

Aumento de productividad en una planta de fabricación de electrodos de acero AWS 70S-6 mediante modificación de la etapa de trefilación húmeda

Increase in productivity in an AWS 70S-6 steel electrode manufacturing plant by modifying the wet drawing stage

Rodrigo Allende¹, Alfredo Artigas^{1,2}, Alberto Monsalve¹, Linton Carvajal¹, Nelson Garza-Montes-de-Oca³ y Rafael Colás³

¹Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile.

²Laboratorio SIMET-USACH. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Santiago, Chile.

³Universidad de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Mecánica, Nuevo León, México.

rodrigo.allende@usach.cl

Resumen

Durante la realización de este trabajo se aunaron las fuerzas de dos empresas, una siderúrgica proveedora del alambón y una fábrica de electrodos de soldadura AWS 70S-6. Éstos se fabrican a partir de rollos continuos en básicamente dos etapas de trefilación: en seco, que consta de 9 hileras aplicando reducciones desde los 6,00 mm hasta los 2,21 mm, y en húmedo (10 hileras) desde los 2,21 mm hasta 0,90 mm, sin tratamiento térmico intermedio. La motivación fue poder utilizar la capacidad instalada de la planta de 1000 ton/mes. Previo a este trabajo, la productividad era cercana a 800 ton/mes. Esta baja productividad se atribuyó principalmente a los cortes no deseados que ocurren durante el proceso de trefilado en húmedo que entorpecen la continuidad de la operación. Este trabajo tuvo como objetivo disminuir la cantidad de cortes en la etapa de trefilación en húmedo, mediante la modificación de la distribución de las tasas de reducción de trefilado, implementando un tren de trefilación dinámico, que consideró las distintas tasas de desgaste de las hileras que se hacen mayores conforme disminuye la sección transversal del alambre. Tras la modificación en la distribución de hileras, se observó una disminución en los cortes por trefilación en húmedo, lo que se tradujo en un aumento de la productividad de la planta y en una disminución del consumo de hileras.

Palabras Clave: Trefilación húmeda de aceros; aumento de productividad.

Abstract

During the execution of this work, two companies, a steel supplier of the wire rod and an AWS 70S-6 welding electrode factory, joined forces. The electrodes are made from continuous rolls in basically two stages of drawing: dry, consisting of 9 die applying reductions from 6.00 mm to 2.21 mm, and wet (10 die) from 2.21 mm down to 0.90 mm, without intermediate heat treatment. The motivation was to use the installed capacity of the plant of 1000 ton/month. Prior to this work, productivity was close to 800 ton/month. This low productivity was mainly attributed to the undesired cuts that occur during the wet drawing process that hinder the continuity of the operation. The objective of this work was to reduce cuttings in the wet drawing stage by implementing a dynamic drawing mill, which considered the fact that the wear rates of the dies become larger as the cross-section of the wire decreases. This implementation allowed modifying the die distribution, and thus the distribution of drawing reduction rates, after which a decrease in the cuts by wet drawing was observed, resulting in an increase of the productivity of the plant and a reduction of the wearing of dies.

Keywords: Wet wire drawing of steels; productivity increase.

Introducción

Descripción de la situación a estudiar

El objetivo de este trabajo fue aumentar la productividad de una planta productora de electrodos AWS 70S-6 mediante la modificación de la distribución de las tasas de reducción que se desarrollan durante el trefilado húmedo. En un artículo previo se realizó la optimización de la misma planta, pero modificando la distribución de reducciones que se desarrollan durante el trefilado en seco (Artigas *et al.*, 2019) (etapa previa).

En esta sección se presentará la condición en la que operaba la planta, previo a la modificación de la distribución de reducciones, con el afán de contextualizar el problema para una mejor comprensión de la propuesta realizada.

La planta productora de electrodos AWS 70S-6, posee una capacidad nominal de 1000 ton/mes, de la que bajo las condiciones de operación previas a la propuesta que modifica la distribución de las tasas de reducción se utilizaba el 80% (800 ton/mes). Esta baja en la productividad real se atribuye, principalmente, al tiempo requerido para retomar el proceso luego de los cortes indeseados que se producen tanto por defectos en el material, como en la soldadura, o a fallas atribuibles a la trefilación. Se pretende disminuir el tiempo que la planta está detenida, pues se espera que una modificación de la distribución de las tasas de reducción disminuya tanto los cortes como el consumo de hileras y con ello la productividad de la planta se incremente.

La planta, antes de la modificación de las tasas de reducción presentaba la distribución como la ilustrada en la Figura N° 1 (esta distribución no emplea los

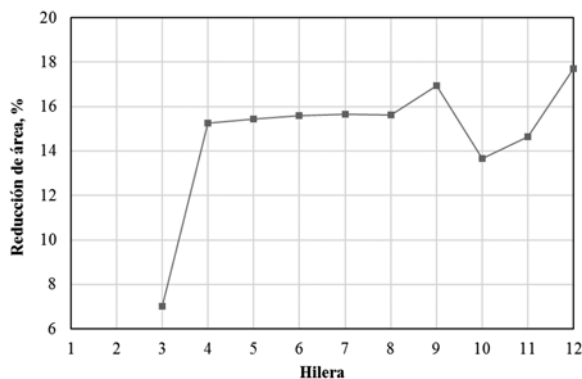


Figura N° 1. Distribución de hilera previo a la propuesta.

dos primeros dados a pesar de contar con la capacidad por diseño de máquina), en la que se observa que la última tasa de reducción es la mayor de todo el tren. Cabe mencionar que esta hilera se encuentra fuera del baño de trefilación húmedo y es la responsable del acabado superficial y ajuste dimensional para que el alambre presente dimensiones acordes a las tolerancias permitidas.

La distribución de hilera presentada en la Figura N° 1, responde a la política de minimizar el cambio de éstas y con ello “disminuir” su consumo, puesto que esta distribución permite brindar mayor utilización a las hilera de mayor sección (1 a 6) y en cada turno cambiar las últimas cuatro. Además, se puede mencionar que la cantidad de cortes producto de la trefilación se concentra principalmente en las hilera 9 y 12 que corresponden a aquellas que presentan mayores tasas de reducción. Cada uno de estos cortes detiene la producción durante 25 minutos aproximadamente, lo que en el balance mensual corresponde a 62 horas; adicionalmente, la planta está detenida cerca de 23 horas producto del cambio de hilera que se realiza en cada turno (tres cada día). Ambos efectos totalizan una pérdida de productividad equivalente a aproximadamente 123 ton/mes de alambre.

Trefilación

Para comprender mejor este proceso, se entenderá trefilación como aquel proceso de conformado en el que mediante una carga tractiva se estira una barra a través de un dado, provocando una reducción en la sección transversal (Dieter, 1968). La Figura N° 2, presenta un esquema del proceso de trefilación, en el que se reduce la sección transversal de una barra de perfil redondo desde un diámetro D_i a uno D_f , mediante la aplicación de una fuerza de tiro, que hace

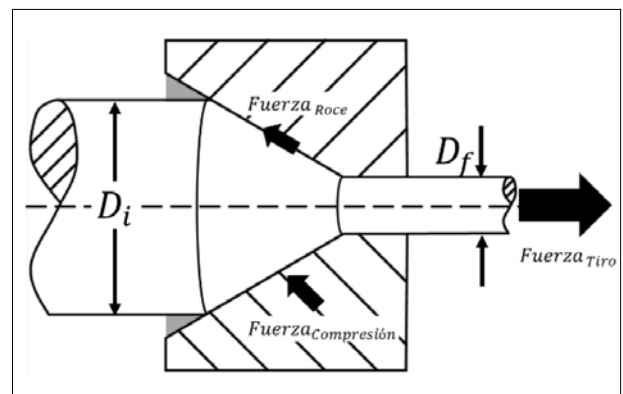


Figura N° 2. Esquema del proceso de trefilación.

pasar la barra a través de un dado de sección cónica truncada. Por la aplicación de esta fuerza tractiva, se producen fundamentalmente dos respuestas, una del tipo compresiva y responsable de la reducción de área y otra, la fuerza de roce, en la intercara entre el dado y la barra, que se opone al movimiento de ésta.

En la etapa de trefilación en seco se produce la reducción de área del alambroón desde 6,00 mm hasta 2,21 mm, mediante el paso del acero a través de sucesivas hileras de trefilación a una velocidad de 12 m/s. Durante el paso del alambre a través de las hileras éste es lubricado con jabones en polvo cálcicos y/o sódicos. Al final es bobinado, enfriado y enviado a la etapa de trefilación húmeda.

En el proceso de trefilación influyen varios parámetros, que pueden clasificarse en dos grandes grupos. El primero reúne a los parámetros del tipo geométrico, que son propios del material a trefilar como del dado empleado, y el segundo responde al roce, producto de la calidad superficial del producto y de la lubricación empleada.

La reducción de área obtenida tras hacer pasar el alambre a través del dado, se puede determinar según la ecuación 1, en que A_i corresponde al área a la entrada del dado (cuando el diámetro es D_i) y A_f corresponde al área a la salida del dado (cuando el diámetro es D_f).

$$\text{Reducción de área (\%)} = \frac{A_i - A_f}{A_i} \cdot 100 \quad (1)$$

Sea cual sea el análisis que se realice para la determinación de cómo varía la carga de trefilación (W_T)

en función de los parámetros del proceso (reducción de área, ángulo del dado, límite elástico del material y coeficiente de roce), siempre se parte de la premisa (Peña, 2008) de que la energía invertida como esfuerzo, o carga, de trefilación, está compuesta por la energía interna de deformación (W_I), la energía por trabajo redundante (W_S) y la energía para vencer el roce que existe entre el material trefilado y el dado (W_F) (ecuación 2).

$$W_T = W_I + W_S + W_F \quad (2)$$

Fabricación de electrodos AWS 70S-6

Los electrodos AWS 70S-6 (American National Standards Institute, 2012), corresponden a alambres de 0,90 mm de sección transversal nominal (0,88 mm a 0,93 mm), recubiertos con cobre y su fabricación se realiza mediante trefilación de soldaduras continuas, que se divide en dos etapas, una en seco y otra húmeda. En la Figura N° 3 se presenta un esquema de ambas etapas.

En la etapa de trefilación húmeda, todo el tren de trefilación, dispuesto en forma de conos de trefilación (Figura N° 4a), es sumergido en un baño de trefilación que cumple los objetivos de lubricar y actuar como refrigerante durante el proceso (Figura N° 4b). Luego de la trefilación en húmedo, el alambre es decapado y cobrizado para luego sufrir la última reducción de área para fijar mecánicamente el recubrimiento de cobre y así dar el acabado superficial y sección transversal adecuados. Con ello se logra la obtención de alambres cobrizados de entre 0,88 mm y 0,93 mm de sección transversal, para uso como electrodos de

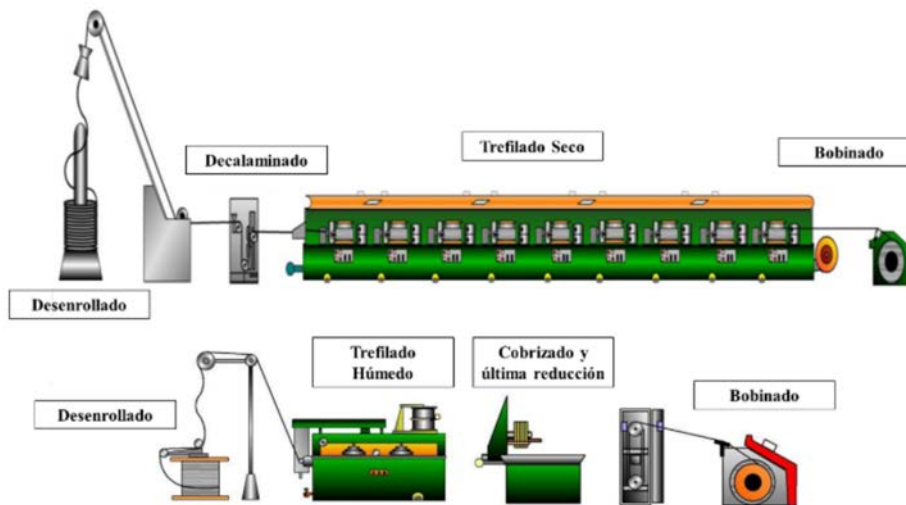


Figura N° 3. Esquema del proceso de trefilación.



Figura N° 4a. Conos de trefilación en húmedo. a. Distribución de las hileras; 4b. hileras sumergidas en el baño durante el proceso.

soldadura GMAW.

Metodología

Clasificación de cortes

Con el propósito de aumentar productividad de la planta de trefilación, se procedió a realizar un catastro de la situación actual de ésta (trefilado en seco y húmedo), que consistió en cuantificar el desgaste de los dados, los cortes producidos y una clasificación de éstos en:

1. Fallas por la unión soldada de una bobina con otra o de los cortes producidos durante la trefilación.
2. Fallas por la materia prima producto de inclusiones o pliegues de laminación y/o incrustaciones.
3. Cortes producidos por trefilación.

Propuesta de modificación de distribución de reducciones de área.

Tras la clasificación de cortes, se identificaron las variables operacionales de los equipos empleados para trefilación húmeda, las dimensiones de los conos de trefilación y sus velocidades de rotación, y se consideró que el alambre tenía una sección nominal de 0,90 mm a la salida del tren. Con ello se determinó una distribución de tasas de reducción teóricas (por diseño de máquina) que se basó en la constancia de volumen experimentada en deformación plástica homogénea, para mantener el alambre bien posicionado sobre los conos de trefilación a lo largo del proceso; esta distribución se denotó como nominal. Análogamente al caso de la distribución nominal, se obtuvieron distribuciones teóricas denotadas como máximas y mínimas, obtenidas tras la consideración de secciones transversales del alambre de salida de 0,93 y 0,88 mm (tolerancias del alambre). Finalmente se optó por proponer una distribución que se en-

contraba entre estos dos casos extremos, que se hizo cargo también del mayor desgaste de las últimas hileras, dada la mayor longitud de material que pasa por ellas, aumentando el efecto tribológico.

Se realizaron pruebas de trefilación de 100 toneladas con la distribución propuesta, en las que nuevamente se estudiaron y clasificaron los cortes y se determinó el desgaste de los dados, y con ello se evaluó la nueva distribución, en relación con la original.

Resultados Y Análisis

Tras la consideración del tamaño del diámetro de los conos de trefilación en húmedo y las velocidades de rotación de éstos, constancia de volumen por deformación plástica homogénea y una sección transversal de salida de 0,90 mm (diámetro nominal del alambre para electrodo AWS 70S-6), se obtuvo la distribución nominal (Tabla N° 1), cuyas reducciones de la sección transversal son del orden de 14%, salvo la última reducción que tiene un valor menor, caso que corresponde al ideal de funcionamiento del equipo. Las distribuciones de reducción de área se presentan también en la Figura N° 5 para las distribuciones nominal, antes de la propuesta y la propuesta. La hilera denotada como 0 corresponde al diámetro del alambre al inicio del tren de trefilación.

El propósito de la trefilación húmeda es el de proveer de un medio que lubrique y enfríe el alambre durante las sucesivas reducciones de área, por ello se requiere que el alambre “deslice” sobre los conos y con ello el medio de lubricación (baño de jabón) cumpla su propósito; de ahí es que la propuesta incorpora reducciones de área un 5% superiores al ideal (nominal), que junto con brindar un deslizamiento adecuado del alambre sobre los conos de

N° Hilera	Distribución nominal		Distribución propuesta	
	Diámetro hilera [mm]	Tasa de reducción [%]	Diámetro hilera [mm]	Tasa de reducción [%]
0	2,21	-	2,21	-
1	2,05	14,18	2,09	14,89
2	1,90	14,15	1,93	14,85
3	1,76	14,10	1,78	14,81
4	1,63	14,13	1,64	14,84
5	1,51	14,10	1,52	14,81
6	1,40	14,12	1,40	14,82
7	1,30	14,10	1,29	14,81
8	1,20	14,12	1,19	14,82
9	1,11	14,10	1,10	14,81
10	1,03	14,12	1,02	14,83
11	0,96	14,10	0,94	14,81
12	0,90	11,51	0,88	12,09

Tabla N° 1. Distribución nominal y propuesta.

trafilación, impide que el alambre se enrede por una elongación excesiva entre pasada y pasada, manteniendo el alambre “tenso” durante el proceso. Adicionalmente, este 5% de reducción adicional provoca que al inicio de cada ciclo de trafilación, el alambre tenga una sección transversal de salida de 0,88 mm (tolerancia mínima de los electrodos AWS 70S-6) que aumentará conforme el efecto tribológico se haga presente en el dado de salida.

La propuesta incorpora también, el concepto de tren dinámico de trafilación que se hace cargo de las distintas tasas tribológicas que experimentan los dados durante su uso, pues considera que los últimos dados presentan un mayor desgaste. Lo anterior se puede explicar de la siguiente manera. Considere las desviaciones de la idealidad que se presentan en la Figura N° 6. Entiéndase desviación como la diferencia entre el diámetro de la distribución en cuestión y el de la distribución nominal. Se parte de la premisa de que el desgaste en un tiempo dado de las distintas hileras no es el mismo, puesto que la longitud del alambre va en aumento conforme disminuye su

sección transversal, haciendo que la longitud total de alambre que pasa a través de las hileras aumente mientras menor sea su sección transversal; por ello el desgaste de las últimas hileras será mayor que el de las primeras.

Al observar en la Figura N° 6 la curva relativa a la desviación de la distribución propuesta respecto a la nominal se debe tener en cuenta que los datos localizados en su extremo derecho son aquellos de menor diámetro localizados hacia el final del tren de trafilación y que, consecuentemente, sufren un mayor desgaste. Conforme se desgasten, su sección transversal aumentará y en primera instancia se acercarán a la dimensión nominal, para luego seguir aumentando su sección transversal hasta tender a la distribución máxima. Cuando la sección transversal del último dado pase de 0,88 mm a 0,93 mm habrá que cambiar esa hilera puesto que de lo contrario se obtendría un alambre de mayor sección a la tolerada por AWS.

En lo que respecta a las hileras de la izquierda -las primeras, de mayor sección transversal-, éstas ya se encuentran en el rango de desviación negativa -presentan mayores secciones transversales que las nominales- y conforme se desgasten tenderán a la distribución máxima al igual que el caso anterior; no obstante, su desgaste será mucho menor al caso anterior, es decir, que aunque toda la curva “asciende”, la parte correspondiente a las primeras hileras lo hará menos, por lo que el tren completo tenderá a la distribución máxima cuando el diámetro de la hilera de salida se encuentre cercano a la tolerancia máxima. De lo anterior, la distribución propuesta incorpora el desgaste dinámico que experimenta el tren durante la trafilación en húmedo.

Respecto a la distribución original antes de la propuesta, se puede comentar que su mayor desvío respecto del nominal se encuentra muy desplazado hacia secciones transversales mayores. Esto provoca que el alambre tras pasar la misma cantidad de hileras que en la distribución nominal presente dimensiones mayores, que son compensadas con mayores reducciones hacia el final, cuando el alambre está más duro y más frágil también (Rojas *et al.*, 2008), siendo ésta la principal causa de que los cortes antes de la propuesta se concentren en aquellos dados.

Tras la prueba de trafilación industrial, se observó que los cortes producto de trafilación disminuyeron desde 1,5 cortes/ton a 0,5 cortes/ton, y la tasa de desgaste de las hileras disminuyó en un 50%, dismi-

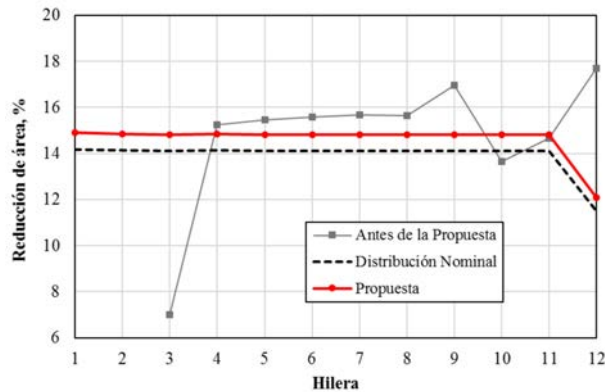


Figura N° 5. Distribuciones de tasas de reducción.

nuyendo con ello a la mitad los costos asociados al efecto tribológico. Lo descrito anteriormente se traduce en un aumento de la productividad de 54 h/mes, que se traduce en 75 ton/mes adicionales de producción de alambre para electrodos. Es decir, luego de las modificaciones del tren de laminación húmeda, la productividad de la planta aumento en un 9,4%, llegando hasta las 875 ton/mes de alambre cobrizado para electrodos AWS 70S-6.

Conclusiones

Se realizó un estudio de la situación de una planta de trefilación húmeda que producía a un 80% de su capacidad nominal, identificando que los principales responsables de ella correspondían a la alta cantidad de cortes producto de la trefilación (problemas de diseño del tren) y el consumo de las hileras.

Tras el levantamiento realizado a las variables dimensionales de los conos de trefilación empleados, se determinó una distribución ideal, la que, junto con aplicar mejoras a la lubricación del sistema, se mo-

Referencias

American National Standards Institute. 2012. Norma ANSI/AWS A5.18/A5.18M-99. Specification for carbon steel electrodes and rods for gas Shielded Arc Welding. Vol. 1. Washington DC, USA.

Artigas A, Allende R, Monsalve A, Carvajal L, Garza-Montes-de-Oca N, Colás R. 2019. Aumento de productividad en una planta de trefilación de aceros para la fabricación de electrodos AWS 70S-6. *Ingeniare* 27: 210-216. 2019. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000200210>

Dieter D. 1968. *Mechanical metallurgy*, SI metric

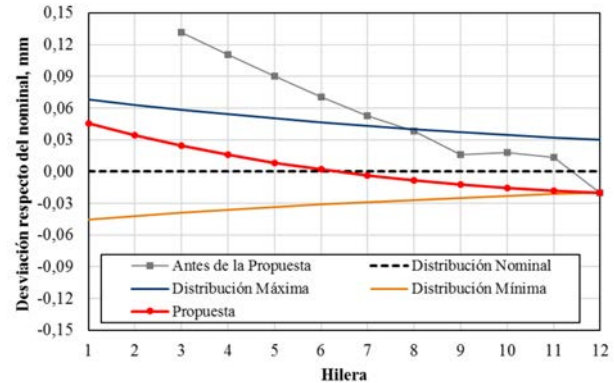


Figura N° 6. Desviaciones de la idealidad de los diámetros de las hileras.

dicó para lograr que el alambre deslizará sobre los conos para mejorar la extracción calórica del alambre durante sus sucesivas reducciones.

Tras pruebas del tren dinámico propuesto, se verificó un aumento de la productividad de la planta de un 9,4% que se tradujo en 75 ton/mes de producción adicional de la planta. Se espera que mejoras en las materias primas (menor nivel de inclusiones, por ejemplo) y en los procesos de soldadura de alambón inicial incrementen, aún más, la productividad de la planta de alambre para electrodos AWS 70S-6.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los proyectos DI-CYT, Código 051614AA, Vicerrectoría de Investigación, Desarrollo e Innovación, y al proyecto 1555LD; ambos de la Universidad de Santiago de Chile.

Rodrigo Allende desea agradecer a Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica, CONICYT-PFCHA/Doctorado Nacional/2017-21170167 por el financiamiento de sus estudios de postgrado.

edition. McGraw-Hill Book Company. 3a Edición Internacional. Vol. 1, 635-650. Londres, UK.

Peña J. 2008. Análisis del proceso de trefilado de tubos. Tesis, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Rojas E, Celentano D, Artigas A, Monsalve A. 2008. Simulación experimental y numérica de un proceso de trefilado húmedo de un alambre de acero al carbono” *Ingeniare* 16: 188–194. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052008000100008>