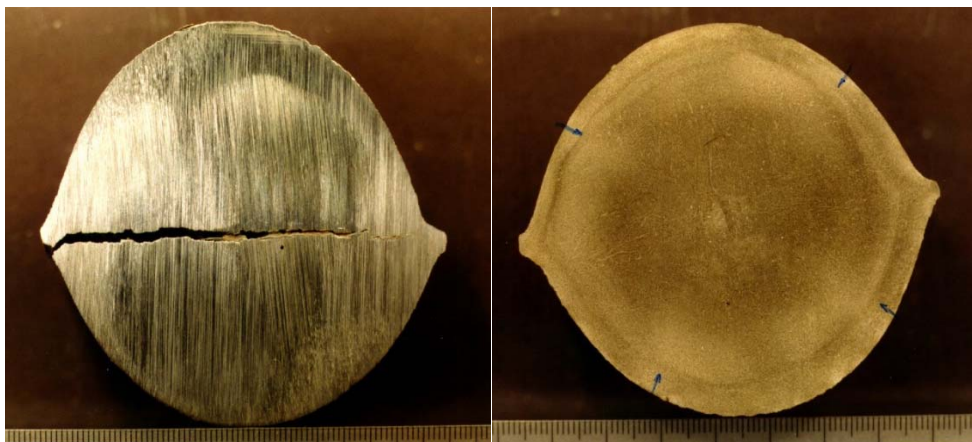


Figura 8. Barra de acero de corte libre al plomo de 70 mm de diámetro con apertura de punta. Se observa que la grieta se forma en el plano de simetría del espacio entre cilindros. Izquierda: corte transversal en la zona de inicio de la apertura. Derecha: corte transversal pulido y atacado con reactivo de Oberhoffer. Se observa la macroestructura remanente de la solidificación, incluyendo la primera capa solidificada, sin presencia de defectos groseros que pudieran interpretarse como precursores de la apertura. Las marcas en azul corresponden a la posición original de los cantos de la palanquilla de 120 x 120 mm que estaba siendo desbastada, detectada por el cambio de dirección de los granos columnares.

3 PROCESO DE LAMINACIÓN

En este párrafo se analiza la ductilidad en caliente de los aceros, como un factor relevante para la apertura de punta, y cuatro aspectos relacionados que influyen sobre la apertura de punta: el tenor de azufre, el control de las temperaturas, el diseño de pasadas y problemas de guiado.

* *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.*



3.1 Ductilidad en Caliente

Se admite en general que la ocurrencia de la apertura de punta y cola y el estallido central depende de que el material soporte los esfuerzos a que es sometido en el laminador. En ese sentido, cuanto menos grietas internas estén presentes estará en mejores condiciones de sufrir los esfuerzos. A su vez, cuanto menores sean los esfuerzos a que se ve sometido en el laminador, menor será el riesgo de ocurrencia de la apertura.

La capacidad de soportar los esfuerzos se puede definir en base a la ductilidad en caliente, medida mediante ensayos de torsión, tracción o compresión en caliente. Por ejemplo, en la Figura 9 se presentan curvas de ductilidad en caliente para diversos aceros al carbono y de corte libre, obtenidas por torsión. En este caso la variable que se tiene en cuenta es el número de vueltas hasta la rotura de la probeta. El ensayo se realiza a una determinada velocidad de deformación, que varía según se desee reproducir las condiciones del desbastador, el intermediario o el terminador.

Se puede observar, de acuerdo a la Figura 9 (arriba), que los aceros de bajo carbono normales presentan una ductilidad muy alta, dentro de un amplio rango de temperaturas, que se extiende hasta temperaturas más elevadas que las usuales en laminación. Esto hace que estos aceros no sean proclives a presentar defectos relacionados con falta de ductilidad. Los aceros de alto carbono, por su parte, tienen una ductilidad máxima menor y dentro de un rango de temperaturas más bajo.

Los aceros de bajo carbono de corte libre (Figura 9, abajo) suelen estar apenas por encima del límite de trabajabilidad en caliente, que se considera que es 1,7 vueltas hasta la rotura, y generalmente a una temperatura elevada. Esto refleja el rol del azufre en la caída de la ductilidad en caliente.

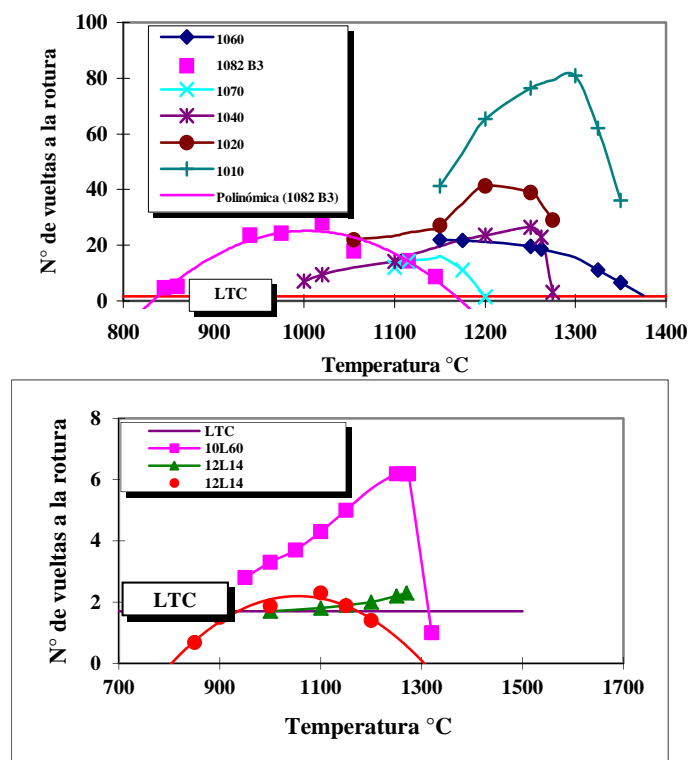


Figura 9. Curvas de ductilidad en caliente, medida por el número de vueltas hasta la rotura durante ensayos de torsión a diversas temperaturas, para una dada velocidad de deformación. Arriba: aceros al carbono. Abajo: aceros de corte libre [5].

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



3.2 Efecto del Azufre

La gran diferencia de ductilidad en caliente entre los aceros de bajo carbono normales y resulfurados pone de manifiesto el rol del azufre en la ductilidad en caliente. El azufre se encuentra en solución en el acero líquido, y forma sulfuros de manganeso sólo durante la solidificación. La razón es que el producto de solubilidad del sulfuro de manganeso en el acero líquido es elevado, por lo que las altas concentraciones de Mn y S necesarias para formar el MnS se alcanzan recién en el líquido interdendrítico enriquecido en soluto:

$$\log [\%Mn] [\%S] = - 8194/T + 4,96$$

Si el manganeso es insuficiente, pueden formarse oxisulfuros y sulfuro de hierro que por su punto de fusión (1190 °C) pueden originar fragilidad en caliente. La relación Mn/S necesaria para evitar la formación de oxisulfuros y sulfuro de hierro es menor cuanto mayor es el contenido de azufre (Figura 10).

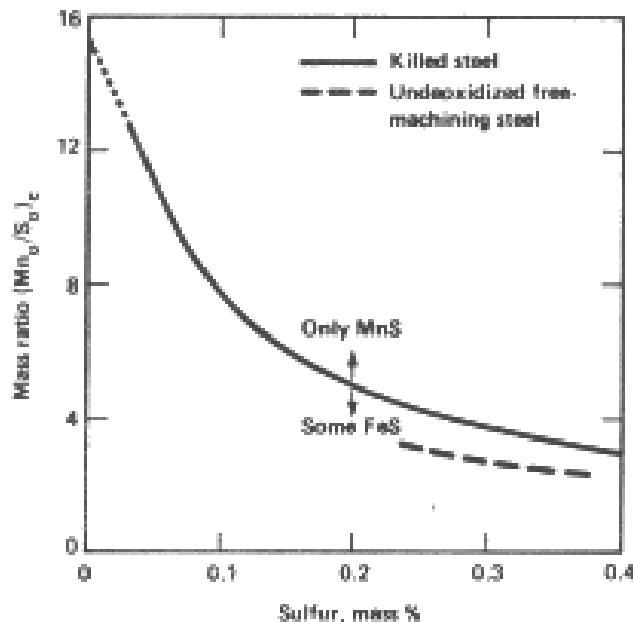


Figura 10. Influencia del contenido de S sobre la relación Mn/S necesaria para evitar la formación de sulfuro de hierro [6].

Aun cuando no haya oxisulfuros o sulfuro de hierro, los sulfuros de manganeso pueden disminuir la ductilidad en caliente de los aceros. La forma que adoptan los sulfuros durante la solidificación está influenciada por la actividad del oxígeno disuelto en el acero. Se clasifican como tipo I, II y III (Figura 11). Si el contenido de oxígeno es elevado, se forman sulfuros del tipo I, también denominados sulfuros globulares, de gran tamaño, generalmente ubicados en los espacios interdendríticos, y acompañados a veces por óxido de manganeso, en cuyo caso se los denomina oxisulfuros. Estos sulfuros globulares son los deseados para los aceros de corte libre. Con un contenido de oxígeno intermedio, se forman los sulfuros del tipo II, formando una red en los bordes de los granos, por lo que también se los llama sulfuros intergranulares. Los sulfuros del tipo III se forman con tenores de oxígeno disuelto bajo, típico de los aceros calmados al aluminio.

Se ha relacionado la presencia de los sulfuros del tipo II, que en los cortes longitudinales de productos laminados se presentan como cadenas de sulfuros

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



alineados, como un factor que favorece la apertura de punta [8]. Sin embargo, su presencia es difícil de evitar en las condiciones de solidificación de los aceros calmados al silicio–manganeso usuales para productos para la construcción.

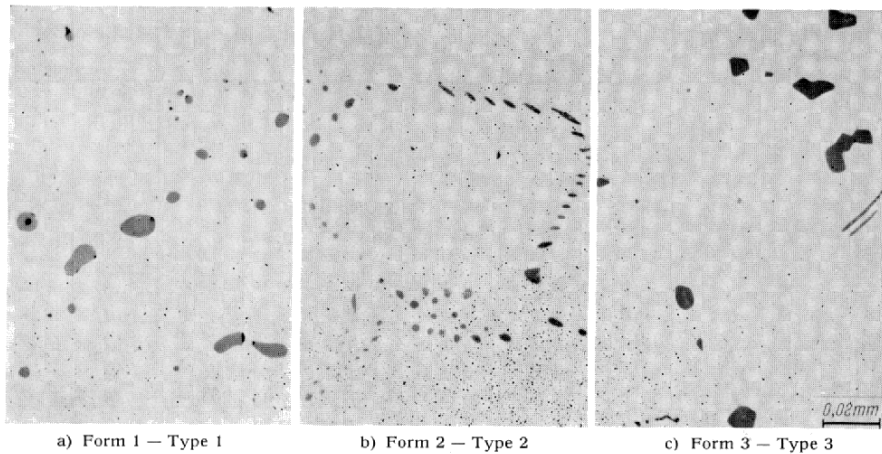


Figura 11. Sulfuros tipo I (izquierda), tipo II (centro) y tipo III (derecha), de acuerdo a la clasificación de Sims [7].

El rol del azufre en la apertura de punta estuvo claramente presente en el estudio con laminador piloto antes mencionado, ver Figura 12. Se observa que a medida que el tenor de azufre es más elevado, el número de pasadas hasta que se produce la apertura de punta es menor [3].

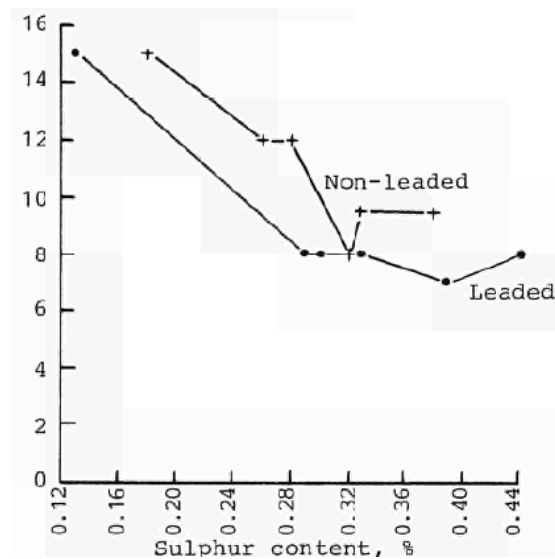


Figura 12. Influencia del contenido de azufre sobre la cantidad media de pasadas sin apertura de punta en laminador piloto, para barras de aceros con plomo y sin plomo [3].

3.3 Control de la Temperatura

Las curvas de ductilidad en caliente muestran claramente la necesidad de trabajar dentro de un rango de temperaturas definido, para cada tipo de acero. Los resultados de los ensayos en el laminador piloto son también expresivos (ver Figura 13). Sólo aquellas barras que fueron laminadas a la temperatura más elevada no presentaron apertura de punta.

* *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.*



Debe remarcarse que además de la fijación y obtención de una temperatura superficial adecuada al tipo de acero que se está laminando, es importante también que no haya caídas de temperatura en determinadas pasadas, en relación por ejemplo a una refrigeración de cilindros que se haya desplazado. Una situación de este tipo ocurrió recientemente en una planta latinoamericana durante la laminación de barras, dando lugar a la apertura de punta.

Otro aspecto que remarca la incidencia de la temperatura de la punta es el hecho de que en algunos casos, para los aceros de corte libre se ha utilizado un quemador auxiliar para el calentamiento de la punta de la palanquilla, o inductores electromagnéticos en posiciones intermedias del laminador.

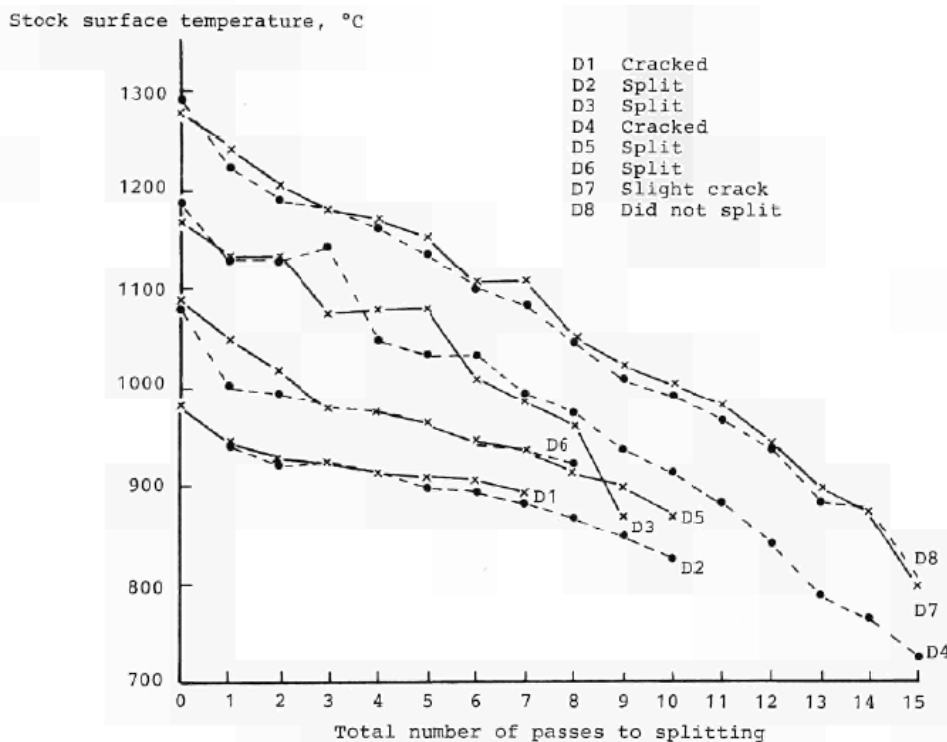


Figura 13. Influencia de la temperatura superficial de la barra sobre la tendencia al agrietamiento o a la apertura de la punta [3].

3.4 Diseño de Pases

En los ensayos a escala piloto, la tendencia a la apertura resultó mayor para reducciones elevadas, mayores diámetros de los rodillos y mayor fricción entre la barra y el rodillo mencionados, se llegó a las siguientes conclusiones:

Los diseños de pasada menos susceptibles a la apertura de punta fueron las pasadas planas, caja-caja, cuadrado a redondo y oval a redondo. La pasada más propicia para la apertura de punta fue la de oval a cuadrado. Se fundamentaron estas conclusiones en base a la evaluación de la uniformidad de la deformación en la sección transversal y la existencia de tensiones de tracción o de compresión.

Otro abordaje al análisis de este problema es el de los modelos matemáticos desarrollados que analizan la apertura de punta y el estallido central en la laminación plana. A título de ejemplo, se presenta un gráfico que determina las condiciones para que ocurran ambos fenómenos, en función de variables del diseño de la pasada (Figura 14).

* *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.*

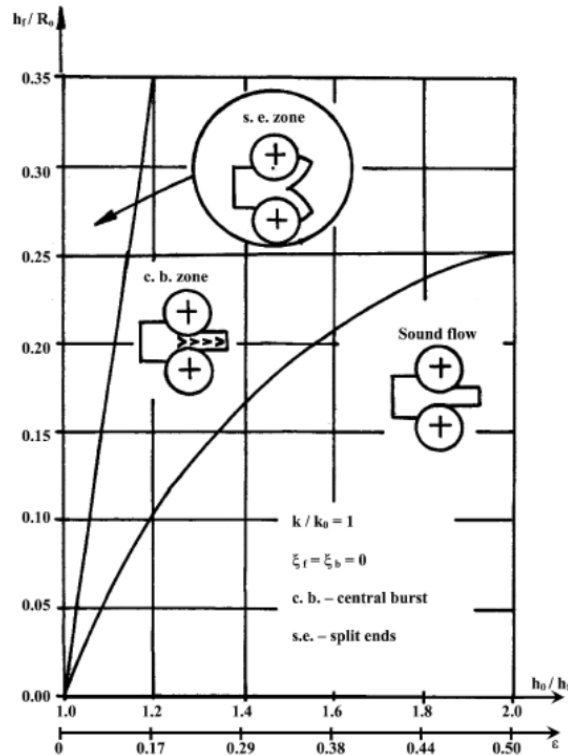


Figura 14. Zonas de riesgo para la apertura de punta y el estallido central durante la laminación. h_0 y h_r : espesor de la barra a la entrada y la salida de la caja; R_0 : radio del cilindro; ϵ : reducción relativa; k : valor medio del límite de fluencia; ξ_f y ξ_b tensiones relativas en salida y entrada [1].

El rango de condiciones para el que podría ocurrir el estallido central sería bastante más amplio que para que ocurra la apertura de punta. La tendencia a la apertura y el estallido es mayor cuando el diámetro de rodillos es menor y cuanto menor es el porcentaje de reducción.

Otros modelos realizados con fundamentos similares obtienen resultados coincidentes [9]. Por ejemplo, en la Figura 15 se presenta la zona de riesgo de formación de apertura de punta, en función de la reducción del espesor y la relación entre el espesor inicial y el radio del cilindro, para diferentes diámetros de cilindro (izquierda) y diferentes coeficientes de fricción entre el cilindro y el material laminado (derecha).

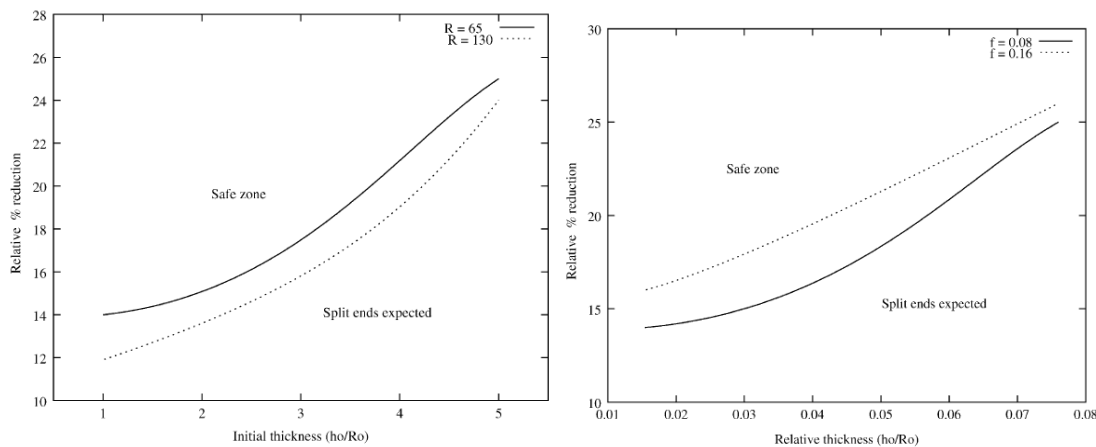


Figura 15. Izquierda: Límite entre zona segura y zona insegura para diferentes radios de cilindro, usando el criterio de tensión hidrostática para apertura de punta. Acero SAE 1090. Derecha: Ídem para diferentes condiciones de fricción. Radio de cilindro: 65 mm [9].



En este caso se observa también que la tendencia a la apertura de punta es mayor cuando el diámetro de rodillos es menor y cuanto menor es el porcentaje de reducción. Adicionalmente, un coeficiente de fricción entre el cilindro y la barra más elevado aumenta el riesgo.

Estas condiciones aparentemente contradicen los resultados de [3]. En ensayos con plastilina, en los que se generaba una grieta en el extremo y se procedía a laminar la pieza con cilindros de diferentes diámetros, midiendo posteriormente la dimensión de la apertura de punta, se obtuvo que la apertura era mayor para las barras laminadas con cilindros de mayor diámetro (Figura 16).

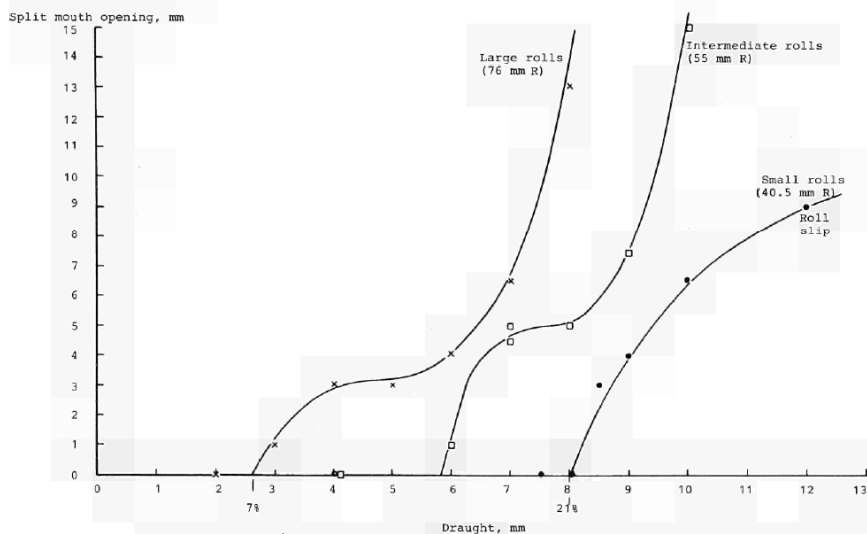


Figura 16. Apertura de punta en función de la diferencia entre el espesor inicial y final de la barra para diferentes diámetros de rodillo, en simulaciones con plastilina con ranura de 40 mm de profundidad en la punta [3].

Lo mismo sucede con respecto a la reducción. Mientras los modelos de cálculo arrojan la conclusión de que (en laminación plana) el riesgo es mayor cuando la reducción es menor, los ensayos de laminación piloto muestran un resultado opuesto (Figura 17).

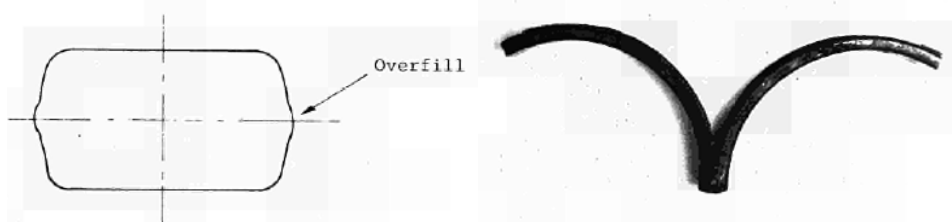


Figura 17. Sobrellenado en pasada caja con 35% de reducción y consecuente apertura de punta en laminación piloto [3].

3.5 Problemas de guiado

Suele presentarse apertura de punta en relación con problemas en el guiado de barras, cuando hay que hacer virado de las pasadas. Por ejemplo, cuando en una pasada cuadrada que entra en un óvalo, la punta no entra en posición plana sino en diagonal, debido a una dificultad con el guiado, sufre una deformación mayor, que luego de varias pasadas puede producir apertura de las puntas [10].

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



4 CONCLUSIONES

La apertura de punta sucede porque el material no tiene la ductilidad suficiente para soportar los esfuerzos a los que se ve sometido. Esto puede deberse a diversas razones. Las grietas groseras en las palanquillas, tales como las grietas centrales y las diagonales, debilitan significativamente el material, particularmente cuando el plano en que se ubica coincide en parte con el plano de simetría entre los cilindros. La ductilidad en caliente de los aceros depende por un lado de sus características intrínsecas, y por otro lado de la temperatura a la que son sometidos a deformación y de la velocidad con que ésta sucede.

Es importante que los aceros se laminen dentro del rango en que presentan alta ductilidad. Esto en general es seguido de cerca, y es más crítico para aquellos aceros que presentan una baja ductilidad inherente, como los aceros de corte libre.

El rol de las cadenas de sulfuros de manganeso es también claro; sin duda un bajo tenor de azufre, siempre que la especificación lo permita, es favorable. Sin embargo hay que acotar que si la condición de la máquina es adecuada y no hay tensiones térmicas y mecánicas excesivas, no son necesarias relaciones Mn/S exageradamente altas.

Debe recordarse que la punta y la cola de la barra laminada pierden temperatura más rápido que el resto de la barra. Otro factor importante es la refrigeración de cilindros, que debe estar correctamente orientada, no ser excesiva y mantenerse en posición a lo largo de todo el proceso.

En otros factores como el diseño de pasadas, los estudios existentes presentan algunos resultados contradictorios. Hay coincidencia en que una mayor fricción entre los cilindros y la barra favorece la apertura, pero en otros factores como el diámetro de los cilindros y el porcentaje de reducción no hay acuerdo. Sobre la base de resultados de laminación piloto, parecen favorables para evitar la apertura las pasadas planas, caja-caja, cuadrado a redondo y oval a redondo, en tanto que la pasada más propicia para la apertura es la oval a cuadrado.

REFERENCIAS

- 1 Pandey JC, Raj M, Choubey PN. Split ends and cracking problem during hot rolling of continuously cast billets. *Journal of Failure Analysis and Prevention* (2009), 9, pp. 88-96.
- 2 Batista Dos Santos J, Schultz E, Silva MA, Fernandes Lima R. Redução da incidência do defeito de ponta aberta na linha leve da ArcelorMittal Cariacica. 49º Seminário de Laminção da ABM, outubro de 2012, Vila Velha, Brasil, p. 211-221.
- 3 Taylor G, Mayland K, Bagshaw PA, Ingham PM. The cause of end splitting during the rolling of free cutting steels. Commission of European Communities Report EUR 10156, 153 pages, 1986.
- 4 Madias J. Uma revisão do problema de romboidade no lingotamento contínuo de tarugos. 43º Seminário de Aciaria – Internacional, maio de 2012, Belo Horizonte, Brasil, p. 86-98.
- 5 Tormo J, Gerra D. Ductilidad en caliente de aceros para barras y alambres. Jornadas Metalúrgicas SAM 1997, Argentina.
- 6 Turkdogan ET. Consequences of microsegregation during solidification of steel: subsurface-blowhole formation, oxysulfide, and sulfide precipitation. Fifth International Iron and Steel Congress, Process Technology Proceedings, 1986, pp. 767-775.
- 7 Dahl W, Hengstenberg H, Duren C. Conditions de formation des divers types d'inclusions de sulfures. *Stahl und Eisen* 86 (1966) Nr. 13 30, Juni 782-795.

* *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.*



- 8 Dutta B, Mohanty SC, Mukherjee T. Manufacture of Free Cutting Steels in an Integrated Steel Plant. Transactions Indian Institute of Metals, Vol. 36, No. 4, August 1982, 376-381.
- 9 Rajak SA, Reddy NV. Prediction of internal defects in plane strain rolling. Journal of Materials processing Technology 159 (2005) pp. 409-417.
- 10 Wolkowicz P. Comunicación privada, diciembre de 2013.

* *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.*