

EVOLUCIÓN DE LAS INCLUSIONES DURANTE EL PROCESO DE TREFILADO EN ACEROS PERLÍTICOS

R. Rodríguez¹, F. J. Ayaso¹, M. Lorenzo² y J. Toribio¹

¹Ingeniería de Materiales, Universidad de Salamanca
E.P.S., Campus Viriato, Avda. Requejo, 33, 49022 Zamora. España.
Tel: 980 54 50 00; Fax: 980 54 50 02, Correo-e: rociorg@usal.es

²Ingeniería Mecánica, Universidad de Salamanca.
E.T.S., Ingeniería Industrial, Avda. Fernando Ballesteros 2, 37700 Béjar (Salamanca).
Tel: 923 40 80 80; Fax: 923 40 81 27, Correo-e: mlorenzo@usal.es

RESUMEN

En el presente artículo se estudia la evolución de una inclusión durante el trefilado. Dicho estudio se divide en dos partes: primero, se caracteriza la evolución de las inclusiones mediante análisis visual de las micrografías (obtenidas con el microscopio electrónico de barrido) de los diferentes alambres que componen los distintos pasos de la cadena real de trefilado. La información obtenida mediante inspección visual se completa con una estimación cuantitativa de las dimensiones de la inclusión, utilizando un programa de análisis de imagen (AnaliSYS 3.1[®]). La segunda parte de este estudio se basa en la simulación, mediante el método de los elementos finitos (MEF), del proceso de trefilado de aceros con dichas microestructuras.

ABSTRACT

In the present paper the evolution of an inclusion during wire drawing is studied. The study is divided into two parts: firstly, the evolution of an inclusion is characterized by visual analysis of micrographs (obtained with scanning electron microscope) of different wires that compose the different steps of a real wire drawing chain. The information obtained by visual inspection was completed with a quantitative estimation of inclusion dimensions by using an image analysis software (AnaliSYS 3.1[®]). The second part of present study is based in simulation, by means of the finite element method (FEM), of the wire drawing process of steels with these microstructures.

PALABRAS CLAVE: Acero perlítico, Inclusiones, Trefilado.

1. INTRODUCCIÓN

El trefilado produce cambios micro-estructurales en el acero, cambios tales como una re-orientación de las colonias de perlita y de las láminas que las conforman en la dirección del eje longitudinal del alambre, una disminución progresiva del espaciado interlaminar, y un aumento en la esbeltez de las colonias [1,2]. Cabe destacar la existencia de colonias cuyas láminas no se han orientado en la dirección del proceso de trefilado (*pseudocolonias perlíticas*), las cuales presentan un espaciado interlaminar anómalo [3,4]. En la microestructura del acero se pueden encontrar inclusiones que se pueden clasificar por su origen, tamaño y composición [5]. En el acero objeto de estudio se han observado multitud de inclusiones, entre las cuales destacan por su composición algunos óxidos, silicatos, sulfuros de manganeso, carburos y en menor proporción nitruros [6]. Estas inclusiones presentes en el acero van a sufrir cambios a lo largo del proceso de trefilado, cambios que pueden tener su influencia en el posterior comportamiento en fractura del acero [7]. Algunos investigadores han estudiado la influencia de estas inclusiones en la iniciación de la fisura generada por fatiga [8] pero, en su mayoría, los estudios concernientes a éstas se centran en la distribución y la

morfología de las mismas [9]. La tendencia actual de las investigaciones acerca de dichas microestructuras se centra en la respuesta, a nivel tensional, de las mismas en los distintos procesos de fabricación del acero [10].

En el presente artículo se estudian los cambios micro-estructurales sufridos por las inclusiones a lo largo del proceso de trefilado que puedan tener una posterior influencia en la fractura de los aceros pertenecientes a los distintos pasos del proceso de trefilado. Para poder realizar un estudio de la evolución de dichas inclusiones ha sido necesario partir de la caracterización de éstas. En estudios anteriores las inclusiones presentes en este tipo de acero se dividen en tres grupos, a partir de su composición química, el primer grupo son los sulfuros, el segundo está compuesto por los óxidos y el último por silicatos. Las inclusiones formadas por sulfuros, inclusiones blandas, soportan mucha deformación, presentándose normalmente sulfuro de manganeso como principal componente. Los óxidos que se presentan como inclusiones, al contrario que los sulfuros, no admiten deformación, siendo éstos frágiles y de gran dureza. El tercer grupo, formado por silicatos, presenta comportamientos intermedios a los dos anteriores [6].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el siguiente estudio se ha empleado acero perlítico eutectoide perteneciente a una cadena real de trefilado formada por siete hileras de trefilar, analizando desde el alambroón inicial, alambre que no ha sido sometido a ningún paso del proceso de trefilado, hasta el alambre de pretensado comercial. La nomenclatura utilizada para identificar los alambres analizados consta de una letra (en este caso acero tipo B o E, dependiendo de la familia a la cual pertenezca), que identifica la composición del acero (Tabla 1), y de un número representativo del paso de trefilado al que pertenece el alambre en cuestión: el número 0 para el alambroón inicial, 7 para el producto final, y los números del 1 al 6 para identificar los alambres correspondientes a los pasos intermedios.

Tabla 1. Composición química de los aceros B y E (%).

	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr	V
B	0.79	0.07	0.23	0.01	0.01	0.003	0.27	0.08
E	0.79	0.68	0.21	0.01	0.01	0.003	0.22	0.06

Para el estudio de las inclusiones, en las dos familias de acero, se han realizado micrografías de las mismas en el alambroón inicial, así como en los alambres del segundo, cuarto, sexto y último paso del proceso de trefilado. En el estudio de los aceros analizados se ha determinado la gran cantidad de inclusiones que presentan las muestras pertenecientes a los alambres de la familia E, al contrario de lo que sucede en los alambres examinados de la familia B. Una vez observado este hecho en varias pruebas se ha decidido analizar el factor de forma de las inclusiones que se encuentran en los alambres pertenecientes a la familia E, pues aportan un mayor tamaño de muestra.

Las inclusiones elegidas para dicho análisis se han dividido en tres grupos, según su resistencia en comparación con la matriz perlítica circundante. Las inclusiones se dividen en duras (normalmente grupo formado por óxidos y por carburos), con mayor resistencia que la matriz perlítica, blandas (sulfuros) e inclusiones mezcla (inclusiones con óxidos y sulfuros bien definidos). Estas últimas se han analizado debido a que se presentan en mayor número que los silicatos u otro tipo de inclusiones, además de por la curiosidad de presentar los dos tipos de clasificaciones anteriores en la misma. Dichas inclusiones están formadas por óxidos, principalmente de hierro, rodeados por sulfuro de manganeso (distinguiéndose ambas inclusiones de forma clara dentro de la misma).

En la segunda parte de este estudio se simula mediante la utilización del método de los elementos finitos (MEF) el proceso de trefilado basado en estudios previos. Debido a la simetría de revolución tanto del alambre como de la hilera de trefilado el problema se puede simplificar a un caso axisimétrico tomando como eje de simetría el eje del alambre [11].

3. RESULTADOS

3.1. Análisis visual y cálculo del factor de forma.

Una vez obtenidas las micrografías y seleccionadas según el tipo de inclusión se procede a la medición de las mismas, mediante el programa AnalSYS. 3.1®.

Para el estudio del factor de forma de las inclusiones a lo largo del proceso se ha aproximado la morfología de la inclusión a una elipse. De este modo, en las inclusiones se ha medido el eje mayor (2a), paralelo a la dirección de trefilado, representado en la Figura 1.

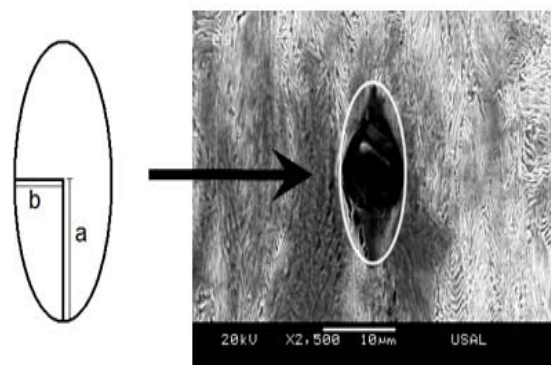


Figura 1. Aproximación de la inclusión a una elipse.

Una vez medido dicho eje de la elipse en las distintas micrografías se ha tomado la medida de la superficie de la inclusión. Con dicha superficie y la medida del eje mayor de la elipse, 2a, se obtiene el eje menor utilizando la siguiente ecuación:

$$S = \pi \times a \times b \quad (1)$$

siendo a y b los semiejes de la elipse y S la superficie del micro-defecto: la superficie de la inclusión o, en el caso de no coincidir, del hueco generado por la misma. El estudio se centra en la superficie del defecto por ser ésta la suma de la inclusión y la micro-fisura generada. Una vez obtenidos estos datos se procede a calcular el factor de forma de las inclusiones (a/b), realizando la media y la desviación típica de los distintos factores de forma obtenidos en los diferentes pasos del proceso.

En las inclusiones, en las cuales se presentaba una descohesión de la matriz perlítica debido al proceso de trefilado, se ha medido la superficie de micro-defecto generado, la cual engloba la inclusión (S). En aquellas en la que la interfase perlita-inclusión permanece unida se ha medido únicamente la superficie de la inclusión. Las mediciones obtenidas, es decir las medias del factor de forma de las distintas inclusiones, se encuentran recogidas en la Tabla 2. Para poder comparar dichas medidas se ha realizado un tratamiento estadístico de los datos obtenidos, no siendo en ningún caso la desviación típica superior a 2.

Tabla 2. Medias aritméticas del factor de forma

	E0	E2	E4	E6	E7
Duras	1.371	1.820	1.956	2.852	3.058
Blandas	3.280	5.966	7.034	9.117	11.763
Mezcla	2.317	6.953	7.013	7.224	7.870

En las micrografías pertenecientes al alambroón inicial se han observado inclusiones con deformaciones previas al trefilado que pueden atribuirse al proceso previo de laminación en caliente [10].

Para poder dilucidar los cambios en la morfología de las inclusiones se han representado los datos en las Figuras 2-4 correspondientes a cada tipo de inclusión, en las cuales se muestran no sólo la media aritmética sino también la desviación típica.

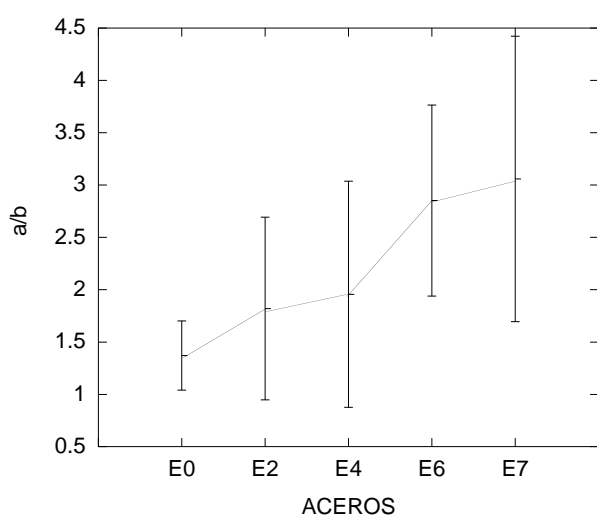


Figura 2. Evolución del factor de forma en inclusiones duras.

En la Figura 2 se muestra una evolución del factor de forma de las inclusiones de tipo duro y los micro-defectos que generan. Aún siendo más resistentes que la matriz perlítica que las rodea, aumentan su esbeltez durante el trefilado debido a la generación de microfisuras orientadas en la dirección de dicho proceso.

Las inclusiones de tipo blando y los micro-defectos generados por las mismas se comportan de igual forma que las duras, aumentando su esbeltez a lo largo del proceso, sin embargo dicho aumento es más acentuado en las blandas. En la Figura 3 se pueden observar aumentos mucho mayores del factor de forma que en las inclusiones duras.

En las inclusiones tipo mezcla, Figura 4, se observa un comportamiento análogo a los dos tipos de inclusiones anteriores, aumentando su esbeltez a lo largo del proceso de trefilado. Dicho aumento es muy similar al de las inclusiones tipo blando, resultado el cual cabía esperar puesto que la inclusión en contacto con la matriz perlítica es una inclusión de tipo blando.

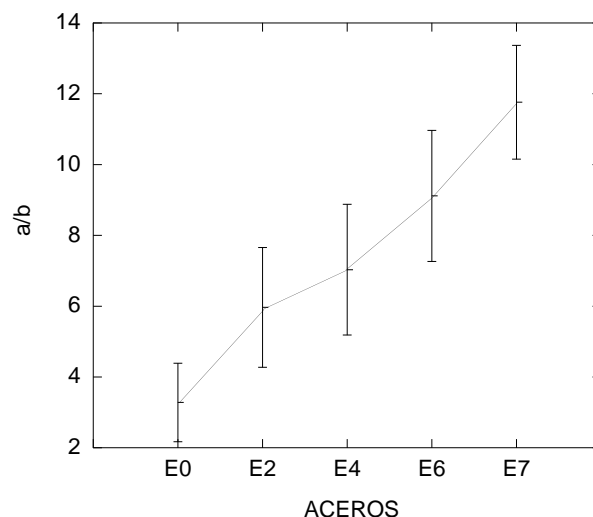


Figura 3. Evolución del factor de forma en inclusiones blandas.

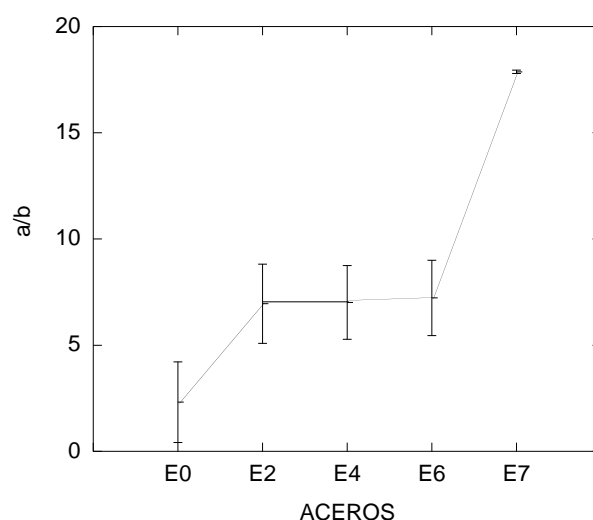


Figura 4. Evolución del factor de forma en inclusiones mezcla.

3.2. Simulación mediante el MEF.

La simulación mediante el MEF de la inclusión a lo largo del proceso de trefilado se ha realizado utilizando el programa M.S.C.Marc®. Los parámetros mecánicos de dicho proceso se detallan en estudios previos [11]. Para el estudio de la evolución de las inclusiones a lo largo del proceso, éstas fueron incorporadas en el centro del alambre, simulándose de esta forma un elipsoide de revolución. La morfología descrita coincide con la aproximada para la medición del factor de forma de los distintos tipos de inclusiones presentes en los aceros objeto de estudio.

La malla utilizada en la simulación mediante el MEF se muestra en la Figura 5. Las dimensiones de las inclusiones utilizadas en los cálculos fueron las medias obtenidas en los alambrones.

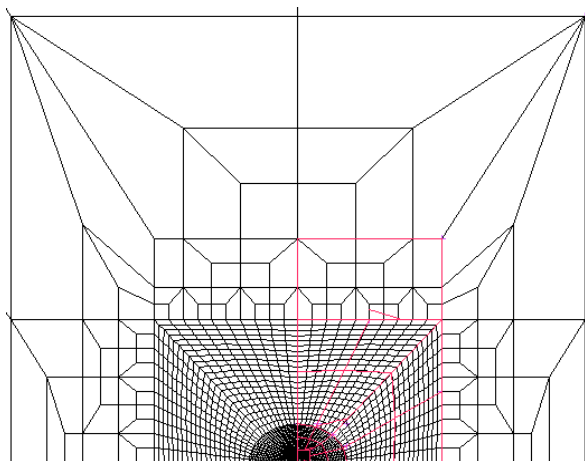


Figura 5. Representación de la malla perteneciente a la inclusión de tipo duro.

El comportamiento mecánico impuesto a las inclusiones duras se ha modelizado utilizando las características mecánicas de la alúmina (óxido de aluminio). El comportamiento mecánico de la inclusión tipo mezcla se ha aproximado teniendo en cuenta la respuesta visual observada en las micrografías a lo largo del proceso de trefilado, siendo estas inclusiones menos resistentes que la matriz perlítica. Las características geométricas y los parámetros mecánicos se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros geométricos y mecánicos de las distintas inclusiones.

	Duras	Blandas	Mezcla (óxido)
a (μm)	1.6	1.6	1.6 (0.3)
b (μm)	1.25	0.496	0.496 (0.165)
E (MPa)	352	160	160 (352)
ν	0.24	0.32	0.32 (0.24)

Los cálculos se han realizado con dos tipos de interfase entre la matriz perlítica y la inclusión, uno de ellos suponiendo la inclusión totalmente unida a la matriz y el otro completamente desunida.

4. DISCUSIÓN

En el análisis visual de la evolución de las inclusiones y los micro-defectos generados, realizado por medio de las micrografías pertenecientes a los distintos pasos del proceso de trefilado, se muestra la tendencia de los distintos tipos de inclusión a lo largo de dicho proceso.

En las Figuras 6, 7 y 8 se muestra la evolución de las distintas inclusiones mediante algunas de las micrografías obtenidas. Se puede observar como, a medida que se avanza en el proceso de trefilado, la matriz perlítica circundante se despegue de las inclusiones de tipo duro generando micro-cavidades a ambos lados de éstas. Las micro-cavidades van a estar orientadas en la dirección del proceso de trefilado, evidenciando que son consecuencia del mismo.

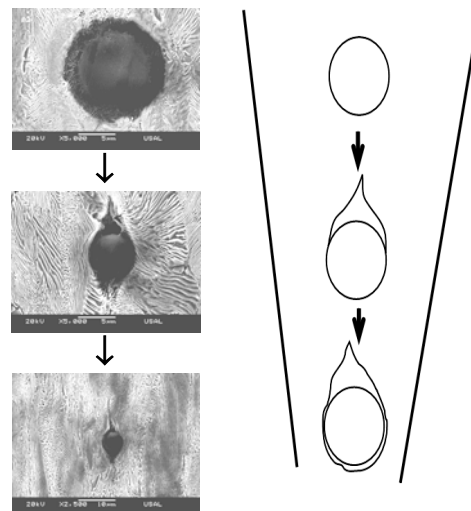


Figura 6. Evolución de las inclusiones de tipo duro durante el proceso de trefilado.

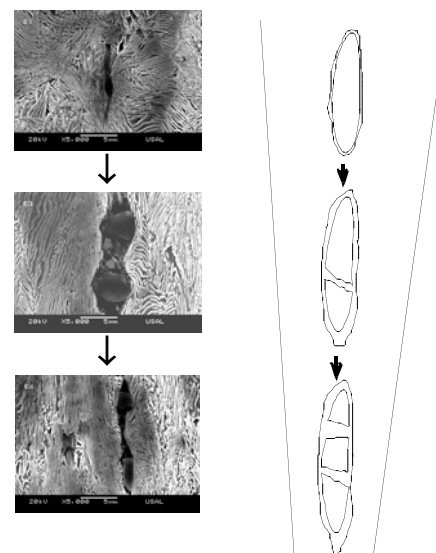


Figura 7. Evolución de las inclusiones de tipo blando durante el proceso de trefilado.

De forma similar las inclusiones blandas, que son capaces de deformarse más que la matriz perlítica, evolucionarán a lo largo del proceso de trefilado llegando a fragmentarse y generando microcavidades de menor tamaño que las anteriores. Este tipo de microcavidades también se generan a ambos lados de la inclusión y estarán orientadas en la dirección del proceso de trefilado. La inclusión puede llegar a mostrarse totalmente fragmentada, generando numerosas microcavidades alrededor de cada fragmento.

El mayor tamaño de microcavidades se ha observado en los alambres fuertemente trefilados. No obstante, en los primeros pasos del proceso de trefilado aparecen algunas microcavidades pero de menor entidad, puesto que la matriz apenas se ha despegado de la inclusión.

Las inclusiones denominadas mezcla, como se comentó anteriormente, están formadas por varias inclusiones. Las distintas inclusiones se pueden diferenciar claramente dentro de las micrografías, por la diferencia de tonalidad y forma, presentándose las inclusiones duras más oscuras y con morfologías más redondeadas.

La parte blanda de la inclusión mezcla, en los primeros pasos del trefilado, tenderá a deformarse en la dirección dicho proceso (Figura 8). A medida que avanza el trefilado la parte blanda de la inclusión se fragmentará, formando microcavidades entre los distintos fragmentos de la misma. Cabe destacar el comportamiento de la interfase inclusión blanda-dura, que no se descohesiona, quedando ambas unidas durante el proceso de trefilado.

Una vez fragmentada la parte de la inclusión blanda se produce, debido al constreñimiento de las colonias, el relleno de las microcavidades. Este relleno deja aislados los fragmentos de la inclusión, mostrándose en las micrografías como inclusiones independientes. La separación entre los fragmentos, aunque se rellena de matriz perlítica, tendrá menor resistencia que el resto del material, definiéndose como lugares débiles dentro del acero. Como resultado final del proceso, tanto las inclusiones tipo blanda como las de tipo mezcla generan discontinuidades dentro de la matriz perlítica; esto se debe a que el relleno no es estrictamente completo en los bordes de los fragmentos.

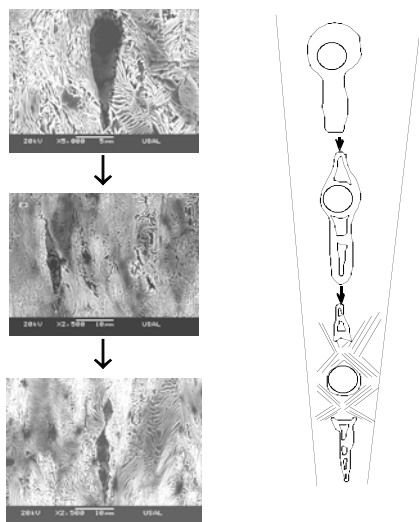


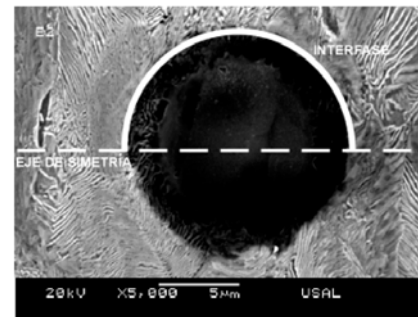
Figura 8. Evolución de las inclusiones de tipo mezcla durante el proceso de trefilado.

Una vez analizados de forma visual los cambios morfológicos generados por las inclusiones se han comparado con los cálculos obtenidos en la simulación mediante el MEF. Estos cálculos muestran los cambios geométricos del micro-defecto durante el trefilado.

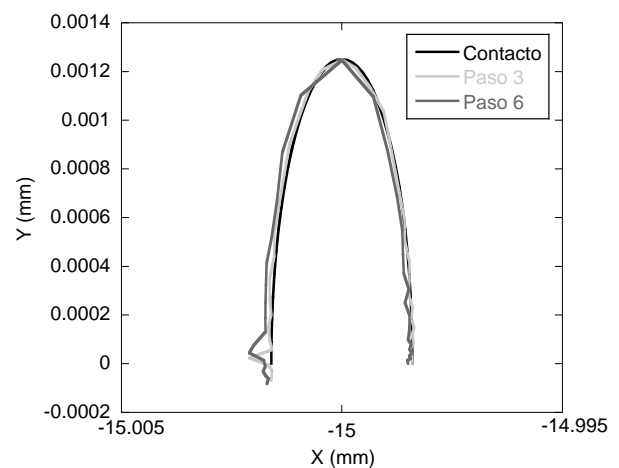
Los desplazamientos obtenidos son el resultado de imponer la interfase perlita-inclusión desunida, puesto que esta interfase unida no simula la realidad en la cual se observa la generación de microcavidades.

La interfase entre la matriz perlítica y la inclusión, Figura 9 (a), es simétrica respecto del eje de trefilado, situándose ésta en el centro del alambre en la simulación mediante MEF.

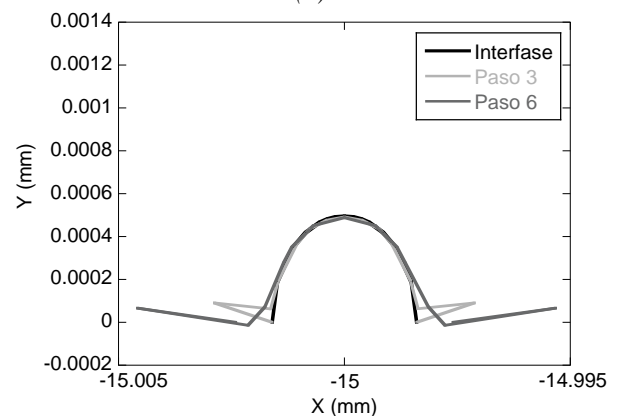
En las Figuras 9 (b) y (c) se han representado los desplazamientos de la interfase generada entre la perlita y los micro-defectos, mostrándose los datos obtenidos en tres etapas del proceso; en su estado inicial, tras haber superado el tercer paso y, finalmente, después del sexto paso del trefilado.



(a)



(b)



(c)

Figura 9. (a) Representación de la interfase simulada mediante MEF. (b) cambios morfológicos en la superficie del micro-defecto en inclusiones duras a lo largo del trefilado y (c) en inclusiones blandas.

En la figura 9 (b) se muestra la progresión de la interfase entre la matriz perlítica y la inclusión, observándose que, a medida que avanza el proceso de trefilado, dicha inclusión genera una micro-fisura orientada en dirección del trefilado (eje del alambre). A lo largo del trefilado también se observa una reducción del eje menor del micro-defecto, produciéndose como se comentó anteriormente, un apelmazamiento del material. Las microcavidades generadas se muestran en un solo lado de la inclusión siendo éste el opuesto al proceso de trefilado, mientras que en el otro se muestra un apelmazamiento del material. Las interfases analizadas han presentado un comportamiento similar en cuanto a la esbeltización a favor de la dirección del proceso. En la interfase de las inclusiones de tipo blando, Figura 9 (c), se han generado micro-cavidades a ambos lados de la inclusión y apelmazamiento de la matriz perlítica en la zona del eje menor del micro-defecto. El comportamiento de las inclusiones de tipo mezcla es análogo al mostrado por las inclusiones blandas, en cuanto a la interfase entre matriz perlítica e inclusión se refiere. Esto se debe a que la inclusión blanda, que rodea a la dura, es la que forma la interfase con el acero, con lo cual es la que influye en el comportamiento de dicha interfase perlita-inclusión.

5. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha realizado un análisis cualitativo y cuantitativo de los cambios morfológicos de los micro-defectos generados por las inclusiones presentes en los aceros objeto de estudio. Una vez obtenidos los resultados se han comparado con un estudio paralelo basado en la simulación mediante el método de los elementos finitos (MEF). A partir de la comparación de ambos análisis se obtienen las siguientes conclusiones:

- Todos los micro-defectos analizados, generados por las inclusiones, presentan un aumento de esbeltez como consecuencia del proceso de trefilado.
- Dicho proceso de esbeltización es más acusado con la presencia de inclusiones de tipo blando.
- Las microcavidades generadas por las inclusiones a lo largo del trefilado se presentan en el semieje mayor de la inclusión (paralelo a la dirección del proceso). Por el otro lado, en el eje menor de la misma, se genera un apelmazamiento del material.
- Las inclusiones que generan más microcavidades (concentradores de tensiones) y un mayor apelmazamiento del material son las inclusiones de tipo blando y mezcla.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean hacer constar su agradecimiento a las siguientes instituciones financiadoras: MCYT (Proyecto MAT2002-01831), MEC (Proyecto BIA2005-08965), MCINN (Proyecto BIA2008-06810) y JCyL (Proyectos SA067A05, SA111A07 y SA039A08). Además, agradecen el suministro de acero por parte de EMESA TREFILERÍA.

REFERENCIAS

- [1] J. Toribio and E. Ovejero. *Microstructure evolution in a pearlitic steel subjected to progressive plastic deformation* Materials Science and Engineering A234-236, pp. 579-582 (1997).
- [2] J. Toribio and E. Ovejero. *Microstructure orientation in a pearlitic steel subjected to progressive plastic deformation* Journal of Materials Science Letters 17, pp. 1037-1040 (1998).
- [3] J. Toribio, E. Ovejero and M. Toledano. *Microstructural bases of anisotropic fracture behaviour of heavily drawn steel*. International Journal of Fracture 87, pp. L83-L88 (1997).
- [4] J. Toribio, E. Ovejero, F. J. Ayaso y R. Rodríguez. *Identificación de nuevas unidades micro-estructurales en aceros eutectoides trefilados*. 5º Jornadas Internacionales de Materialografía y Caracterización Microestructural, INASMET, Mayo 2008.
- [5] A. D. Wilson. *The influence of thickness and rolling ratio on the inclusion behavior in plate steels*. Metallography 12, pp. 233-255 (1979).
- [6] R. Rodríguez. *Análisis del micro-daño y de la presencia de inclusiones en aceros progresivamente trefilados* (Directores: J. Toribio y F.J. Ayaso). Grado de Salamanca. Universidad de Salamanca (2008).
- [7] F.J. Ayaso, B. González y J. Toribio. *Influencia de las inclusiones sobre el comportamiento en fractura de aceros perlíticos progresivamente trefilados*. Anales de Mecánica de la Fractura 24, pp. 99-104 (2007).
- [8] C.D. Liu, M.N. Bassim and S. Lawrence. *Evaluation of fatigue-crack initiation at inclusions in fully pearlitic steels*. Materials Science and Engineering A 167, pp. 107-113 (1993).
- [9] S.R. Collins and G.M. Michal. *Inclusion engineering for improved fatigue response in forged AISI 4140 steel*. Conf. High Performance Structural Steels, Cleveland, OH, USA, pp. 269-280 (1995).
- [10] H. Yu, H. Bi, X. Liu, L. Chen and N. Dong. *Behavior of inclusions with weak adhesion to strip matrix during rolling using FEM*. Journal of Materials Processing Technology 209, pp. 4274-4280 (2009).
- [11] M. Lorenzo, D. Vergara, V. Kharin y J. Toribio. *Influencia del estado tensodeformacional residual en la fragilización por hidrogeno de alambres trefilados*. Anales de Mecánica de la Fractura 24, pp. 123-128 (2007).