

CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DE DOS ACEROS DUAL PHASE LAMINADOS EN CALIENTE

A. Artigas¹, R. Colás², F. Barra¹, L. Carvajal¹, F. Pizarro¹, A. Monsalve¹

(1) Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile, Chile

(2) Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, México

E-mail (autor de contacto): alfredo.artigas@usach.cl

RESUMEN

Se desarrolló a escala de laboratorio un proceso termomecánico continuo que permitió la fabricación de aceros con características similares a las de un acero Dual Phase mediante laminación en caliente, utilizando parámetros de operación equivalentes a los empleados en la industria siderúrgica. A través de fusión se generaron dos palanquillas de 25 [kg] con composición química definida, las cuales fueron forjadas en caliente. Se analizaron dos aleaciones con base C-Mn; a una se añadió cromo, aleación Ac.Cr, y a la otra silicio, aleación Ac.Si. De esta manera se buscó aumentar propiedades como la templabilidad e influir en las propiedades finales del material. Se logró un alto grado de control sobre las variables del proceso, entre las cuales se cuentan la temperatura de homogenización, porcentaje de reducción, temperatura de término de laminación y temperatura de bobinado. La caracterización microestructural se realizó mediante microscopía óptica, utilizando la técnica de Contraste de Interferencia Diferencial, y microscopía de fuerza atómica. Para la determinación del grado de anisotropía se realizaron ensayos según la norma ASTM E-517. Los valores del límite de fluencia, UTS e índice de endurecimiento por deformación n se obtuvieron mediante ensayos de tracción según norma ASTM E-8 [4]. Se logró la simulación de un proceso industrial de fabricación de acero laminado, obteniendo aceros con características Dual Phase de propiedades mecánicas similares a las de aceros presentes en el mercado, siendo los mejores resultados obtenidos a partir de la muestra L4Cr 886/540, cuya última laminación fue realizada a 886°C y posteriormente bobinada a 540°C, la que presentó el mejor índice de endurecimiento por deformación n (0,278), la mejor razón UTS/σ_0 (1,673) y un valor aceptable de índice \bar{r} (0,716). Además, se determinó que a medida que la temperatura de bobinado disminuye, mayor es la presencia de ferrita Widmanstätten y que la aleación Ac.Si es la más resistente. De la misma forma, en términos de anisotropía la aleación Ac.Cr es la que presentó mejores resultados.

Tópico 2: Materiales Metálicos.

Palabras clave: Acero, Dual Phase, Caracterización.

INTRODUCCION

En los últimos años se ha desarrollado un especial interés por el ahorro de combustibles fósiles en todos los ámbitos la industria, producto de la escasez y la inflación generada por las continuas alzas en el costo del petróleo y sus derivados. Por esta razón, la industria automotriz, una de las primeras en verse afectada por estas alzas, desde 1975 ha buscado innovar en torno a los materiales utilizados en el diseño de automóviles en miras de disminuir su peso y por consiguiente su consumo. Ante esto, los aceros Dual Phase aparecen como una respuesta por su alta resistencia y buena

conformabilidad[1], lo que permite la fabricación de un chasis más liviano y a un menor costo. Esto derivó en que el enfoque del campo de la investigación ya no sólo apunte al diseño de nuevos materiales, sino que además al diseño de nuevos métodos de fabricación a gran escala.

Este trabajo busca simular a escala de laboratorio un proceso industrial de manufactura a gran escala de acero laminado y evaluar la influencia de los parámetros operacionales utilizados sobre las propiedades finales del material y además presentar innovaciones en el diseño de métodos de fabricación de aceros Dual Phase.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental utilizado en este trabajo tuvo como objetivo simular el proceso industrial de laminación en caliente usado en la Compañía Siderúrgica Huachipato S.A. y la evaluación del efecto de variables del proceso (composición química, temperatura de homogenización, porcentaje de reducción, temperatura de término de laminación y temperatura de bobinado) en las propiedades finales del acero. Posterior al proceso de fusión, laminación y bobinado se obtuvieron muestras del material para análisis mecánico (ensayo de tracción y ensayo de anisotropía) y análisis microestructural (microscopía óptica y AFM). En la [Figura 1](#) [Figura 1](#) se muestra un esquema del proceso industrial de laminación en caliente y en la [Figura 2](#) [Figura 2](#), un esquema del procedimiento utilizado para la simulación de dicho proceso y el posterior análisis de las muestras.

Con formato

Con formato



Figura 1. Proceso industrial de laminación en caliente.

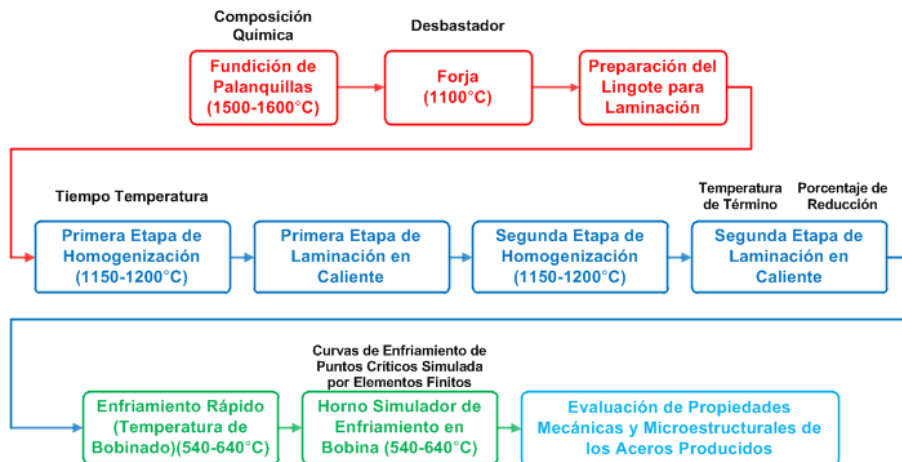


Figura 2. Procedimiento utilizado en la simulación

Fundición de Palanquillas: A partir de una aleación base Fe-C-Mn se determinaron dos composiciones químicas para la fundición de las palanquillas de acero, *buscando aumentar propiedades como la templabilidad [2]*. La primera, aleación Ac.Cr con un contenido de cromo sobre la aleación base y la segunda, aleación Ac.Si, con presencia de Si sobre la aleación base. Las composiciones químicas de las aleaciones se muestran en la [Tabla 1](#) ~~Tabla 1~~.

Tabla 1. Composición química de aleaciones estudiadas.

	%C	%Mn	%Si	%Cr	%P	%S
Ac.Cr	0,271	1,270	0,990	0,234	0,020	0,012
Ac.Si	0,313	1,420	1,430	0,044	0,023	0,015

Las aleaciones fueron fundidas en un horno de inducción de 30 [kg] de capacidad. Se fabricaron dos moldes de arena, uno para la aleación alta en cromo (Acero Cr) y otro para la aleación alta en silicio (Acero Si). Los elementos utilizados y obtenidos se muestran en la [Figura 3](#) ~~Figura 3~~.



Figura 3. Horno de inducción, molde de arena con cromita recubierto con pintura de zirconio y producto del moldeado.

Forja: Luego de la fundición y moldeado se obtuvieron dos palanquillas de aproximadamente 25 [Kg] útiles y de medidas aproximadas de 100x100x320 [mm] las cuales fueron forjadas a una temperatura cercana a los 1100°C con un martinete hidráulico para llevarlas hasta 18 [mm] de espesor, 140 [mm] de ancho y 1000 [mm] de largo aproximadamente. La forja en caliente de las palanquillas se muestra en la [Figura 4](#) ~~Figura 4~~.



Figura 4. . Palanquillas obtenidas producto de la fundición, forja mediante martinete y productos finales de la forja.

Preparación del Lingote para Laminación: Las palanquillas forjadas fueron maquinadas para obtener un set de muestras de 16 [mm] de espesor, 65 [mm] de ancho y 140 [mm] de largo, las

cuales fueron utilizadas en la laminación en caliente. En la [Figura 5](#) se observa en detalle el lingote para laminación.

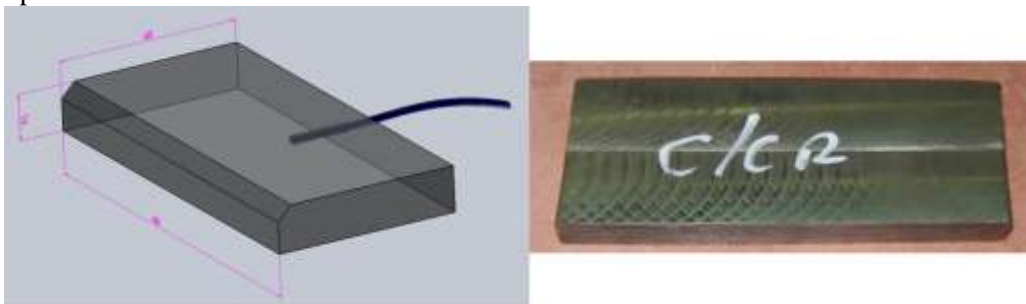


Figura 5. Esquema del lingote y lingote de aleación Acero Cromo usado en la laminación.

El vértice superior de la cara frontal del lingote (respecto del sentido de laminación) fue esmerilado para favorecer el agarre de los rodillos en la primera pasada. Además se hizo una perforación en la cara trasera de aproximadamente 2 [mm] de diámetro con el fin de fijar uno de los extremos de una termocupla tipo k al interior del lingote mediante un inserto metálico a presión. El otro extremo fue conectado a una interfase Personal Daq/50 Series fabricada por IOtech, la cual a través de un puerto USB registró en un PC los valores de temperatura generados por la termocupla.

La medición fue realizada de manera continua durante todo el proceso, es decir, desde el homogenizado hasta el enfriamiento en bobina. Luego de esto, los datos fueron graficados y procesados mediante una planilla de cálculo.

El proceso de laminación en caliente como tal se realizó en cuatro etapas, consistentes en la homogenización de la temperatura de la muestra y la posterior laminación en caliente.

Primera etapa de homogenización de temperatura: La homogenización de cada lingote se realizó en un horno de resistencia eléctrica marca Lindberg durante 20 minutos a una temperatura entre 1150°C y 1200°C. El control del horno es del tipo PID y presenta una oscilación de temperaturas en el rango de $\pm 5^\circ\text{C}$. En la [Figura 6](#) se muestran los equipos utilizados durante el proceso, incluyendo la termocupla, interfase y PC.



Figura 6. Horno Lindberg para homogenización, termocupla tipo k, interfase y PC.

Primera etapa de laminación en caliente: Para la laminación de los lingotes se utilizó un laminador marca Joliot ([Figura 7\(a\)](#)) el cual contaba con un inversor de potencia, lo cual permitió invertir el sentido de giro del rodillo de laminación y de esta manera facilitar la continuidad del proceso. La temperatura fue controlada durante todo el proceso mediante la termocupla de contacto al interior del lingote conectada a la interfase. Además para asegurar la medición de la temperatura del lingote se utilizó un pirómetro óptico. La [Figura 7\(b\)](#) muestra la termocupla de contacto y el pirómetro óptico usados durante la laminación. Como primera etapa, se laminó en caliente el

material en 3 pasadas de 15%, 20% y 23% de reducción respectivamente, inmediatamente después de la primera etapa de homogenización.



Figura 7. (a) Laminador marca Joliot (b) Lingote laminado en caliente con termocupla de contacto en su interior y pirómetro óptico en la parte superior del laminador.

Segunda etapa de homogenización de temperatura: Inmediatamente a continuación de la primera etapa de laminación, la muestra fue homogenizada durante 20 [min] a una temperatura entre 1150°C y 1200°C.

Segunda etapa de laminación en caliente: De manera continua, luego de la segunda etapa de homogenización, se laminó en caliente el material en 3 pasadas de 23%, 23% y 26% de reducción respectivamente. En el mismo momento de la última pasada se registró la temperatura de término de laminación mediante los datos generados por la termocupla de contacto al interior de la muestra. Como producto final se obtuvieron láminas con un 98% de reducción total, respecto a la palanquilla fundida.

Enfriamiento rápido (temperatura de bobinado): Inmediatamente después de la última pasada de la laminación en caliente se templó la muestra en un baño de sales AS140 (eutéctico nitrito - nitrato de sodio) con el objetivo de fijar la temperatura del material a la temperatura de bobinado. El horno en que se fundieron las sales consistía en una piscina de acero de 600x350x200 [mm] puesta al interior de una estructura con resistencias (Kanthal) en cada pared puestas en configuración estrella. La temperatura de las sales fue controlada de dos formas:

- 1.- *Termocupla de control cercana a los calefactores:* la termocupla fue introducida por uno de los costados pequeños de la estructura; de esta forma se logró alcanzar la temperatura determinada por el controlador de manera estable y sin fundir la resistencia.
- 2.- *Termocupla al interior del baño de sales:* la termocupla fue introducida por un orificio hecho en la tapa del horno quedando en contacto directo con el baño de sales. Sólo fue utilizada una vez que se había alcanzado la temperatura deseada con la *termocupla de control cercana a los calefactores*. De esta manera se obtuvo la temperatura exacta de las sales.

Se utilizaron 4 temperaturas de temple: 540°C, 590°C, 610°C y 640°C. El procedimiento de temple se muestra en la [Figura 8](#).

Horno simulador de enfriamiento en bobina: Justo después del enfriamiento rápido se introdujo la muestra en un horno de resistencia Lindberg programado para presentar una tasa de enfriamiento similar a la observada en el interior de una bobina en situación industrial.

Todas las experiencias fueron grabadas en video para poder asociar exactamente las perturbaciones en el registro de temperaturas a los procesos realizados sobre la muestra y para tener un registro exacto de la temperatura medida por el pirómetro. En la

Con formato

Con formato
(Argentina)

[Figura 8. Temple en sales posterior a la laminación en caliente.](#)

[Figura 9. Medición de temperaturas durante el proceso de laminación en caliente desde el horno de homogenización hasta el horno simulador de enfriamiento en bobina.](#)

Con formato

Figura 9 se puede ver el registro completo de temperatura de una de las laminaciones.



Figura 8. Temple en sales posterior a la laminación en caliente.

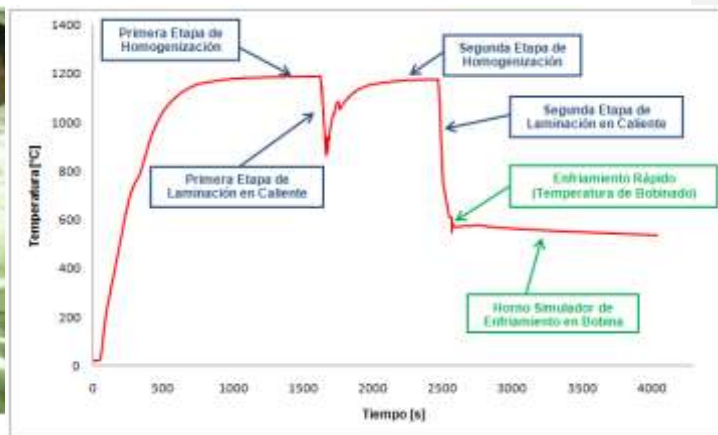


Figura 9. Medición de temperaturas durante el proceso de laminación en caliente desde el horno de homogenización hasta el horno simulador de enfriamiento en bobina.

Una vez enfriadas las muestras hasta temperatura ambiente, se procedió a recolectar probetas de cada una de ellas para realizar ensayos de tracción, anisotropía, microscopía óptica, AFM y medición de texturas. En la [Tabla 2](#) se presentan los resultados más importantes obtenidos de acuerdo al orden en que se realizaron las laminaciones.

Con formato

Para denominar cada muestra se utilizó como primer término, el orden en que se realizó la laminación (LX), seguido del elemento aleante estudiado (Cr para la aleación Ac.Cr y Si para la aleación Ac.Si), luego la temperatura de término de laminación y finalmente la temperatura de bobinado.

Tabla 2. Porcentajes de reducción y temperaturas de cada proceso realizado en la laminación

Muestra	T _F (°C)	%Red _F	T _{H-1} (°C)	%Red _{L-1}	T _{H-2} (°C)	%Red _{L-2}	T _{Term} (°C)	T _{bob} (°C)	%Red _{Total}
L4Cr 886/540	1150	82	1206	15-20-23	1163	23-23-26	886	540	98
L6Si 824/540	1150	82	1177	15-20-23	1186	23-23-26	824	540	98
L1Cr 845/640	1150	82	1182	15-20-23	1136	23-23-26	845	640	98

Las muestras fueron ordenadas en función de la temperatura de bobinado, sin embargo las experiencias no se realizaron en el mismo orden, por esta razón la laminación bobinada a 540°C corresponde a la muestra L4Cr 886/540 y no a la L1Cr 845/640.

RESULTADOS Y DISCUSION

Resultados Mecánicos

A partir de cada una de las muestras laminadas exitosamente se obtuvieron probetas y se realizaron ensayos de tracción según norma ASTM E-8 [3] para la determinación del esfuerzo de fluencia, UTS e índice de endurecimiento n , y además, ensayos de anisotropía según norma ASTM E-517

[4] para la determinación del índice de anisotropía normal (\bar{r}) y plano (Δr). En la [Tabla 3](#) se presentan los resultados de tales ensayos ordenados de acuerdo a la temperatura de bobinado de las muestras.

En base a las curvas esfuerzo-deformación ingenieril obtenidas mediante ensayos de tracción se determinó que tres muestras presentaban un comportamiento (L4Cr 886/540, L6Si 824/540, L1Cr 845/640) similar al de un acero Dual Phase ([Figura 10](#)), en términos de fluencia homogénea. La muestra L4Cr 886/540 fue la única que presentó valores de σ_0 y UTS dentro de los rangos de este tipo de aceros.

Tabla 3. Resumen de resultados ensayos mecánicos.

Muestra	σ_0 [MPa]	UTS [MPa]	n	\bar{r}	Δr	UTS/ σ_0
L4Cr 886/540	294,2	492,3	0,278	0,716	-0,117	1,673
L6Si 824/540	494,3	675,7	0,178	0,572	0,206	1,367
L1Cr 845/640	459,9	679,6	0,185	0,841	0,710	1,478

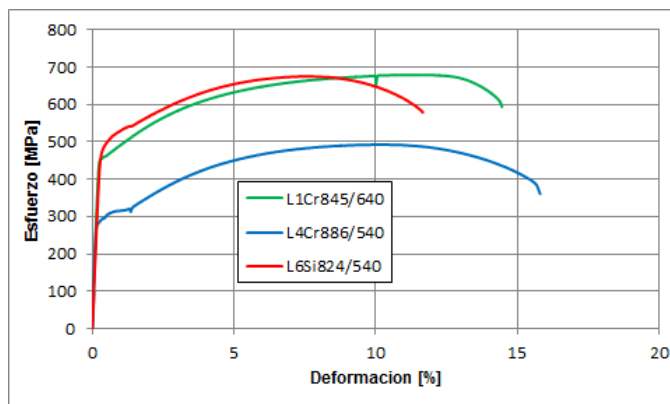


Figura 10. Curva esfuerzo-deformación ingenieril de 3 muestras obtenidas.

Resultados Metalográficos

En la [Figura 11](#)(a) se presenta la microestructura de la muestra L6Si 824/540 donde se puede observar la presencia de una fase blanca que corresponde a austenita retenida [5] producto del alto contenido de silicio. En la [Figura 11](#)(b) se presenta la microestructura de la muestra L3Si 768/640 la cual presenta una marcada orientación de los granos en el sentido de laminación, similar a la generada en aceros laminados a escala industrial.

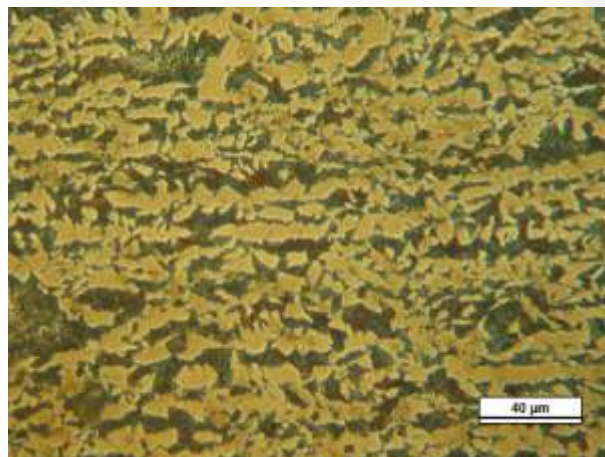
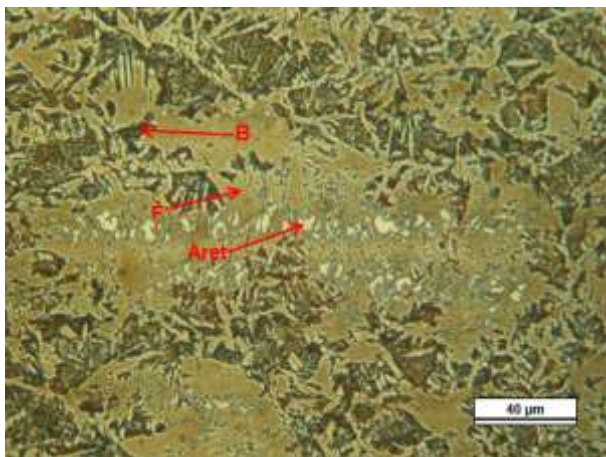


Figura 11. (a) Muestra L6Si 824/540. Ferrita junto con bainita y austenita retenida; (b) Muestra L3Si 768/640. Ferrita junto a perlita y bainita.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos se encontró que la aleación Ac.Cr es la que presenta los mejores resultados dado que en todas las muestras presenta lo que presumiblemente corresponde a austenita retenida, aun cuando se observa fluencia heterogénea producto del Bake Hardening[6]. Además, la muestra L4Cr 886/540 fue la que presentó los mejores resultados en términos de índice de endurecimiento por deformación n , con un valor de 0,278, la mejor razón Límite de Fluencia/UTS, cuyo valor fue de 0,598 y además un valor aceptable del índice \bar{r} con un valor de 0,716.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en esta investigación es posible concluir lo siguiente:

- 1.- Es posible la fabricación a escala de laboratorio de aceros de baja aleación con características Dual Phase laminados en caliente.
- 2.- Con la etapa de forja en caliente se logró eliminar completamente la estructura dendrítica producida en la solidificación de la palanquilla.
- 3.- Se logró laminar en caliente a escala de laboratorio de manera exitosa controlando las principales variables del proceso.
- 4.- El contenido de cromo fue más determinante que el contenido de silicio en la formación de austenita retenida.
- 5.- La aleación Ac.Si fue la más resistente, en términos de límite de fluencia y UTS y la aleación Ac.Cr fue la que presentó los mejores valores de anisotropía normal.
- 6.- El índice de anisotropía está fuertemente relacionado con el contenido de silicio.
- 7.- No se pudo observar en ninguna de las dos aleaciones el importante rol que juega la temperatura de término de laminación en la textura del acero.
- 8.- La aleación Ac.Cr es la que presentó los mejores resultados con relación a lo esperado en un acero Dual Phase, siendo la muestra L4Cr 886/540, cuya última laminación fue realizada a 886°C y posteriormente bobinada a 540°C, la que presentó el mejor índice de endurecimiento por deformación n (0,278), la mejor razón UTS/σ_0 (1,673) y un valor aceptable de índice \bar{r} (0,716).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la ayuda otorgada por CONICYT (Proyecto Fondecyt N°1108003), y a la DICYT (Universidad de Santiago de Chile) para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASM Metals HandBook Volume 01, "Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys", Metals Park, Ohio, 2004.
- [2] Jérémie Bouquerel. "Modelling and Characterization of Multiphase TRIP Steel under Static and Dynamic Loading". Tesis para optar al grado de Ph.D. Universitéit Gent. 2008
- [3] ASTM E 8, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", 2004.
- [4] ASTM E 517, "Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal", 2004.

[5] LePera Frank S., "Improved Etching Technique to Emphasize Martensite and Bainite in High-Strength Dual Phase Steel". *Journals of Metals* col.32. 1980.

[6] S. Gunduz y col. "Effect of aging temperature and martensite by volume on strain aging behaviour of Dual phase steel". *Ironmaking and Steelmaking* 2008 Vol.35, No 1, pag.63-68