

Optimización de cédulas de laminación en frío para molino reversible del tipo cuarto

Oscar Francisco Villarreal Vera

Villacero

oscar.villarreal@villacero.com.mx

Carlos J. Lizcano Zulaica, Rafael Colás Ortiz

FIME-UANL

clizcano@yahoo.com.mx, colas.rafael@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es determinar las condiciones que permitan optimizar e innovar las cédulas de laminación, sin afectar la calidad del producto de la cinta asimétrica de acero laminada en frío SAE 1006,¹ para un molino reversible de laminación del tipo cuarto. Para lograr esto se desarrolló un modelo de laminación que predice la fuerza de separación, ángulo de contacto, consumo de energía, par torsional, y otros parámetros. Con este modelo se comparan secuencias de operación de las cédulas de laminación y se determinaron cédulas de secuencia progresiva y de campana para el molino, manteniendo dentro de tolerancia el perfil de espesor y de la forma de la cinta de acero de tolerancia estricta. No sólo el reducir el número de pases de laminación permite optimizar, sino también el mantener una secuencia de operación progresiva y descendente optimiza la cédula de laminación conservando calidad y controlando el consumo de energía.



PALABRAS CLAVE

Cédulas de laminación en frío, perfil de cinta asimétrico, modelo matemático de laminación.

ABSTRACT

The aim of this research is the optimization and innovation of cold rolling reduction schedules for a Four-High Single-Stand reversing cold rolling mill through SAE 1006 asymmetric steel strips. First of all, it was developed a cold rolling model to obtain the roll force, bite angle, power, torque and other parameters. Working with the cold rolling model is possible to compare the sequence of the operation of the cold rolling reduction schedule (number and main features of passes) and describe the type of schedule, cold rolling progressive schedule and cold rolling bell-shaped schedule for the 4-Hi reversing mill with pay-off. The change of the speed and reduction percentage over the pass schedule affects the thickness and flatness profile but not only the number of passes of the schedule give the optimization, also a progressive sequence in the cold rolling reduction schedule gives the optimization and keep up a good flatness profile with an efficient energy control.

KEYWORDS

Cold rolling reduction schedules, asymmetric steel strips profile, rolling mathematic model.

INTRODUCCIÓN

El proceso de transformado está compuesto por cinco etapas que dan forma a la cinta de acero, estos procesos son:

1. Línea de corte longitudinal,
2. Laminación en frío, en donde se centra el estudio,
3. Recocido,
4. Temple mecánico
5. Corte final.

El proceso inicia en la línea de corte longitudinal con la división de los rollos maestros de 914 y 1,219 mm, en múltiplos de dos o tres cintas de acero en un ancho no mayor a los 711 mm; divididos de una forma tal que se desperdicie lo menos posible el material, y así que al momento de pasar al proceso de laminación en frío, se procesen los múltiplos en el molino reversible del tipo cuarto.

El proceso de división longitudinal genera múltiplos compuestos de cintas que presentan un perfil del tipo asimétrico conocido como cuña, en donde se obtienen cintas con un espesor mayor en uno de sus extremos laterales o cantos.

La cuña es caracterizada y cuantificada mediante el uso de técnicas especiales, cómo es explicado más adelante de este documento. Este perfil acuñado de la cinta le da la principal diferencia a este proceso de laminación con respecto al convencional, el cual opera con un perfil de cinta casi rectangular.

Debido a la importancia de la fuerza de separación en el consumo de energía durante la reducción en los pases de laminación, se desarrollaron cédulas de secuencia progresiva soportándose en un conjunto de herramientas; como el uso del modelo de laminación que predice la fuerza de separación, así como también de herramientas estadísticas para la medición del perfil de espesor, siendo el objetivo, el optimizar e innovar cédulas de laminación en frío para un molino reversible del tipo cuarto para cintas de acero SAE 1006 de tolerancia estricta con perfiles de forma asimétricos.

Modelo mecánico de laminación en frío

El modelo se desarrolla sobre la base de los conceptos matemáticos de Bland y Ford² soportándose bajo el principio de Orowan.³ Se aplican varios principios en especial el cálculo del rodillo deformado, el cual está basado de la ecuación de Hitchcock.⁴



El modelo inicialmente calcula parámetros como el diámetro del rodillo deformado, ángulo de contacto, potencia o consumo de energía durante el pase, velocidad de deformación y el coeficiente de fricción, éste último se calcula en base a la velocidad del molino.

En el desarrollo del modelo de laminación es importante predecir la fuerza de separación, para lo cual se siguen aplicando los conceptos básicos de las teorías de metalurgia mecánica, basados en los criterios que predicen la cedencia en materiales dúctiles.⁵

En donde se conservan las siguientes suposiciones de Bland & Ford:

1. El arco de contacto es circular – no presenta deformación elástica de los rodillos.
2. El coeficiente de fricción es constante en todos los puntos del arco de contacto.
3. No existe expansión lateral, así que el proceso de laminación se puede considerar como un problema de deformación plana.
4. Las secciones verticales permanecen planas, por lo que la deformación es homogénea.
5. La velocidad periférica de los rodillos es constante.
6. La deformación elástica de la lámina es despreciable en comparación con la deformación plástica.
7. Se mantiene el criterio de cedencia de energía de distorsión, para deformación plana dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \sigma'_0 \quad (1)$$

CÁLCULO DE LA FUERZA DE SEPARACIÓN Y PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA MORDIDA DE LAMINACIÓN EN FRÍO

Basados también en los conceptos anteriores, para el cálculo de la fuerza de separación, el modelo se ajustó a resultados industriales, considerando la potencia del molino de laminación en frío, parámetros geométricos de la mordida de laminación, dimensiones transversales de cintas de acero, grados de acero y las correspondientes curvas constitutivas del acero.

Uno de los métodos de cálculo de fuerzas de separación o cargas de laminación en frío usa ecuaciones derivadas de la consideración de fuerzas desarrolladas en el área de contacto o mordida, propuesta por Bland y Ford. En la figura 1 el ancho del material es tomado como unidad, es visto que la fuerza normal “L” en AB debido a la presión “s” es:

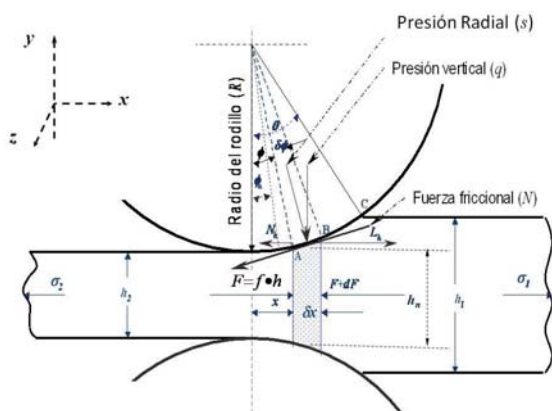
$$L = s \cdot (AB)$$


Fig. 1. Representación esquemática del arco de contacto o mordida de laminación.

La investigación involucra la aplicación de las siguientes ecuaciones basadas en la solución propuesta por Bland y Ford, el análisis de fricción por simplificación se apoya bajo la ecuación de Mójica y Garza, Arimura y coautores.⁶

$$r = \frac{(h_1 - h_2)}{h_1} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = 0.0356 V_R \sqrt{\frac{r}{D h_1}} \quad (3)$$

$$\sigma_0 = cte + Ar + Br^2 + Cr^3 + Dr^4 + Er^5 + Fr^6 \quad (4)$$

$$\frac{R'}{R} = 1 + \frac{CP_0}{b(h_1 - h_2)} \quad (5)$$

$$H = H_1 = 2 \sqrt{\frac{R}{h_2}} \cdot \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{R}{h_2}} \cdot \varphi \right) \quad (6)$$

$$q_0 = \left(1 - \frac{\sigma_2}{k_2} \right) \int k \left(\frac{h}{h_2} \right) e^{\mu H} d\varphi + \left(1 - \frac{\sigma_1}{k_1} \right) \int k \left(\frac{h}{h_1} \right) e^{\mu(H-H)} d\varphi \quad (7)$$

$$P_0 = bR (\text{Área}) \cdot \text{Área} = \int_0^{\varphi_n} q_0 d\varphi + \int_{\varphi_n}^{\theta} q_0 d\varphi \quad (8)$$

$$\mu \cong 0.11 - 1.9 \times 10^{-3} V_R \quad (9)$$

$$V_R \text{ (m/seg)} \quad (10)$$

Construcción del modelo de laminación en frío

La construcción sería de la siguiente manera, la cual permite escalarlo y desarrollarlo en simple hoja de cálculo de Excel, como se muestra en la tabla I.

CURVAS CONSTITUTIVAS

La figura 2 muestra la curva constitutiva obtenida para el modelo de laminación en frío. Las curvas constitutivas del acero a analizar se elaboraron para el acero 1006, el cual tiene un uso mayor en el proceso de transformación de la planta.

La tabla II, presenta diferentes grados de acero con sus características obtenidas durante el desarrollo de la cédula de laminación, en donde se seleccionaron varios rollos y al final de cada pase se cortaba una muestra con el espesor final del pase para llevar a cabo ensayos de tensión basados en la norma ASTM A370-07b,⁷ determinando sus propiedades mecánicas como son resistencia máxima, resistencia de cedencia, elongación del material y dureza superficial además de sus características dimensionales.

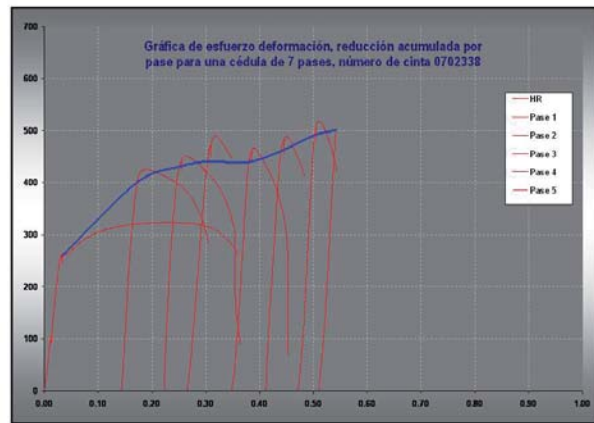


Fig. 2. Gráfica constitutiva del acero 1006, para la elaboración del modelo de laminación.

Los parámetros utilizados para elaborar la curva constitutiva fueron la resistencia de cedencia y el porcentaje de reducción acumulado durante los pases. Se ajustó una línea de tendencia a estos puntos para obtener una ecuación polinomial que es utilizada en el modelo.

La ecuación obtenida de la curva constitutiva del acero 1006 para reducciones intermedias a tensión alta, en donde “r” representa la reducción.

$$\sigma = -0.0149r^4 + 2.5769r^3 - 153.07r^2 + 4018.9r + 26193 \quad (13)$$

La curva constitutiva, importante para la determinación de la resistencia de constricción, se

desarrolló para dos tipos de reducciones, reducciones de bajo porcentaje y reducciones para alto porcentaje de laminación o reducción en frío.

CÉDULAS DE LAMINACIÓN

Se definen como una secuencia de operación que está conformada de diferentes parámetros del molino laminador, como son la velocidad durante el pase, porcentaje de reducción, espesor inicial y final, fuerza de separación, área de contacto, etc.

La figura 3, representa la secuencia de operación durante la cédula relacionando el porcentaje de reducción por pase, en donde no se aplica un control

Tabla 1.a. Desarrollo del modelo de laminación por medio de un análisis matemático basado en la solución de Bland & Ford mediante una descripción descendente propuesta por Ekelund. 1er Análisis de laminación sin rodillo de trabajo deformado.

Primer Análisis	Análisis sin rodillos deformados						
	Arco de Contacto						
	Salida						
	1	2	3	4	5	6	7
ϕ (radianes)	1.00E-15	2.21E-03	4.41E-03	6.62E-03	8.83E-03	1.10E-02	1.32E-02
$(R/h_2)^{0.5} \phi$	1.52E-14	3.35E-02	6.70E-02	1.01E-01	1.34E-01	1.68E-01	2.01E-01
$\tan^{-1} [(R/h_2)^{0.5} \phi]$	1.52E-14	3.35E-02	6.69E-02	1.00E-01	1.33E-01	1.66E-01	1.98E-01
$H = 2(R/h_2)^{0.5} \tan^{-1} [(R/h_2)^{0.5} \phi]$	4.61E-13	1.02E+00	2.03E+00	3.04E+00	4.04E+00	5.04E+00	6.02E+00
$H_1 - H$	1.65E+01	1.55E+01	1.44E+01	1.34E+01	1.24E+01	1.14E+01	1.05E+01
μH	4.90E-14	1.08E-01	2.16E-01	3.23E-01	4.30E-01	5.36E-01	6.40E-01
$\mu(H_1 - H)$	1.75E+00	1.64E+00	1.54E+00	1.43E+00	1.32E+00	1.22E+00	1.11E+00
$e^{\mu H}$	1.00E+00	1.11E+00	1.24E+00	1.38E+00	1.54E+00	1.71E+00	1.90E+00
$e^{\mu(H_1 - H)}$	5.77E+00	5.17E+00	4.65E+00	4.17E+00	3.75E+00	3.37E+00	3.04E+00
$R\phi^2$	5.07E-30	2.47E-05	9.88E-05	2.22E-04	3.95E-04	6.17E-04	8.89E-04
$h = h_2 + R\phi^2$	2.20E-02	2.20E-02	2.21E-02	2.22E-02	2.24E-02	2.26E-02	2.29E-02
$r\% = 100(h_1 - h_2)/h_1$	2.67E+01	2.66E+01	2.63E+01	2.59E+01	2.53E+01	2.46E+01	2.37E+01
k	3.80E+01	3.80E+01	3.80E+01	3.79E+01	3.78E+01	3.77E+01	3.76E+01
kh	8.36E-01	8.37E-01	8.39E-01	8.43E-01	8.47E-01	8.53E-01	8.60E-01
kh/h_2	3.80E+01	3.80E+01	3.81E+01	3.83E+01	3.85E+01	3.88E+01	3.91E+01
kh/h_1	2.79E+01	2.79E+01	2.80E+01	2.81E+01	2.82E+01	2.84E+01	2.87E+01
q_0 (salida) = $kh e^{\mu H} / h_2$	3.80E+01	4.24E+01	4.73E+01	5.29E+01	5.92E+01	6.63E+01	7.42E+01
q_0 (entrada) = $kh e^{\mu(H_1 - H)} / h_1$	1.61E+02	1.44E+02	1.30E+02	1.17E+02	1.06E+02	9.59E+01	8.71E+01
q_t (salida) = $[1 - \sigma_2/k_2] q_0 = \bar{N}_2 q_0$	3.00E+01	3.34E+01	3.73E+01	4.17E+01	4.67E+01	5.22E+01	5.84E+01
q_t (entrada) = $[1 - \sigma_1/k_1] q_0 = \bar{N}_1 q_0$	-	-	-	-	-	-	-
q_t	3.00E+01	3.34E+01	3.73E+01	4.17E+01	4.67E+01	5.22E+01	5.84E+01
Área bajo curva salida	6.99E-02	7.80E-02	8.72E-02	9.75E-02	1.09E-01	1.22E-01	1.37E-01
Área bajo curva entrada	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Área total	6.99E-02	7.80E-02	8.72E-02	9.75E-02	1.09E-01	1.22E-01	1.37E-01
$q_t \phi$	3.00E-14	7.37E-02	1.65E-01	2.76E-01	4.12E-01	5.76E-01	7.74E-01
Área de $q_t \phi d\phi$	8.14E-05	2.63E-04	4.86E-04	7.59E-04	1.09E-03	1.49E-03	1.97E-03
ϕ	1E-15	0.00220683	0.00441366	0.00662048	0.00882731	0.01103414	0.01324097
q_t (salida) = $[1 - \sigma_2/k_2] q_0 = \bar{N}_2 q_0$	29.9632105	33.4124	37.3116536	41.7124654	46.667823	52.2297734	58.4452458
q_t (entrada) = $[1 - \sigma_1/k_1] q_0 = \bar{N}_1 q_0$	142.423144	127.936111	115.141896	103.842626	93.857203	85.0200945	77.1796056
q_t (salida) - q_t (entrada)	-112.459934	-94.5237108	-77.8302426	-62.1301605	-47.18938	-32.7903211	-18.7343598

Tabla I.b. Desarrollo del modelo de laminación por medio de un análisis matemático basado en la solución de Bland & Ford mediante una descripción descendente propuesta por Ekelund. 2do. Análisis de laminación con rodillo de trabajo deformado.

Segundo Análisis	Análisis con rodillos deformados						
	Arco de Contacto						
	Salida						
	1	2	3	4	5	6	7
ϕ (radianes)	1E-15	0.00180252	0.00360503	0.00540755	0.00721007	0.00901258	0.0108151
$(R/h_2)^{0.5} \phi$	1.8586E-14	0.03350126	0.06700252	0.10050378	0.13400504	0.1675063	0.20100756
$\tan^{-1} [(R/h_2)^{0.5} \phi]$	1.8586E-14	0.03348874	0.06690252	0.10016742	0.13321145	0.16596551	0.19836418
$H = 2(R/h_2)^{0.5} \tan^{-1} [(R/h_2)^{0.5} \phi]$	6.9087E-13	1.24483166	2.48687742	3.72338861	4.95168978	6.1692123	7.37352455
$H_1 - H$	20.1707924	18.9259607	17.683915	16.4474038	15.2191026	14.0015801	12.7972678
μH	7.3461E-14	0.13236457	0.26443291	0.39591275	0.52651962	0.65598037	0.78403646
$\mu(H_1 - H)$	2.14478659	2.01242202	1.88035368	1.74887384	1.61826698	1.48880622	1.36075014
$e^{\mu H}$	1	1.14152441	1.30269202	1.48573969	1.69302965	1.92703079	2.19029548
$e^{\mu(H_1 - H)}$	8.54021849	7.48141557	6.55582312	5.7481257	5.04434077	4.43180178	3.89911707
$R\phi^2$	7.5995E-30	2.4691E-05	9.8765E-05	0.00022222	0.00039506	0.00061728	0.00088889
$h = h_2 + R\phi^2$	0.022	0.02202469	0.02209877	0.02222222	0.02239506	0.02261728	0.02288889
$r\% = 100 (h_1 - h_2) / h_1$	26.6666667	26.5843621	26.3374486	25.9259259	25.3497942	24.6090535	23.7037037
k	38.0155886	38.004981	37.9726466	37.9169344	37.8346964	37.7206662	37.5665319
kh	0.83634295	0.83704798	0.83914861	0.84259854	0.84731036	0.85313902	0.85985618
kh/h_2	38.0155886	38.0476353	38.1431186	38.2999337	38.5141074	38.7790463	39.0843716
kh/h_1	27.8780983	27.9015992	27.9716203	28.086618	28.2436787	28.4379673	28.6618725
q_0 (salida) = $kh e^{\mu H} / h_2$	38.0155886	43.4323043	49.6887364	56.9037315	65.2055257	74.7284163	85.6063224
q_0 (entrada) = $kh e^{\mu(H_1 - H)} / h_1$	238.08505	208.743459	183.376995	161.445411	142.47074	126.031434	111.755996
q_t (salida) = $[1 - \sigma_2/k_2] q_0 = \tilde{N}_2 q_0$	29.9632105	34.2325695	39.1637779	44.8505087	51.3938351	58.899608	67.4733801
q_t (entrada) = $[1 - \sigma_1/k_1] q_0 = \tilde{N}_1 q_0$	-	-	-	-	-	-	-
q_t	29.9632105	34.2325695	39.1637779	44.8505087	51.3938351	58.899608	67.4733801
Área bajo curva salida	0.05785698	0.06614907	0.07571857	0.08674101	0.09940288	0.1138947	0.13039838
Área bajo curva entrada	0	0	0	0	0	0	0
Área total	0.05785698	0.06614907	0.07571857	0.08674101	0.09940288	0.1138947	0.13039838
$q_t \phi$	2.9963E-14	0.06170477	0.14118672	0.24253136	0.37055296	0.5308376	0.72973132
Área de $q_t \phi d\phi$	5.5612E-05	0.00018286	0.00034583	0.00055255	0.00081239	0.0011361	0.0015357
ϕ	1E-15	0.00180252	0.00360503	0.00540755	0.00721007	0.00901258	0.0108151
q_t (salida) = $[1 - \sigma_2/k_2] q_0 = \tilde{N}_2 q_0$	29.9632105	34.2325695	39.1637779	44.8505087	51.3938351	58.899608	67.4733801
q_t (entrada) = $[1 - \sigma_1/k_1] q_0 = \tilde{N}_1 q_0$	210.976649	184.975895	162.497661	143.063211	126.248999	111.681475	99.0314409
q_t (salida) - q_t (entrada)	-181.013438	-150.743326	-123.333883	-98.2127022	-74.855164	-52.7818667	-31.5580608

adecuado de la cédula (porcentaje de reducción) y sus parámetros de laminación. De acuerdo a este gráfico las reducciones durante el pase con porcentajes altos reflejan un comportamiento inestable de carga, afectando el perfil del espesor y por consiguiente repercutiendo en el consumo de energía, este punto en especial es de suma importancia para el desarrollo y caracterización de las cédulas de laminación.

PERFIL DEL TIPO ASIMÉTRICO O CUÑA

Es el término utilizado para evaluar la asimetría del perfil de la cinta de acero laminada. El término perfil de cuña describe la asimetría de la cinta de acero en términos cualitativos.

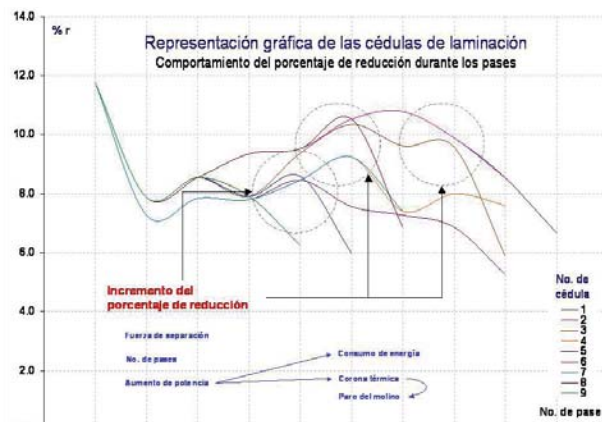


Fig. 3. Representación gráfica de las cédulas de laminación.

La tabla II. Resultados de los ensayos de tensión desarrollados para la construcción de las curvas constitutivas de la cinta de acero SAE 1006.

Cinta de acero 1006AK																
No. mta	No. de rollo	No. pase	orden fab.	Presión (%)	tensión enrollador (kg)	tensión desenrollador (kg)	h_0 (mm)	h_1 (mm)	h (mm)	% r	b (mm)	V_R (mm/seg)	σ_0 (Mpa)	σ_{max} (Mpa)	% e	HRB
1	0702338	DEC	P06-2813				4.877				506.4		260.00	320.00	35.80	66
1	0702338	1	P06-2813	28	3,882	842	4.877	4.178	2.362	14.32	506.4	1,596	400.00	420.00	16.15	79
1	0702338	2	P06-2813	27	3,889	3,875	4.178	3.792	2.362	9.24	506.4	2,805	430.00	450.00	15.25	83
1	0702338	3	P06-2813	26	3,882	3,882	3.792	3.581	2.362	5.56	506.4	3,100	440.00	490.00	8.35	84
1	0702338	4	P06-2813	28	3,889	3,868	3.581	3.178	2.362	11.28	506.4	3,079	440.00	470.00	10.15	86
1	0702338	5	P06-2813	27	3,898	3,889	3.178	2.870	2.362	9.67	506.4	3,130	460.00	490.00	7.15	85
1	0702338	6	P06-2813	27	3,889	3,882	2.870	2.578	2.362	10.18	506.4	3,074	490.00	520.00	7.10	88
1	0702338	7	P06-2813	25	3,882	2,220	2.578	2.388	2.362	7.39	506.4	2,119	500.00	550.00	5.48	89
2	0703074	DEC	P06-2929				3.792				538.2		180.00	260.00	33.85	62
2	0703074	1	P06-2929	29	3,882	1,132	3.792	3.162	1.623	16.61	538.2	2,266	430.00	460.00	13.55	78
2	0703074	2	P06-2929	29	3,889	3,882	3.162	2.921	1.623	7.63	538.2	3,049	440.00	460.00	9.55	82
2	0703074	3	P06-2929	25	3,889	3,882	2.921	2.642	1.623	9.57	538.2	3,140	450.00	470.00	8.95	85
2	0703074	4	P06-2929	26	3,889	3,882	2.642	2.337	1.623	11.54	538.2	3,054	490.00	530.00	5.80	88
2	0703074	5	P06-2929	27	3,889	3,889	2.337	2.083	1.623	10.87	538.2	3,100	480.00	510.00	6.35	89
2	0703074	6	P06-2929	29	3,889	3,889	2.083	1.829	1.623	12.20	538.2	3,079	510.00	560.00	5.25	91
2	0703074	7	P06-2929	27	3,889	1,371	1.829	1.626	1.623	11.11	538.2	2,200	540.00	570.00	1.55	94

La cuña es una característica típica de los procesos de cinta estrecha de bajo carbono de tolerancia estricta, esto es debido a la capacidad de los molinos laminadores de ancho angosto regidos bajo la norma ASTM A109.⁸ Una cinta de acero se define como una lámina de acero de un ancho menor a los 610 mm (24.00") y en un espesor de 0.2032 - 4.75 mm (0.008" - 0.187") de tolerancia estricta dimensionalmente y en propiedades mecánicas.

El método utilizado para cuantificación permite medir el perfil de cuña por cinta de una manera práctica, en donde es posible identificar 3 zonas de la cinta a lo ancho: zona del centro, zona de la orilla y zona de caída de orilla, la figura 4 representa de una manera gráfica las zonas descritas para el ancho de la cinta de acero.

La característica principal del método es medir o cuantificar la cuña de la cinta de acero lo cual denota un perfil de espesor asimétrico a lo ancho de la cinta, la cuña es descrita como la diferencia existente entre el espesor que se encuentra a 25 mm de la orilla de la cinta, vista la cinta de una manera frontal y la diferencia existente entre un extremo y otro dará la cuña de la cinta de acero.

Como se puede ver en la figura 4 el perfil de cuña del lado del motor es identificado como el perfil de cinta que abarca el calibre central hc , el cual es menor que el espesor del lado de caída de orilla hl' y mayor que el del lado del operador hl'' .

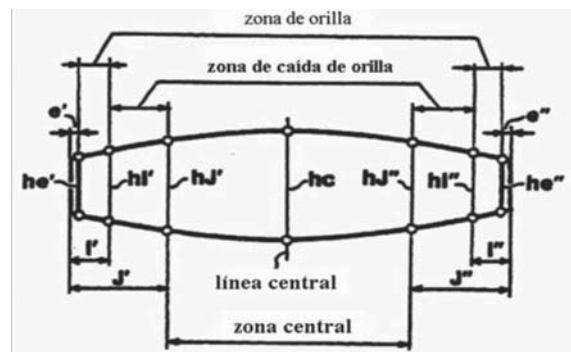


Fig. 4. Parámetros de medición de cuña.

El perfil de cuña del lado del operador se identifica como el perfil de la cinta que abarca el calibre central hc y que es menor que la del lado del operador del hl'' y mayor que el del lado del motor principal hl' .

Cuña, este término da una definición cuantitativa de la asimetría de la pieza trabajada y es definida como la diferencia entre la orilla del motor principal y la orilla del lado del operador hl' y hl'' .⁹

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo se dividió en diferentes etapas: La primera se basó en la recopilación de información del molino laminador en frío reversible, verificando sus registros, capacidad máxima de operación, incluyendo la del mandril del desenrollador, mandril de salida y de entrada y así como del motor principal,

la figura 5 describe las partes principales del molino laminador en frío.

De la información recopilada se realizaron las primeras preguntas para llevar a cabo el desarrollo del modelo, esto permitió generar una cédula de laminación óptima; manteniendo calibre, calidad de forma, minimizando el consumo de energía e incrementando la productividad del molino, además de evitar vicios de operación.

Las primeras preguntas que se establecen al generar cédulas de laminación son:

1. ¿Cuál es el número correcto de pases?,
2. ¿Cuál es la reducción que debe de realizarse en cada pase?,
3. ¿Cuál es la velocidad ideal de operación para espesores delgados o gruesos que permita mantener una variabilidad de espesor controlada?

Con respecto al consumo de energía y a la productividad:

1. ¿Cuál es el consumo óptimo de energía por pase y total? y
2. ¿Cuál es el tiempo óptimo de operación?

EVALUACIÓN DEL PERFIL DE ESPESOR

Durante las prácticas de laminación se evaluaron diferentes tipos de cédulas con diferentes velocidades durante el pase, con el fin de investigar la variabilidad del espesor y así establecer velocidades óptimas de operación para un buen control del perfil de espesor de la lámina.

La figura 6 compara la variabilidad del espesor durante el pase de laminación para las dos primeras cédulas de laminación propuestas para el desarrollo de la investigación; a partir de aquí se establecerá un estudio estadístico medido por medio de los Cpk^{10} para el concepto de variabilidad de espesor.

El Cpk define el índice de capacidad del proceso real bajo 6σ , estableciendo un Cpk mínimo de 1.33. El

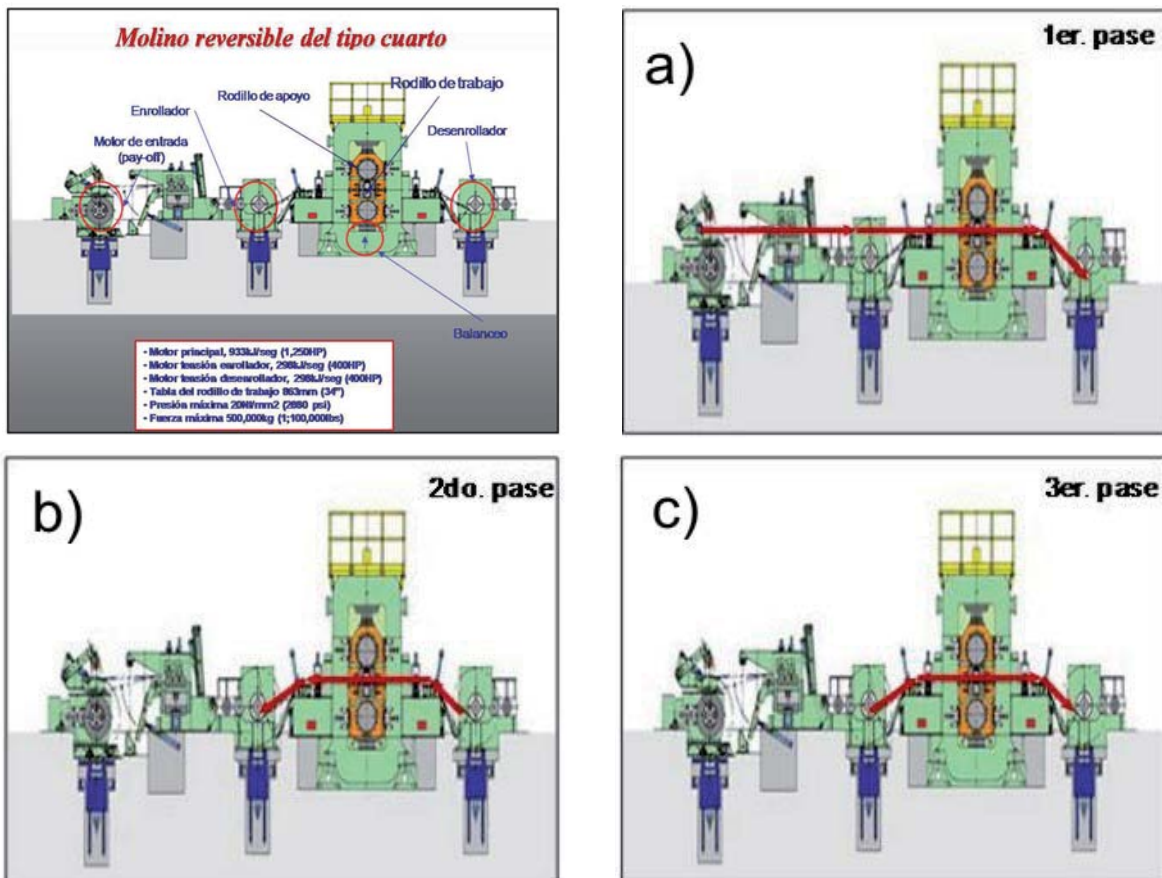


Fig. 5. Dibujo superior partes principales así como capacidad de operación del molino de laminación en frío de cuatro rodillos reversible. b). Secuencia de operación de una cédula de laminación de tres pases.

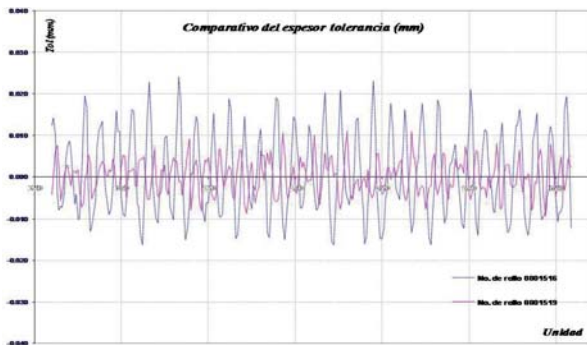


Fig. 6. Comparativo de la variabilidad del espesor durante el pase para la cédula No. 1 o del tipo campana, número de rollo 0801516 y cédula No. 2, tipo progresiva, número de rollo 0801519.

estudio se enfocó en mantener una dispersión mínima en la variabilidad del espesor con un Cpk lo más cercano a 2.0, con el propósito de mantener controlado un peso por área (gr/m^2) en el acero estándar. Bajo este concepto las cintas de acero pueden tener aplicaciones especiales sobre todo al sector automotriz.

CALIDAD SUPERFICIAL

Durante la generación de cédulas y puesta en práctica de las mismas se evaluó la forma del material, lo que es planicidad medido en unidades $I(U)$, así como el porcentaje de inclinación de la ondulación, porcentaje de elongación, porcentaje de planicidad, las prácticas se llevaron a cabo de acuerdo a las normas ASTM A1030/A1030M-05.¹¹

El método estándar para la evaluación de planicidad está estandarizado bajo la norma ASTM antes mencionada. En ella se define las UI como una relación existente entre la longitud de onda y la altura de la onda en una sección estandarizada de la lámina. Cada término está descrito de una manera amplia en dicha norma.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La variable en especial que movía el modelo de laminación es el porcentaje de reducción en frío, el cual se fijó en base práctica asumiendo un porcentaje máximo para el primer pase de alrededor 30%, el cual está sujeto a la capacidad del motor de entrada y se ve reflejado en el modelo por la potencia utilizada. Posteriormente se realizan porcentajes menores al primero y así gradualmente, excluyendo a la cédula de tipo campana que presenta una reducción máxima

en el segundo pase pero la cual está sujeta a la capacidad de operación del motor principal.

Se comparan los resultados de dos cédulas de laminación propuestas tomándolas como ejemplo. De estos resultados se define que la cédula de tipo progresiva experimenta un arco de contacto mayor con respecto a la cédula del tipo campana en el primer pase, debido a que la fuerza de separación, en conjunto con el porcentaje de reducción durante el pase será mayor afectando el área de contacto proporcionalmente. Se mantiene un coeficiente de fricción constante durante el pase manteniendo una longitud del arco de contacto mayor con respecto a la cédula de campana, para la cédula de tipo campana en el segundo pase el área de contacto es mayor debido al incremento del porcentaje de reducción en conjunto con la fuerza de separación; en este caso, siendo mayor la longitud del arco de contacto, debido a los incrementos de fuerza y reducción, ver figura 7.

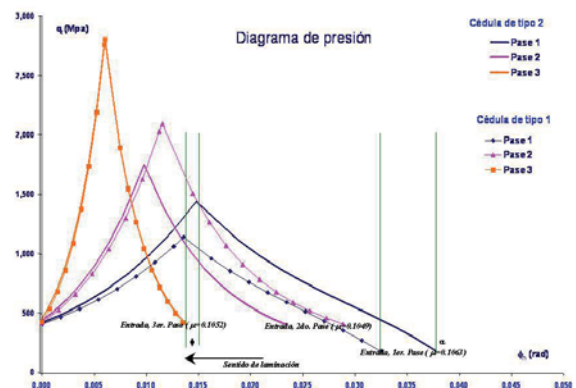


Fig. 7. Comparativo del análisis del diagrama de presión con respecto a la cédula del tipo 1 ó de campana y la cédula de tipo 2 denominada progresiva. a) Diagrama de presión, sobreponiendo la cédula del tipo campana (No.1) sobre la cédula progresiva (No.2), comparando el comportamiento del ángulo y longitud del arco de contacto.

PERFIL DE ESPESOR

Durante las diferentes etapas de la investigación se describieron cédulas mediante una representación gráfica, con el propósito de mantener una distribución de carga uniforme durante el pase, al apoyarse con los valores predichos por el modelo.

El desarrollo de las cédulas permite trabajar con la mejor distribución de potencia utilizada para laminación, y la manera de lograr reducir el consumo de energía es distribuyendo los porcentajes de reducción durante la secuencia

de pases respetando límites de carga para cada reducción, en la práctica repercute sobre la operación de laminación al momento de que el operador describe el comportamiento del molino con un menor esfuerzo de laminación durante la reducción.

En la figura 8a), se plasman las representaciones gráficas de dos cédulas de laminación en donde se pone en práctica la investigación, además una redistribución de la reducción empleada durante los pases y la carga de laminación empleada, se registran valores del modelo predicho en cuanto potencia utilizada de laminación.

La reducción de potencia se obtuvo debido a la redistribución de los porcentajes de reducción durante el pase en conjunto con carga empleada. El perfil del espesor se mantiene satisfactoriamente y presenta una dispersión debajo de los límites de control, la figura 8b) y c), plasma estos resultados.

COMPORTAMIENTO DE LA PLANICIDAD

Los resultados que se obtuvieron en este estudio fueron satisfactorios, demuestran que las cédulas desarrolladas permiten mantener la forma y calidad del material. Una regla fundamental es mantener criterios de calidad desde el inicio, es decir la corona para los rodillos de trabajo, materia prima de buenas condiciones, geometría de laminación adecuada para el pase, la velocidad de operación estándar y estable, diámetro de rodillos de trabajo ideal para el espesor adecuado, lubricación del material constante y con su concentración dentro de tolerancia.

Manteniendo todos estos parámetros dentro de las tolerancias permisibles es entonces posible obtener resultados satisfactorios de forma. Cuando se desarrollan cédulas de laminación con el fin de buscar forma y calidad superficial, lo que se busca es mantener una longitud de la ondulación de cresta a cresta lo más larga posible y, por consiguiente, manteniendo oscilaciones de baja altura.

PERFILES ASIMÉTRICOS - CUÑA

Se realizó primeramente la medición de este parámetro a diferentes números de cintas de acero, abarcando diferentes números de cédulas de laminación, y dando una aplicación especial a las dos últimas cédulas de laminación generadas (en especial a la cédula número 88), en las cuales se investiga el

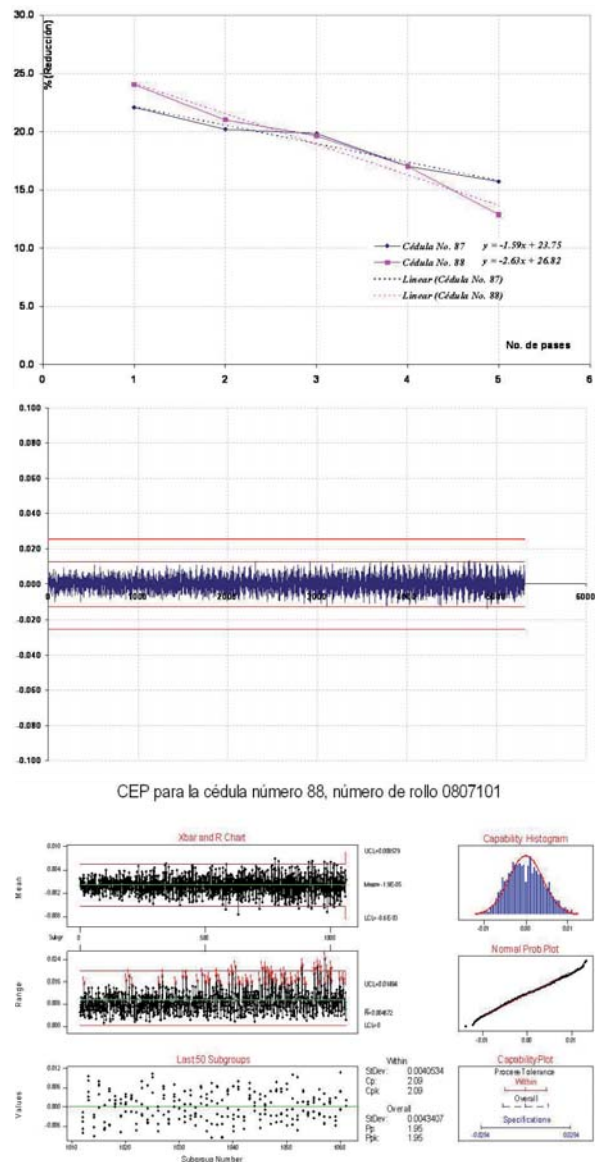


Fig. 8. Cédulas de laminación en frío que experimentaron diferente pendiente de laminación durante la generación de la cédula de laminación. a). Comparativo de cédula número 87 con respecto a la cédula número 88, comparativo con respecto a eficiencia (J/tonm) y potencia (kJ/seg).

comportamiento del espesor así como la relación de corona o el perfil del espesor a lo ancho de la cinta.

De acuerdo a la figura 9 incisos a) y b) se puede ver que los perfiles de la cinta entran de forma asimétrica y con la aplicación de la cédula progresiva es posible recuperar el material, tanto en ambas cédulas aplicadas, se obtuvo un buen perfil del espesor de salida recuperando la simetría, pasando de una relación de corona de 1.5 a 0.71 completamente

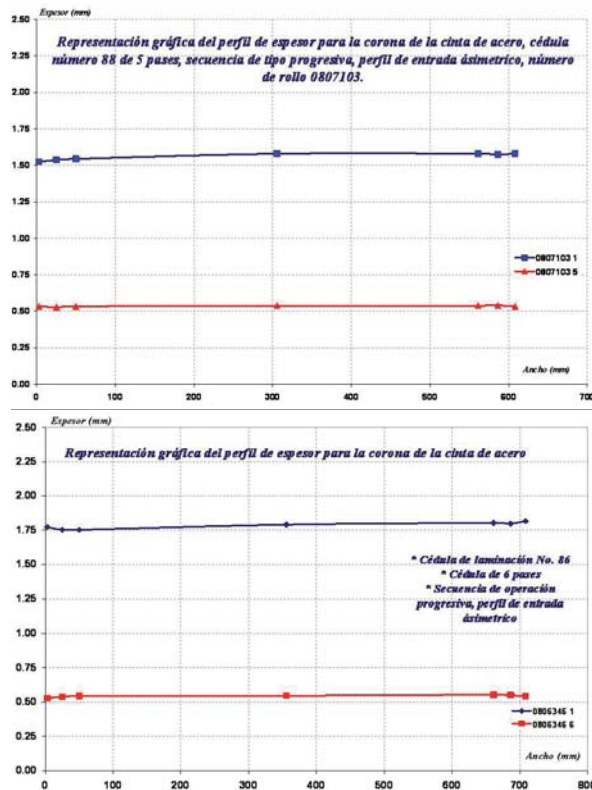


Fig. 9. Representación gráfica del perfil de corona para cintas de acero 1006 de las cédulas de laminación número 88, a) Comportamiento de la acuña para los números de rollo 0807103 1P, 0807103 5P, b) Comportamiento de la cuña para los números de rollo 0806346 1P, 0806346 6P.

recuperado y una cuña que pasó de 0.04 a 0.01 mm en esta cédula.

Estas pruebas demuestran que es posible corregir o controlar la cuña que presentan las cintas de acero desde el inicio del proceso por medio de prácticas de laminación. La cédula progresiva es una de la más efectiva en este tipo de producción debido a que es posible recuperar después del primer pase la forma ideal de la cinta.

CONCLUSIONES

Aplicar un porcentaje alto desde el inicio permite recuperar adecuadamente las características de forma de la cinta de acero laminada en frío grado 1006 mediante el uso de un molino laminador en frío reversible de cuatro rodillos.

Se establecieron cédulas de reducción progresivas que permiten obtener un perfil de espesor consistente con baja planicidad en cintas de acero de banda asimétrica.

El uso del modelo permite obtener un control estricto de calibre, al mismo tiempo optimiza las cédulas de laminación a partir de los porcentajes de reducción durante los pases de una manera progresiva.

La optimización de la fuerza de separación y predicción de la misma permite reducir la potencia y con esto no sólo reduce el número de pases, sino que controla el consumo de energía durante la operación.

La comprobación del modelo permitió generar 88 cédulas de laminación en frío, con las que se procesaron más de 1,500 toneladas de cinta de acero.

El uso de estas cédulas resultó en la mejora de la tolerancia del espesor y forma, repercutiendo en las líneas de galvanizado y pintado al cumplir con las estrictas tolerancias, especificaciones de forma y calibre en estas líneas.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Villacero por el tiempo, apoyo y a la UANL área de Posgrado de FIME.

LISTADO DE SÍMBOLOS

- s Presión radial.
- N Fuerza friccional.
- N_h Componente horizontal de la fuerza friccional.
- L Fuerza normal.
- L_h Componente horizontal de la Fuerza normal.
- μ Coeficiente de fricción promedio.
- A, B y C Puntos de sección en el área de contacto.
- θ Ángulo que abarca del punto de salida al diferencial analizado.
- θ_n Ángulo en el punto neutro de la mordida de laminación.
- σ_1 Esfuerzo axial de tensión del desenrollador.
- σ_2 Esfuerzo axial de tensión del enrollador.
- R Radio del rodillo de trabajo sin deformar.
- F Fuerza horizontal.
- f Esfuerzo principal a lo largo de la línea de laminación.
- w Esfuerzo principal en dirección transversal (no se muestra en figura 1).
- h_1 Espesor de entrada del producto o de la cinta.

h_2 Espesor de salida del producto o de la cinta.
 h_n Espesor del producto o de la cinta en el plano neutro.
 θ Ángulo de contacto de la mordida de laminación.
 r Reducción del material.
 $\dot{\epsilon}$ Velocidad de deformación en 1/s.
 D Diámetro del rodillo
 V_R Velocidad de operación del molino de laminación.
 σ_{yt} Resistencia a la cedencia bajo carga de tensión.
 $k=\sigma_c$ Resistencia de cedencia bajo compresión de constricción a deformación plana homogénea.
 σ_c Esfuerzo de constricción.
 R' Radio del rodillo de trabajo deformado.
 C Constante basada en el módulo de elasticidad del material del rodillo.
 b Ancho del material o cinta de acero laminada en frío.
 P_o Fuerza de separación (fuerza vertical).
 h Espesor del producto o de la cinta en cualquier punto del arco de contacto.
 H Expresión matemática en función del radio de rodillo y espesor del material reducido.
 H_1 Expresión matemática en función del radio de rodillo y espesor del material reducido en el plano de entrada.
 H_2 Expresión matemática en función del radio de rodillo y espesor del material reducido en el plano de salida.
 H_n Expresión matemática en función del radio de rodillo y espesor del material reducido en el plano neutro.
 q_0 Presión vertical en el área de contacto.
 k_1 Resistencia a la cedencia bajo compresión de constricción a deformación plana homogénea en el plano de entrada.
 k_2 Resistencia a la cedencia bajo compresión de constricción a deformación plana homogénea en el plano de salida.
 k Resistencia de cedencia bajo compresión homogénea.
 q_t Esfuerzo principal en dirección vertical.
 L Longitud arco de contacto.

$\%r$ Porcentaje de reducción en frío.
 hc Espesor central.
 hI' Espesor del lado de caída de orilla.
 hI'' Espesor del lado del operador.
 hI' Espesor del lado del motor principal.
 UI Índice de planicidad (unidades de UI).
 Cpk Índice de capacidad del proceso real

REFERENCIAS

1. SAE J403, Chemical Compositions of SAE Carbon Steels. The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space. Rev. Nov. 2001.
2. Eustace C. Larke, AM.I. Mech. E., A, The Rolling of Strip, Sheet and Plate, 1956.
3. Orowan, E. The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling. Proc. Inst. Mech. Eng., 1943, p.140.
4. Elastic deformation of Rolls during Cold Rolling. A.S.M.E. Research Publication, Roll Neck Bearing. Published by Amer. Soc. Mech. Eng. (New York), 1935.
5. George E. Dieter, Mechanical Metallurgy, Si Metric Edition, 1988.
6. Evaluation of the Frictional Characteristics of Rolling Emulsions, Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo, SOMIM, Vol.2, Número 6. Año 7, Marzo 2008. Vicente Espinosa Cantú, Martha P. Guerrero Mata, Tomás Lozano y Rafael Colas.
7. ASTM A370/A370M-07b, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
8. A 109/A 109M – 08, Standard Specification for Steel, Strip, Carbon (0.25 Maximum Percent), Cold-Rolled.
9. Flat Rolling Fundamentals, 2000. Ginzburg, V.B., and Robert Ballas
10. SPC-3, Statistical Process Control (SPC), Automotive Industry Action Group (AIAG), Second Edition 2005.
11. ASTM A1030/A1030M-05, Measuring Flatness Characteristics of Steel Sheet Products.