

Evaluación de desgaste en una matriz de forjado para la fabricación de herrajes eléctricos

Santiago Andrés Vargas Ayala

Trabajo de grado (proyecto de investigación) para optar el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Cristian Camilo Viafara Arango

PhD en Ingeniería Mecánica

Codirector

Ana María Pérez Ceballos

PhD en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2019

Tabla de Contenido

Introducción 11

1. Objetivos 13

1.1 Objetivo General 13

1.2 Objetivos Específicos 13

2. Marco Teórico 13

2.1 Forjado en Caliente 13

2.2 Desgaste de Herramientas 15

2.2.1 Deformación plástica 15

2.2.2 Lubricación 16

2.3 Fabricación de Prensa-hilos 16

2.4 Tratamiento Térmico del acero AISI H13 18

3. Metodología Experimental 20

3.1 Revisión Bibliográfica 20

3.2 Recopilación de Antecedentes 20

3.3 Caracterización de las Muestras 21

3.3.1 Metalografía 21

3.3.2 Microscopía Óptica y Electrónica 22

3.3.3 Espectroscopía de Emisión Óptica 22

3.3.4 Ensayo de Dureza 23

3.4 Análisis de Resultados 23

4. Resultados y Discusión.....	24
4.1 Condiciones del Proceso de Forjado en Caliente	24
4.2 Sistema Tribológico.....	25
4.3 Caracterización de la Pieza de Trabajo.....	26
4.4 Caracterización de la Herramienta de Forjado	28
4.5 Caracterización de la Superficie Desgastada de la Herramienta	31
5. Diagnóstico del Proceso de Forjado del Prensa-hilos.....	34
6. Conclusiones	35
7. Recomendaciones	37
Referencias Bibliográficas.....	38
Apéndices	40

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Resultados de composición química para el acero ASTM A36	26
Tabla 2. Resultados de dureza bajo norma ASTM E18 para el acero ASTM A36 antes del proceso de forjado	28
Tabla 3. Resultados de dureza bajo norma ASTM E18 para el acero ASTM A36 después del proceso de forjado	28
Tabla 4. Resultados de composición química del acero de herramientas H13.....	29
Tabla 5. Resultados de dureza bajo norma ASTM E18 para el acero de herramientas H13.....	31

Lista de Figuras

Figura 1. Ilustración de una grapa prensora o prensa-hilos.....	16
Figura 2. a) Vista frontal placa después del proceso de forjado, b) Proceso de impresión de canales	17
Figura 3. Probeta de muestra que sufrió desgaste de la matriz de acero de herramientas AISI H13.....	22
Figura 4. Placa de acero al carbono antes del proceso de forjado	24
Figura 5. Microestructura del acero ASTM A36, sección longitudinal a 200x atacada con Nital al 2%. a) Antes del forjado b) después del forjado.....	27
Figura 6. Microestructura del acero de herramientas AISI H13, atacada con Schrader a) 100x b) 1000x	29
Figura 7. Micrografía de la probeta atacada con Picral del acero AISI H13 obtenida por SEM a 5000x a) Electrones Retrodispersados b) Electrones Secundarios	30
Figura 8. Resultados EDS del acero AISI H13 a) carburo de Mo b) carburo de V.....	30
Figura 9. Matriz. a) Parte inferior, b) Parte superior	32
Figura 10. Detalle del desgaste de la parte superior de la matriz.	32
Figura 11. a) Fotografía de la probeta desgastada a través del estereoscopio b) Detalle	32
Figura 12. Micrografía de la muestra desgasta del acero AISI H13 obtenida por SEM a) 2000x, b) 800x.....	33
Figura 13. Micrografía de la muestra desgasta del acero AISI H13 obtenida por SEM a) 200x, b) 2000x.....	34

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Diagrama de revenido de la ficha técnica acero para trabajar en caliente Böhler W302 (AISI H13).....	40

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE DESGASTE EN UNA MATRIZ DE FORJADO PARA LA FABRICACIÓN DE HERRAJES ELÉCTRICOS

AUTOR: SANTIAGO ANDRÉS VARGAS AYALA**

PALABRAS CLAVE: FORJADO, DESGASTE ABRASIVO, FRICCIÓN, LUBRICACIÓN

DESCRIPCIÓN:

La empresa Metallan SAS fabrica herrajes eléctricos mediante diferentes procesos. Uno de estos procesos involucra el forjado en caliente de una placa de acero ASTM A36 en donde se imprime un par de canales sobre la placa mediante una matriz de acero de herramientas AISI H13. La empresa reporta una baja vida útil de la matriz, lo cual genera un incremento en los costos de producción debido al desgaste prematuro que sufre la herramienta. Por lo anterior es necesario realizar un diagnóstico del proceso que permita identificar las causas del deterioro prematuro de la herramienta. La pieza de trabajo y la herramienta se caracterizaron mediante Espectroscopía de Emisión Óptica (OES), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS), análisis metalográfico y ensayos de dureza. Los resultados obtenidos indican que la microestructura martensítica, la composición química y la dureza del acero AISI H13 son adecuados para la aplicación. De acuerdo con la caracterización del acero ASTM A36 antes y después del tratamiento térmico no se genera un cambio significativo, por lo que el tratamiento térmico que sufre la pieza puede no ser útil. El diagnóstico arrojó una serie de causas que posiblemente están generando el deterioro prematuro en la matriz; consecuencia de que los óxidos de hierro pueden tener un papel altamente abrasivo, al formarse sobre las placas de acero ASTM A36 debido al proceso de calentamiento y no ser retirados, Los óxidos actúan como un elemento interfacial generándose desgaste abrasivo por tres cuerpos. Además, la falta de lubricación promueve el deterioro prematuro de la matriz al generarse una mayor fricción y por lo tanto un mayor desgaste y deformación plástica en la superficie de la matriz.

*Trabajo de grado

**Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Cristian Camilo Viáfara Arango, Ingeniero Mecánico. Codirectora: Ana María Pérez Ceballos, Ingeniera Metalúrgica

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF WEAR IN A FORGING DIE FOR THE
MANUFACTURING OF ELECTRICAL FITTINGS

AUTHOR: SANTIAGO ANDRÉS VARGAS AYALA**

KEYWORDS: FORGING, ABRASIVE WEAR, FRICTION, LUBRICATION

DESCRIPTION:

The company Metallan SAS manufactures electrical fittings through different processes. One of these processes involves hot forging an ASTM A36 steel plate where a couple of channels are printed on the plate using an AISI H13 tool steel die. The company reports a low life of the die, which generates an increase in production costs due to premature wear suffered by the tool. Therefore, it is necessary to make a diagnosis of the process that identifies the causes of premature deterioration of the tool. The workpiece and the tool were characterized by Optical Emission Spectroscopy (OES), Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), metallographic analysis and hardness tests. The results obtained indicate that the martensitic microstructure, chemical composition and hardness of AISI H13 steel are suitable for the application. According to the characterization of ASTM A36 steel before and after the heat treatment a significant change is not generated, so the heat treatment that the piece undergoes may not be useful. The diagnosis showed a series of causes that are possibly causing premature deterioration in the die; As a result of iron oxides having a highly abrasive role, when formed on ASTM A36 steel plates due to the heating process and not being removed, the oxides act as an interfacial element generating abrasive wear by three bodies. In addition, the lack of lubrication promotes premature deterioration of the die by generating greater friction and therefore greater wear and plastic deformation on the surface of the die.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
Director: Cristian Camilo Viáfara Arango, Ingeniero Mecánico. Codirectora: Ana María Pérez Ceballos, Ingeniera Metalúrgica

Introducción

Existen diversos procesos industriales en los cuales superficies sólidas interactúan entre sí generando fricción, lo cual conlleva a que diferentes piezas de los equipos sufran un desgaste. Este desgaste genera pérdidas económicas considerables, debido a que propicia un funcionamiento ineficiente de los equipos o herramientas y plantea la necesidad de reemplazar las piezas afectadas. Por ejemplo, en Estados Unidos se calcula que el costo total de reemplazo de piezas desgastadas es mayor a \$100 mil millones de dólares al año (Kalpakjian y Schmid, 2008). Por lo tanto, un estudio encaminado a encontrar las causas que generan aquellas fallas se presenta como una prioridad para incrementar utilidades y reducir costos en la industria.

No es despreciable la reducción en costos que se estima al aplicar diseños tribológicos mejorados a los procesos industriales (Hutchings y Shipway, 2017). Se reduce en costos directos al disminuir gastos energéticos como el que involucra la energía disipada por la fricción o la energía requerida para fabricar repuestos. De igual modo se reducen los costos indirectos consecuencia de los primeros al evitar por ejemplo paradas en la planta o disminución en la producción.

La empresa Metallan SAS fabrica herrajes eléctricos por medio de diversos procesos. Uno de los herrajes se llama prensa-hilos, el cual es fabricado mediante el proceso de forjado en caliente de una placa de acero al carbono (ASTM A36). Para realizar el forjado se utiliza una matriz de acero de herramientas AISI H13, la cual está presentando un desgaste prematuro. Lo anterior obliga a realizar un rectificado frecuente de la parte superior y de la parte inferior de la matriz por parte de la empresa. Es por esto que se hace necesario un diagnóstico del comportamiento en

desgaste del material de la matriz que permita establecer las causas que generan este deterioro prematuro y que a su vez ocasiona un incremento en los costos de producción.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Estudiar el deterioro prematuro de la matriz de forjado en caliente para la fabricación de prensa-hilos en la empresa Metallan.

1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar y evaluar el proceso de forjado en caliente realizado por la empresa Metallan para obtener los prensa-hilos.

Caracterizar la herramienta y la pieza de trabajo mediante análisis químico, análisis metalográfico y ensayos de dureza.

Realizar un diagnóstico que permita conocer las causas del deterioro prematuro de la matriz de estampado para la fabricación de prensa-hilos.

2. Marco Teórico

2.1 Forjado en Caliente

El forjado es un proceso de deformación en donde por medio de dos troqueles o matrices se le da forma a una pieza. Esto mediante fuerzas de compresión ya sea usando presión gradual o impacto (Groover, 2007). Existen tres rangos de temperaturas en las cuales se realiza el conformado plástico de metales: trabajo en frío y, trabajo en caliente por debajo y por encima de la temperatura de recristalización. La mayor ventaja que ofrece el trabajo en caliente es la capacidad de realizar

mayores deformaciones plásticas en relación con el trabajo en frío y el trabajo por debajo de la temperatura de recristalización. Esto debido a que la resistencia de fluencia o el límite elástico durante el trabajo en caliente disminuye por la recristalización de nuevos granos que están libres de dislocaciones (Askeland, 2004). Por lo tanto, la ductilidad aumenta significativamente.

Según Groover (2007), el trabajo en caliente comprende temperaturas por encima de la temperatura de recristalización, la cual es aproximadamente $0.5 T_m$ en la escala absoluta. Ya en la práctica se trabaja en un rango entre $0.5 T_m$ y $0.75 T_m$ ya que, aunque a mayores temperaturas es más fácil deformar el metal, la deformación también genera calor por lo que es posible generar fusiones localizadas en la pieza de trabajo, lo cual es indeseable. Para el forjado en caliente de los aceros al carbono y de baja aleación Kalpakjian y Schmid (2008), sugieren un intervalo aproximado de temperaturas de 850 a 1150 °C y advierten que este intervalo se debe considerar como una guía general. El trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización según Groover (2007) comienza usualmente a partir de $0.3 T_m$ hasta $0.5 T_m$, donde T_m es el punto de fusión del metal particular (temperatura absoluta).

El trabajo en caliente en relación con el trabajo en frío y el trabajo por debajo de la temperatura de recristalización presenta las siguientes ventajas (Groover, 2007): la pieza de trabajo se puede alterar significativamente, se requiere un menor esfuerzo para deformar la pieza de trabajo, se pueden deformar metales que se fracturan en otros tipos de trabajo, no existe una orientación de granos por lo que la propiedad de resistencia mecánica es generalmente isotrópica y no se genera endurecimiento por deformación, lo cual es útil en algunas aplicaciones. De igual modo tiene las siguientes desventajas en comparación con las otras formas de trabajo (Groover, 2007): menor precisión dimensional, mayor gasto energético, oxidación de la superficie de trabajo, menor vida útil de las herramientas y acabado superficial más deficiente.

2.2 Desgaste de Herramientas

El desgaste se puede definir como un deterioro o una pérdida de material sobre una superficie, ocasionada por un movimiento relativo entre dos cuerpos en contacto (Zum-Gahr, 1987). Durante el contacto entre asperezas de los cuerpos se origina la fricción, la cual actúa como una resistencia al movimiento. Para llevar a cabo un estudio adecuado es necesario realizar un análisis del sistema tribológico en el que intervienen diferentes variables como las propiedades de los materiales y las condiciones en que interactúan estos.

Un sistema tribológico consiste en tomar una fracción lo más cercana posible de donde se presenta la interacción entre componentes que sufren desgaste e incluir las variables que intervienen en el sistema como el movimiento, las fuerzas aplicadas, el ambiente, la masa, entre otras (Zum-Gahr, 1987). Zum-Gahr (1987) clasifica un sistema tribológico con cuatro elementos: cuerpo sólido, contracuerpo, elementos interfaciales y ambiente.

De acuerdo con el movimiento que se produce en el sistema los procesos de desgaste se pueden clasificar en desgaste por deslizamiento, por rodamiento, por oscilación, por impacto y erosivo (Zum-Gahr, 1987). Otras descripciones de los procesos de desgaste según Zum-Gahr (1987) incluyen el estado físico del contracuerpo, ya sea sólido, líquido o gaseoso. De igual modo se pueden relacionar según el elemento interfacial, por ejemplo, desgaste por deslizamiento lubricado o desgaste por abrasión de dos o tres cuerpos.

2.2.1 Deformación plástica. Como se dijo anteriormente la deformación plástica es una de las causas principales de falla en las matrices de forjado en caliente. La vida útil de estas se acorta considerablemente debido al reblandecimiento térmico de la capa superficial, causado por los altos esfuerzos térmicos y el largo tiempo de contacto entre la matriz y la pieza de trabajo (Kim, Lee, Kim y Kim, 2005). La deformación plástica que se presenta durante el forjado en caliente en las

herramientas se debe a que esfuerzos acumulados durante la deformación a alta temperatura causan cambios en la microestructura (Marashi, Yakushina, Xicouchakis, Zante y Foster, 2017). Esto sucede en puntos críticos de la herramienta, es decir en zonas localizadas donde son mayores los esfuerzos.

2.2.2 Lubricación. Los lubricantes se aplican en la interfase herramienta-pieza de trabajo para reducir los efectos perjudiciales de la fricción. Entre las funciones que tienen los lubricantes está reducir el calor en las herramientas, reducir la adherencia entre la herramienta y la pieza de trabajo y disminuir el desgaste (Groover, 2007). El grafito en suspensión coloidal en agua o aceite es un lubricante recomendado para el proceso de forjado en caliente (ASM, 1996). Este lubricante es efectivo debido a su resistencia a elevadas temperaturas y a que tiene un bajo coeficiente de fricción, ya que es débil en cortante a lo largo de sus planos basales (Kalpajkian y Schmid, 2008).

2.3 Fabricación de Prensa-hilos

La empresa Metallan SAS ubicada en la capital santandereana produce y comercializa diferentes tipos de herrajes eléctricos. La figura 1 muestra uno de estos tipos denominado prensa-hilos o grapa prensora.

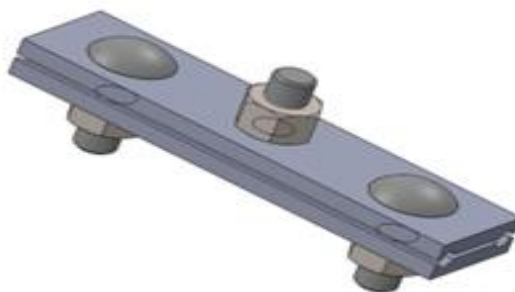


Figura 1. Ilustración de una grapa prensora o prensa-hilos. Recuperado de <http://metallan.com.co/metallan/services.php#>

Una de las etapas que se lleva a cabo durante la producción de la grapa prensora es la impresión de los canales o ranuras a las placas de acero al carbono ASTM A36. La figura 2 ilustra el proceso de impresión de los canales a las placas de acero ASTM A36. Esta etapa se realiza mediante el proceso de forjado en caliente. Las placas son llevadas a un horno donde son calentadas para reducir la resistencia mecánica e incrementar la ductilidad de la pieza de trabajo. Posteriormente son llevadas a una prensa de fricción donde las placas son forjadas después del proceso de calentamiento mediante una matriz de acero de herramientas AISI H13.

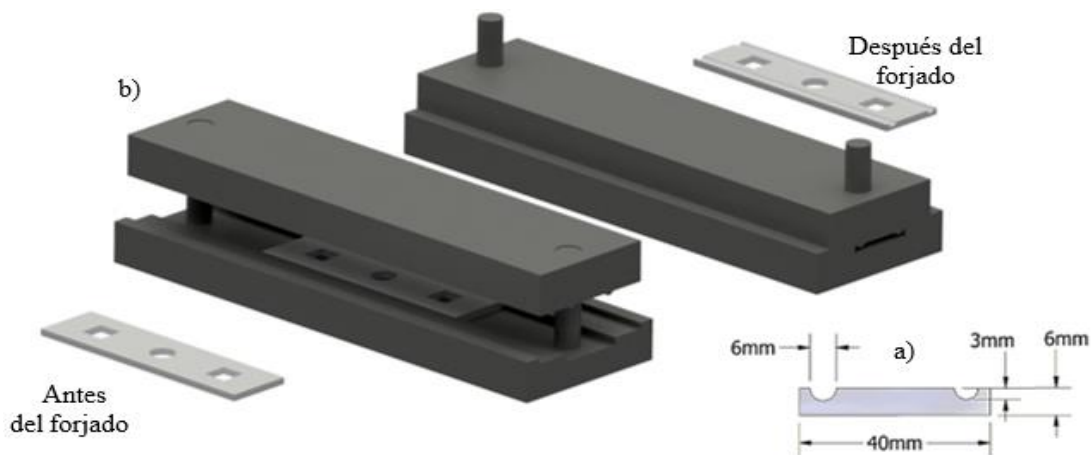


Figura 2. a) Vista frontal placa después del proceso de forjado, b) Proceso de impresión de canales

Como se mencionó anteriormente para el proceso de forjado se utiliza una matriz de acero de herramientas AISI H13 que es suministrado por la Compañía General de Aceros S.A. Esta herramienta cuesta alrededor de \$ 2.000.000 COP y es posteriormente enviada por la empresa Metallan a la empresa Böhler, la cual le suministra el tratamiento térmico adecuado para soportar los altos esfuerzo mecánicos y térmicos. Este tratamiento térmico consiste en una serie de pasos para conseguir una microestructura apropiada que permita cumplir con la aplicación requerida y será explicado en el siguiente numeral. La herramienta soporta alrededor de 4000 ciclos, entendiéndose por ciclo cada pieza forjada. Esto en términos de tiempo es inferior a dos días de

trabajo, en donde por turno se forjan alrededor de 2700 piezas. Después de someter la matriz a esta jornada de trabajo en caliente, los canales pierden las dimensiones toleradas por lo que es necesario realizar un rectificado, el cual tiene un costo de \$800.000 COP, 40% del valor de la herramienta, y se realiza mediante corte en hilo.

2.4 Tratamiento Térmico del acero AISI H13

Para determinar el tratamiento térmico más adecuado, es necesario hacer uso de ciertas herramientas y de conocer ciertos principios fundamentales. El diagrama hierro-carbono, las curvas que muestran la dinámica de las transformaciones de fase, las condiciones de operación de la pieza, la templabilidad, los principios de revenido de los aceros, el conocimiento de los medios de enfriamiento, comprensión de los esfuerzos residuales inducidos en el tratamiento, etc., constituyen la base para realizar el diseño del tratamiento térmico apropiado para cada caso, de acuerdo con la Sociedad Americana de Metales (ASM, por sus siglas en inglés, 1991). Los aceros de herramientas son usualmente sometidos a un tratamiento de temple y revenido con el fin de adquirir la mejor combinación posible entre resistencia mecánica y tenacidad (Venkatesan, 1997).

El tratamiento térmico de temple y revenido requiere varios pasos. Por lo tanto, el primer paso consiste en elevar la temperatura a la temperatura de austenización que, para el acero AISI H13 es de 995 a 1025 °C (ASM, 1993). Cuando los aceros son rectificadas, se recomienda realizar un tratamiento térmico de precalentamiento entre 785 y 815° C durante 10 o 15 minutos para el alivio de tensiones (Bryson, 2013). De no realizarse esta operación esas tensiones generarían una distorsión en la herramienta. El tiempo de permanencia a la temperatura de austenización debe garantizar una homogenización de toda la pieza. Bryson (2013) sugiere 30 minutos por pulgada de la sección transversal. Ya con la austenita en toda la herramienta se realiza un enfriamiento

rápido. De acuerdo con la ficha técnica de Böhler, el temple en un acero AISI H13 se realiza al aire, en aceite o en baño de sales según las dimensiones de la herramienta. La transformación de la austenita en martensita generalmente ocurre por debajo de los 350 °C.

La martensita es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa. Su dureza es de 50 a 68 HRc, siendo uno de los microconstituyentes más duros de los aceros, después de los carburos y de la cementita (Apraiz, 1949). La martensita se obtiene a partir de la transformación de la austenita mediante un enfriamiento rápido a una velocidad superior a la crítica del temple. Lograr una microestructura en su mayoría martensítica en toda la herramienta es posible gracias a la composición química del AISI H13, ya que los elementos de aleación desplazan las curvas de transformación hacia la derecha, brindando un mayor tiempo para que ocurra esta transformación (Askeland, 2004). El acero siempre tendrá un porcentaje de austenita, la cual es llamada “austenita retenida” (Bryson, 2013). Ahora bien, aunque en este estado la herramienta tiene una alta dureza, no es útil debido a la alta fragilidad que presenta. Esto se corrige con el tratamiento térmico de revenido, el cual consiste en calentar la herramienta por debajo de la temperatura crítica Ac1. Por encima de esta temperatura se transformaría la estructura obtenida con el temple. El objetivo del revenido es convertir la herramienta en un componente útil, aumentando su ductilidad, disminuyendo su dureza y eliminando las tensiones internas generadas durante el temple (Apraiz, 1949). Además, se busca aumentar su tenacidad al impacto lo cual es de gran importancia ya que la herramienta también estará sometida a cargas de impacto. Para el acero AISI H13 se recomienda calentar sobre 510 °C para obtener un endurecimiento secundario y así obtener una máxima dureza, o a temperaturas más bajas para obtener una dureza más baja. También se recomienda la aplicación de un doble revenido, es decir mantener a esta temperatura por dos horas, enfriar al aire y nuevamente repetir el ciclo de revenido anterior. Ocasionalmente un tripe revenido puede ser

deseable (ASM, 1993). El acero AISI H13 tiene elementos formadores de carburos como lo son el Vanadio, Cromo, Molibdeno por lo que durante el proceso de revenido estos elementos se precipitan en forma de carburos lo que explica la alta dureza de la microestructura (Molera, 1991). Un alto contenido de Vanadio promueve la dispersión de carburos de Vanadio duros lo cual aporta una alta resistencia al desgaste (ASM, 1993).

3. Metodología Experimental

Con el fin de cumplir los objetivos planteados se ejecutó la metodología que se describe a continuación.

3.1 Revisión Bibliográfica.

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica durante todo el proceso de investigación haciendo uso de los recursos bibliográficos físicos y electrónicos disponibles en la UIS, como libros, artículos de investigación y tesis de grado relacionados con temas de forjado en caliente, tribología, desgaste de matrices y afines. Además, se hizo una revisión de las normas técnicas para la realización de los ensayos y normas de especificaciones de los aceros involucrados en el estudio. De igual manera, fueron estudiados documentos técnicos de las empresas que intervinieron en el proceso de fabricación de los aceros mencionados anteriormente.

3.2 Recopilación de Antecedentes

Se realizó una recopilación de la información del proceso de forjado llevado a cabo en la empresa Metallan. Para esto se realizaron visitas técnicas a la empresa para observar las condiciones del proceso y para entrevistar al jefe de producción y al técnico del proceso, además de obtener

muestras para el análisis. Las muestras recolectadas para el estudio constan de una placa de acero al carbono ASTM A36 antes del proceso de forjado en caliente y una placa después del proceso, así como también una muestra del acero AISI H13 de la matriz.

3.3 Caracterización de las Muestras

3.3.1 Metalografía. Bajo la norma ASTM E3 se prepararon tres probetas para metalografía. Dos muestras del acero de bajo carbono (antes y después del proceso de forjado) y una muestra del acero de herramientas AISI H13. Las muestras fueron cortadas mediante disco abrasivo de carburo de tungsteno en el laboratorio de metalografía perteneciente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales y cada una de estas se montó en baquelita en caliente. Se realizó el desbaste mediante papel abrasivo número 80 hasta 1500. El proceso de pulido se llevó a cabo mediante paños y alúmina con granulometría de 3 μm y 1 μm . Bajo la norma ASTM E45-13 *Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel* se realizó la determinación del contenido de inclusiones presentes en el acero al carbono ASTM A36 y en el acero de herramientas AISI H13. Después de pulidas las muestras se someten al ataque con reactivos para revelar su microestructura. El ataque varió para las muestras de acero al carbono estructural ASTM A36 y para el acero de herramientas AISI H13. El acero ASTM A36 fue atacado con Nital al 2% por pocos segundos para revelar la microestructura, mientras que para el AISI H13 se atacó con Picral al 4% por aproximadamente 35 segundos y con Schrader (80 ml de etanol, 1g de ácido pícrico, 10 mL de HCL y 10 mL de HNO₃) por 20 segundos con el objetivo de revelar el antiguo borde de grano austenítico. Las probetas después del ataque fueron limpiadas con alcohol y posteriormente secadas con aire caliente.

3.3.2 Microscopía Óptica y Electrónica. El análisis macrográfico realizado con el estereoscopio Olympus SZ ubicado en el laboratorio de metalografía perteneciente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS permitió analizar la superficie desgastada de la matriz superior de acero AISI H13. Se obtuvieron las micrografías de las probetas del acero ASTM A36 y del acero de herramientas AISI H13 a través del Microscopio Óptico Olympus GX71 ubicado en el mismo laboratorio. Mediante la norma ASTM E112-13 *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size* se realizó la determinación de tamaño de grano para el acero al carbono ASTM A36 antes y después del proceso de forjado.

Se obtuvieron micrografías a mayores aumentos de la probeta anteriormente mencionada del acero de herramientas AISI H13 a través del Microscopio Electrónico de Barrido y se determinaron perfiles de concentración de elementos en diferentes puntos de la muestra usando la técnica de Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS). Adicionalmente, se preparó una probeta de la matriz desgastada con dimensiones de 15 mm x 3 mm con un espesor de aproximadamente 2 mm (figura 3) para su observación en el Microscopio Electrónico de Barrido QUANTA FEG 650 ubicado en el Laboratorio de Microscopía 102 del parque tecnológico de Guatiguará.



Figura 3. Probeta de muestra que sufrió desgaste de la matriz de acero de herramientas AISI H13

3.3.3 Espectroscopía de Emisión Óptica. Se obtuvo la composición química del acero de herramientas AISI H13 y del acero al carbono ASTM A36 en el Espectrómetro de Emisión Óptica

por Chispa marca Bruker Q8 Maguellan en el Laboratorio de Espectroscopía perteneciente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS. Se realizaron 6 quemas al acero H13 y 5 quemas a una probeta del acero bajo carbono obteniendo una composición promedio.

3.3.4 Ensayo de Dureza. Se realizó el ensayo de dureza Rockwell bajo la norma ASTM E18 *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials* mediante indentador de cono de diamante con 150 kgf de carga para el acero de herramientas AISI H13 y mediante indentador de bola de 1/16” y 100 kgf de carga para el acero al carbono ASTM A36. Se realizaron las indentaciones en el durómetro Wilson ubicado en el laboratorio de tratamientos térmicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS.

3.4 Análisis de Resultados

Por último, se realizó el análisis del deterioro prematuro que presenta la herramienta teniendo en cuenta los resultados obtenidos. Se comparó la caracterización obtenida de las muestras recopiladas, es decir, de la pieza de trabajo y de la herramienta, con la información presente en las especificaciones de las normas técnicas de los materiales en estudio y en la bibliografía consultada. Se realizó el análisis de la superficie desgastada de la herramienta, igualmente de las condiciones del proceso de forjado en caliente y de los procedimientos llevados a cabo por los técnicos de la empresa durante el proceso. Se realizó un diagnóstico teniendo en cuenta el sistema tribológico y las condiciones de operación del proceso.

4. Resultados y Discusión

4.1 Condiciones del Proceso de Forjado en Caliente

Durante las visitas efectuadas a la empresa Metallan SAS se observaron las condiciones del proceso de forjado en caliente para la fabricación del prensa-hilos. El proceso de forjado es realizado en caliente ya que las placas de acero ASTM A36 provienen de un proceso de trabajo en frío de acuerdo con la información suministrada por la empresa Metallan SAS. La figura 4 muestra la placa de acero al carbono ASTM A36 antes del proceso de forjado. Como se puede observar, las placas de aceros ASTM A36 en estado de entrega presentan una cascarilla. Esta cascarilla no es retirada y las placas se introducen en ese estado al horno para aumentar la temperatura de las placas y posteriormente someterlas al proceso de forja en caliente. No existe un conocimiento preciso de la temperatura a la cual se calientan las placas, ya que la empresa no cuenta con un dispositivo adecuado para medir la temperatura. Sin embargo, mediante la experiencia de los operarios la temperatura de calentamiento se basa en el color de las placas.

Mediante la observación del color al que son retiradas las placas del horno y realizando una comparación con la carta de colores del acero, se estima un rango de temperatura aproximado entre 870 a 980°C. Durante una de las visitas efectuadas a la empresa se observó que la temperatura de trabajo de las placas no se mantiene uniforme, ya que se presentaba una variación de colores en el grupo de placas.



Figura 4. *Placa de acero al carbono antes del proceso de forjado*

Después del periodo de calentamiento de las placas que es aproximadamente de 10 minutos, el operario las traslada, una por una, a la prensa de fricción para el proceso de deformación plástica. Se ubica placa por placa en la parte inferior de la matriz y la parte superior de la matriz desciende, comprimiendo la pieza de trabajo entre las dos matrices. Como resultado del calentamiento de las placas, sobre estas se forman óxidos de hierro. Teniendo en cuenta que los óxidos pueden tener un papel abrasivo, es importante notar que estos no son removidos antes de iniciar el proceso de forjado. Adicionalmente, se evidenció que durante el proceso de forjado en caliente no se realiza ningún tipo de precalentamiento a la matriz. La empresa no efectúa una limpieza a la herramienta antes de iniciar cada ciclo y tampoco realiza lubricación a la misma. Se pudo observar que, eventualmente, durante el proceso de forjado las placas de acero ASTM A36 quedaban adheridas a la parte superior de la matriz.

4.2 Sistema Tribológico

De acuerdo con la información recopilada se pueden identificar los siguientes factores que interactúan en el proceso de forjado en caliente:

- a. Medio (ambiente Metellan, Bucaramanga)
- b. Elemento interfacial (óxidos de hierro provenientes del acero ASTM A36, material desgastado de la herramienta).
- c. Contracuerpo (acero ASTM A36)
- d. Cuerpo (acero de herramientas AISI H13)

El medio está sujeto a la ubicación geográfica por lo que la temperatura y humedad relativa son característicos de la ciudad de Bucaramanga. Según el IDEAM la temperatura media anual para Bucaramanga está en un rango de 22 °C a 26 °C y la humedad relativa media anual se encuentra

en un rango de 80 a 85%. Debido a que dentro de la empresa se realizan diferentes procesos de manufactura también se presenta material particulado. Existe una capa de óxidos de hierro sobre las placas de acero al carbono (ASTM A36) al ser llevadas al proceso de forjado. Ésta capa de óxidos no es retirada por lo que actúa como un elemento interfacial, así como las partículas del material desgastado de la herramienta. Por lo anterior se presenta un mecanismo de desgaste abrasivo por tres cuerpos (Zum-Gahr, 1987). Las placas de acero al carbono anteriormente mencionadas actúan como el contracuerpo. Poseen una geometría rectangular y un espesor aproximado de 6 mm. El cuerpo corresponde a la herramienta, es decir, al acero de herramientas AISI H13. Como se podrá apreciar en las Figs. 9 y 10 la parte inferior de la matriz y las protuberancias de la parte superior de la herramienta interactúan mayormente con el contracuerpo, ya que sobre la parte inferior descansa la placa de acero ASTM A36 y las protuberancias son las encargadas de penetrar el acero ASTM A36 para imprimir los canales o ranuras.

4.3 Caracterización de la Pieza de Trabajo

La tabla 1 presenta el resultado de la composición química del acero al carbono estructural ASTM A36. La composición del material es acorde con la establecida en la norma ASTM A36/A36M-14 *Standard Specification for Carbon Structural Steel*.

Tabla 1
Resultados de composición química para el acero ASTM A36

C[%]	Mn[%]	P[%]	S[%]	Si[%]	Cr[%]	Cu[%]	Mo[%]	Ni[%]	Fe[%]
0.177	0.508	0.005	0.024	0.123	0.117	0.293	0.014	0.086	98.6
Desviación estándar									
0.009	0.004	0.008	0.000	0.001	0.001	0.003	0.000	0.002	0.015

Las micrografías tomadas con el microscopio óptico del acero A36 antes y después del proceso de forjado se presentan en la figura 5. Se puede apreciar una fase clara de granos de ferrita y en menor proporción, con un aspecto oscuro, se observa la perlita (microconstituyente eutectoide). El tamaño de grano es bastante fino, y mediante el método de comparación según la norma ASTM E112-13 se puede clasificar con un número de tamaño de grano ASTM # 8. En la figura 5a se puede apreciar una orientación de las colonias de perlita consecuente con un previo proceso de laminado en caliente. La figura 5b muestra la microestructura del acero ASTM A36 después del proceso de forjado. El tratamiento térmico al que es sometido no genera cambios apreciables en el tamaño de grano ni en la microestructura.

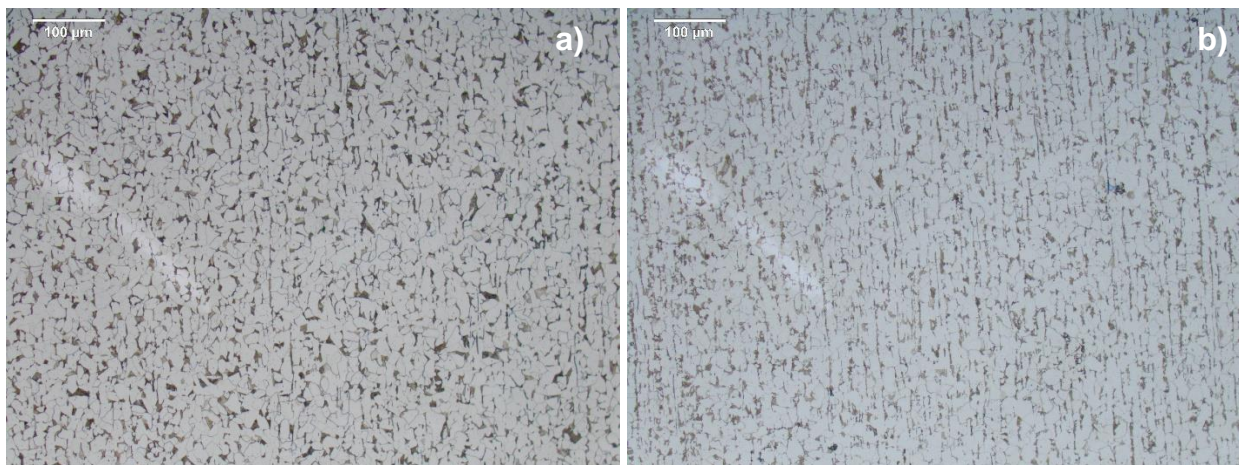


Figura 5. Microestructura del acero ASTM A36, sección longitudinal a 200x atacada con Nital al 2%. a) Antes del forjado b) después del forjado

La dureza del acero del A36 antes y después del forjado se presenta en las tablas 2 y 3. La similitud en el valor se puede explicar mediante las microestructuras, ya que no se evidencia ningún cambio relevante en el tamaño de grano de la ferrita ni en la perlita.

Tabla 2

Resultados de dureza bajo norma ASTM E18 para el acero al carbono A36 antes del proceso de forjado

Acero ASTM A36 antes del forjado					Promedio	Desviación estándar	
Dureza (HRB)	76	76	76	75	74	75	0.89

Tabla 3

Resultados de dureza bajo norma ASTM E18 para el acero al carbono A36 después del proceso de forjado

Acero ASTM A36 después del forjado					Promedio	Desviación estándar	
Dureza (HRB)	75	76	76	75	75	75	0.55

La dureza que presenta la pieza antes del tratamiento térmico es baja, ya que la pieza proviene de un proceso de laminado en caliente como se puede deducir por la cascarilla que presenta la placa de acero ASTM A36 mostrada en la figura 4 y se corrobora mediante la microestructura de la sección longitudinal (figura 5a). Después del tratamiento térmico la pieza no cambia sus propiedades mecánicas, ya que como se puede observar la dureza no varía. Por lo anterior, estos resultados permiten deducir que el tratamiento térmico al que es sometida la placa de acero ASTM A36 no tiene consecuencias significativas que sean útiles para el proceso de forja y el desempeño de la pieza de trabajo. En el caso de que se suministraran placas laminadas en frío, el tratamiento térmico sí sería necesario, por lo cual la empresa debería contar con una técnica de caracterización de las placas y así definir cuando las placas requieren el tratamiento térmico. La técnica podría ser una toma de dureza.

4.4 Caracterización de la Herramienta de Forjado

La tabla 4 presenta el resultado de la composición química del acero de herramientas AISI H13. El resultado presenta una composición típica de este material comparando con la norma ASTM

A681-08 la cual indica la especificación estándar para los aceros de herramientas.

Tabla 4

Resultados de composición química del acero de herramientas H13

C[%]	Mn[%]	P[%]	S[%]	Si[%]	Cr[%]	V[%]	Mo[%]	Ni[%]	Fe[%]
0.483	0.374	0.016	0.004	0.987	5.23	0.85	1.21	0.358	90.34
Desviación estándar									
0.098	0.009	0.000	0.000	0.031	0.081	0.016	0.028	0.004	0.232

En la figura 6 se presentan las micrografías del acero AISI H13 obtenidas a través del microscopio óptico. Se puede apreciar una estructura acicular característica de la martensita. Posiblemente con algo de austenita retenida (Bryson, 2013).

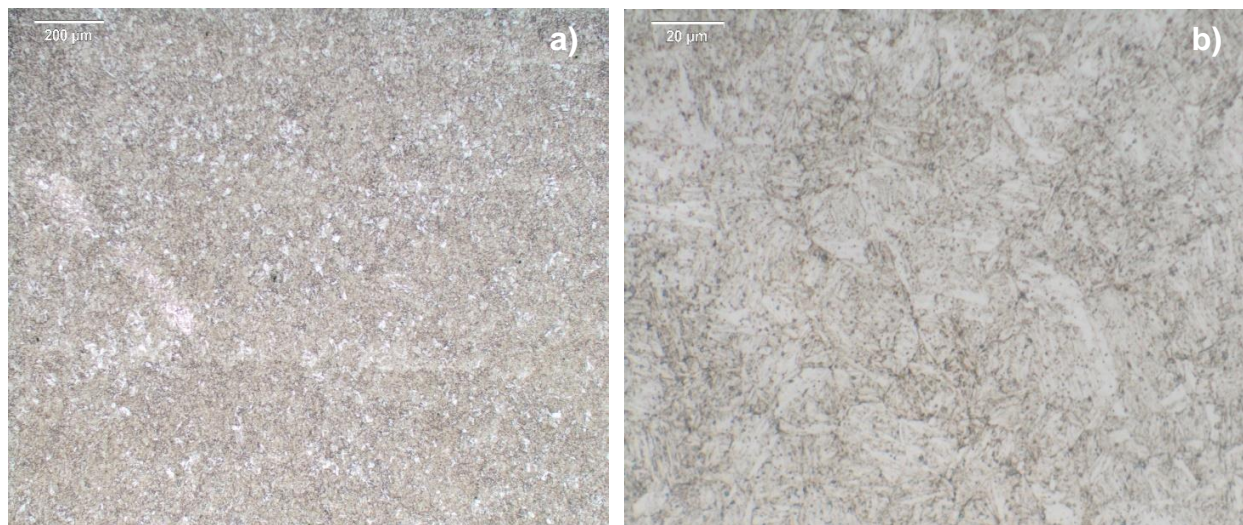


Figura 6. *Microestructura del acero de herramientas AISI H13, atacada con Schrader a) 100x b) 1000x*

En la figura 7 se muestran dos micrografías del acero AISI H13 obtenidas por SEM, mediante las técnicas de Electrones Retrodispersados (BSED) y Electrones Secundarios (SE). Es posible observar con claridad los granos previos provenientes de la fase austenita. Se aprecia la estructura acicular característica de la martensita y los carburos distribuidos sobre toda la matriz; gracias a los electrones secundarios se puede apreciar la morfología de los diferentes carburos.

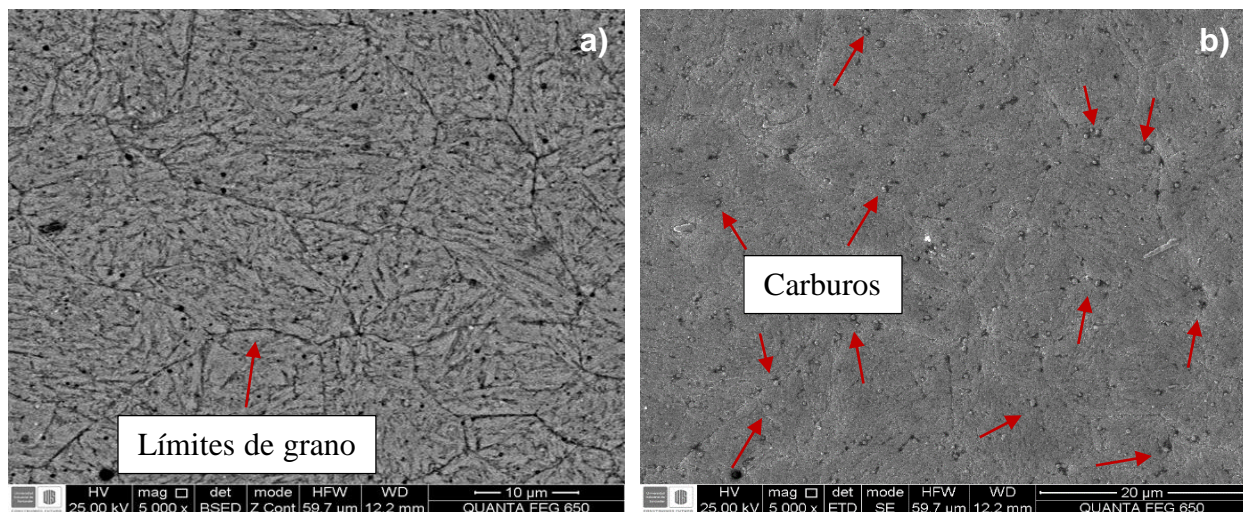


Figura 7. Micrografía de la probeta atacada con Picral del acero AISI H13 obtenida por SEM a 5000x a) Electrones Retrodispersados b) Electrones Secundarios

En la figura 8 se presentan las micrografías del acero AISI H13 obtenidas por el microscopio electrónico de barrido junto al espectro EDS de cada punto señalado en las micrografías.

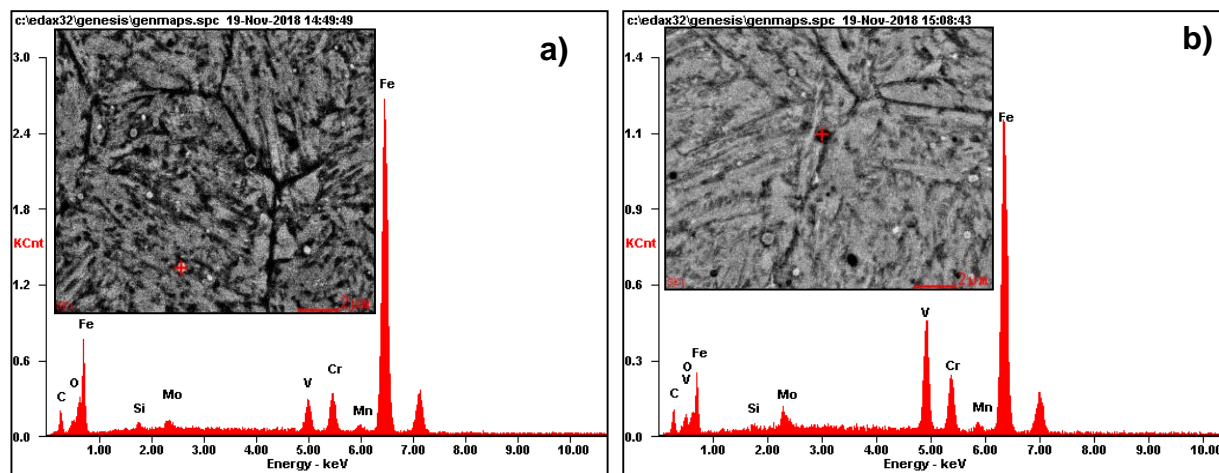


Figura 8. Resultados EDS del acero AISI H13 a) carburo de Mo b) carburo de V

Los resultados obtenidos en el SEM en conjunto con el EDS permiten diferenciar los tipos de carburos presentes en la microestructura. Mediante esta técnica se pueden identificar tres tipos de carburos distribuidos en la matriz. Los carburos de tonalidad más oscura corresponden a carburos de Vanadio como se puede corroborar en la figura 8b. La intensidad de emisión de los electrones retrodispersados depende del número atómico. Los átomos más pesados revelan una imagen más

brillante. Por lo anterior se puede suponer que los carburos más claros corresponden a carburos de Molibdeno y los de tonalidad gris conciernen a carburos de Cromo.

A continuación, se presentan los resultados de dureza obtenidos de la muestra del acero de herramientas.

Tabla 5

Resultados de dureza bajo norma ASTM E18 para el acero de herramientas H13

	Acero AISI H13					Promedio	Desviación estándar
Dureza (HRC)	51	51	49	51	51	51	0.89

El resultado promedio se acerca al consultado en la norma ASTM A681 que indica la especificación estándar para los aceros de herramientas, en el cual se obtiene una dureza de 52 HRC bajo una temperatura de revenido de aproximadamente 552 °C. Según la ficha técnica de Böhler la curva de revenido del acero AISI H13 indica una dureza de 50 HRC para una temperatura de revenido de 600 °C aproximadamente (Apéndice A). Esta alta dureza concuerda con el contenido de carbono mostrado en el resultado de composición química del AISI H13. Además, la herramienta recibió más de un proceso de revenido y parte de la austenita residual se transforma en martensita por lo que también se puede lograr un sensible aumento en la dureza (ASM, 1993).

4.5 Caracterización de la Superficie Desgastada de la Herramienta

En la figura 9 se presentan las fotografías de la parte inferior y superior de la matriz del acero AISI H13 que ha sufrido el deterioro prematuro. En la figura 9a es posible apreciar la deformación que sufre la parte inferior de la matriz y en la figura 9b se observan las protuberancias que imprimen los canales, es posible identificar la superficie que entra en contacto con la pieza.

En la figura 10 se presenta la fotografía de la muestra que fue cortada mediante hilo, de la parte superior de la matriz al perder las dimensiones toleradas. Se observa el desgaste que sufre la superficie de las protuberancias que entra en contacto con la pieza de trabajo.

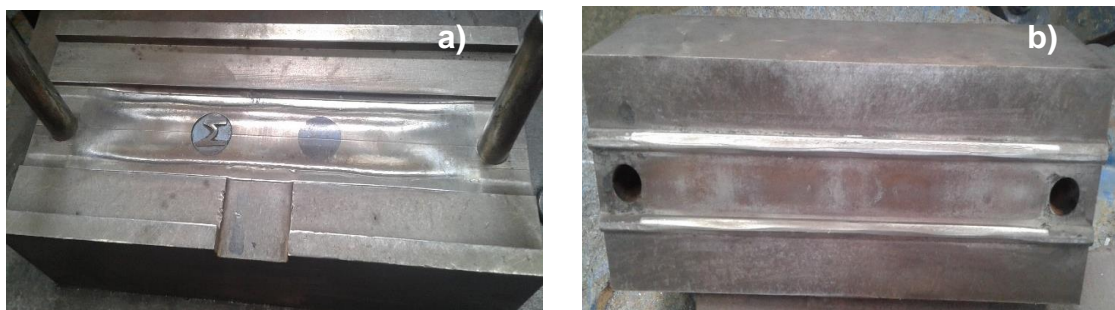


Figura 9. Matriz. a) Parte inferior, b) Parte superior



Figura 10. Detalle del desgaste de la parte superior de la matriz.

En la figura 11 se presenta la fotografía tomada a través del estereoscopio de la probeta indicada anteriormente (figura 3) y se puede apreciar el proceso de deformación que presenta el material después del proceso de forjado que se explicó anteriormente. Es evidente la pérdida de dimensiones de las protuberancias. A mayor detalle se puede apreciar un tipo de rayas o surcos en parte de las protuberancias que imprime los canales.

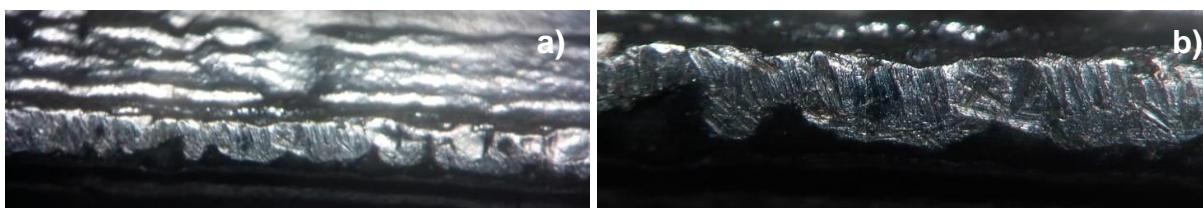


Figura 11. a) Fotografía de la probeta desgastada a través del estereoscopio b) Detalle

Las figuras 12 y 13 muestran las micrográficas obtenidas por microscopio electrónico de barrido de la probeta anteriormente mencionada a un mayor aumento. Como se indica en la figura 12a se aprecian surcos característicos del desgaste abrasivo (Zum-Gahr, 1987). En la figura 12b se puede observar posiblemente un óxido de hierro proveniente de la capa de óxidos sobre la placa de acero al carbono ASTM A36. Estos óxidos pueden actuar como un abrasivo y tienen durezas en un rango de 46 HRc a 70 HRc (Venkatesan, 1997). Como se indica en la figura 12b este óxido deja una marca abrasiva en su camino.

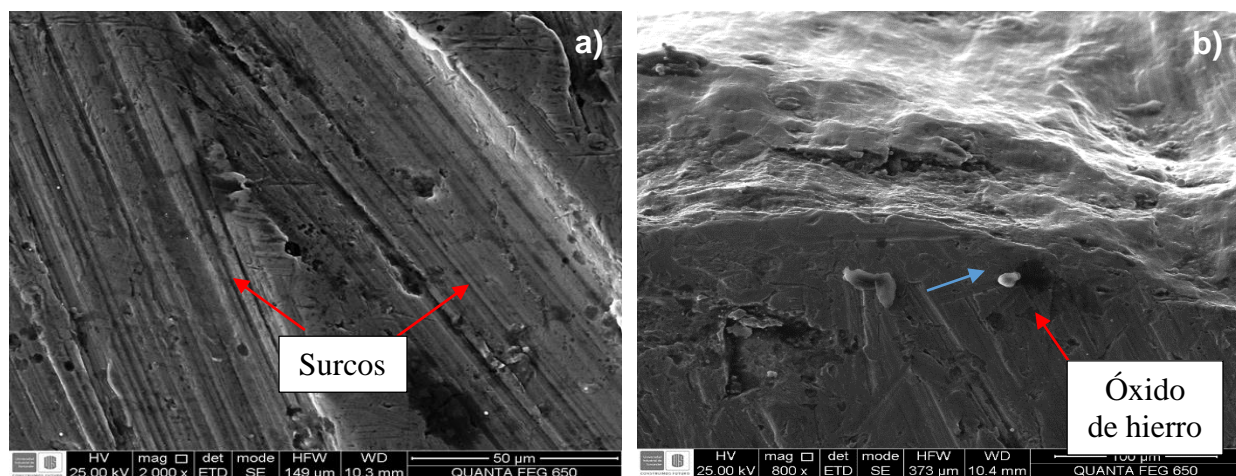


Figura 12. Micrografía de la muestra desgasta del acero AISI H13 obtenida por SEM a) 2000x, b) 800x

En la figura 13a se observa la deformación plástica originada sobre la herramienta debido al reblandecimiento de la superficie. En la figura 13b se aprecian marcas de desgaste adhesivo según Zum-Gahr (1987). Lo anterior como consecuencia del deslizamiento entre asperezas que generan altos esfuerzos localizados dando como resultado deformación plástica y adherencia sobre la superficie de la herramienta (Zum-Gahr, 1987). Esto de igual manera es relacionado con el alto coeficiente de fricción que se genera durante el trabajo en caliente.

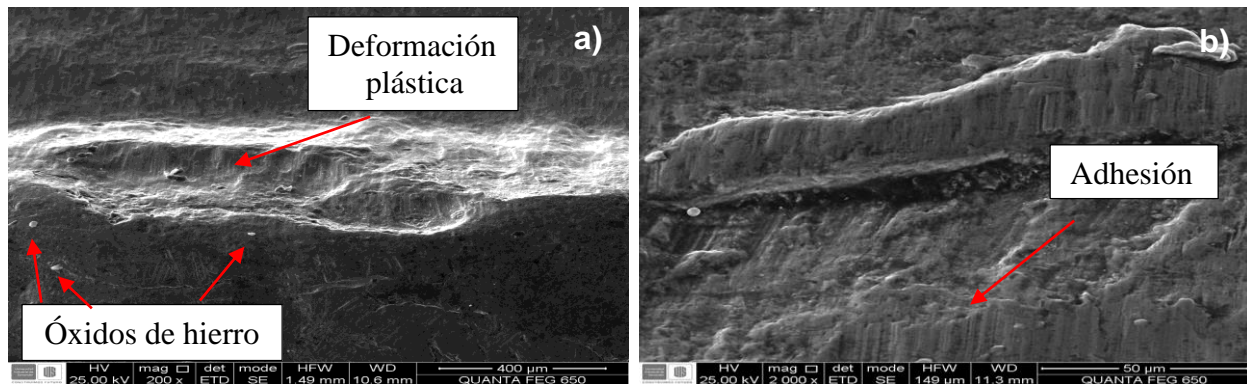


Figura 13. Micrografía de la muestra desgasta del acero AISI H13 obtenida por SEM a) 200x, b) 2000x

5. Diagnóstico del Proceso de Forjado del Prensa-hilos

Durante el proceso de forjado de la placa de acero A36 se presentan diferentes elementos que podrían explicar el deterioro prematuro de la matriz de acero AISI H13. La adhesión de la placa de acero A36 a la parte superior de la matriz se debe a la falta de lubricación antes del proceso de forjado. Esto es perjudicial para la vida útil de la matriz ya que permite contacto entre la matriz y la pieza de trabajo, bajo unas condiciones de carga mecánica y térmica que promueve un mayor reblandecimiento de la capa superficial de la herramienta (Kim et al., 2005). Este reblandecimiento térmico, añadido a la no uniformidad de temperatura de las placas posiblemente genera la deformación plástica debido a la acumulación de esfuerzos en los puntos críticos de la herramienta (Marashi et al., 2017). El desgaste adhesivo observado puede ser explicado por la formación y el rompimiento de enlaces adhesivos del material de la matriz de acero AISI H13. El desgaste abrasivo que se aprecia en la figura 13a es posiblemente ocasionado por los óxidos presentes sobre la placa A36 provenientes tanto del tratamiento previo de fabricación, como del tratamiento térmico que se lleva a cabo para realizar la forja. Esta capa de óxidos al no ser retirada actúa como un papel de lija sobre la superficie de la matriz, generando surcos o rayas y ocasionando pérdida

de material (Mesquita, 2017). De igual manera la falta de limpieza a la herramienta antes de cada ciclo de forja genera la acumulación de partículas resultantes de la capa de óxido que ocasionan desgaste abrasivo por tres cuerpos (Zum-Gahr, 1987). El uso de lubricantes podría disminuir los efectos perjudiciales mencionados anteriormente, al reducir la temperatura en la superficie de la herramienta y al generar un contacto deslizante con menor esfuerzo cortante entre la placa de acero al carbono (ASTM A36) y la matriz de acero AISI H13 (Groover, 2007). Un lubricante recomendado por la ASM (1996) es el grafito disuelto en agua siendo uno de los lubricantes más efectivos para el proceso de forja en caliente. Además de ser económico y amigable con el medio ambiente. Al revisar los resultados de dureza del acero ASTM A36 presentados en la tabla 3, se puede observar que es un material blando en comparación con la dureza de la herramienta que se presenta en la tabla 6. Teniendo en cuenta que no se requieren altas deformaciones para la fabricación del prensa-hilos, el tratamiento térmico que reciben las placas para ser forjadas podría ser injustificado. Además, el tratamiento térmico no produce modificaciones en las propiedades mecánicas de la pieza de trabajo como se puede observar en la tabla 4 y en las micrografías después del proceso de forjado. Por lo anterior, se podría estar generando gastos energéticos innecesarios al realizar el tratamiento térmico a las placas de acero ASTM A36 antes del proceso de forja. Por lo tanto, es necesario caracterizar las placas suministradas y así determinar cuándo es necesario aplicar el tratamiento térmico.

6. Conclusiones

El material de la matriz satisface los requerimientos para la aplicación. Corresponde a un acero AISI H13 con las propiedades mecánicas, químicas y microestructurales consecuentes con lo

previsto en la información técnica del material indicada en normas y especificaciones técnicas comerciales.

La placa de acero estructural ASTM A36 que recibe la empresa concuerda con las características mecánicas y microestructurales provenientes de un proceso de laminado en caliente, contrario a la información suministrada por la empresa Metallan SAS que indicó que las placas eran suministradas laminadas en frío.

El deterioro prematuro de la matriz de forja posiblemente obedece a las siguientes causas:

Los óxidos de hierro sobre las placas de acero A36 en estado de entrega al no ser retirados, actúan como abrasivos, de igual modo los óxidos que se forman durante el calentamiento de las placas, pues éstas no son limpiadas después del tratamiento térmico.

La falta de lubricación genera una mayor fricción y desgaste sobre la superficie de la herramienta. Lo anterior debido a que la lubricación permite tener una protección de las superficies disminuyendo los esfuerzos de corte, de este modo se genera un menor coeficiente de fricción por lo que disminuye la adherencia y la probabilidad de deformación plástica. Por otro lado, la lubricación disminuye la temperatura de la superficie de la matriz, donde el calentamiento de las placas genera reblandecimiento de puntos críticos de la superficie y se genera deformación plástica donde los esfuerzos aplicados son mayores.

Es necesario reevaluar la temperatura de trabajo, ya que la dureza de la placa del acero ASTM A36 es bastante blanda por lo que es posible realizar la forja en frío. Además, el tratamiento térmico no cambia las propiedades mecánicas de la pieza de trabajo.

Este proyecto aportó insumos para el desarrollo técnico de las pequeñas y medianas empresas en el sector de metalmecánica. Además de fortalecer la relación entre la academia y la industria en Bucaramanga.

7. Recomendaciones

Se realizan las siguientes recomendaciones a la empresa Metallan SAS para generar una mayor vida útil de la herramienta:

Es necesario que la empresa cuente con las fichas técnicas de las herramientas y de las piezas de trabajo, así como de los procesos de tratamientos térmicos que soliciten, ya que es fundamental para realizar las operaciones de acuerdo con las características de los materiales.

Se recomienda utilizar una técnica para caracterizar las placas suministradas y así determinar cuándo es necesario realizar el tratamiento térmico. La técnica podría ser una toma de dureza.

Se recomienda experimentar el proceso de forjado en frío para la fabricación del prensa-hilos. Por lo cual, se recomienda un acero para herramientas del grupo A (ASM, 1993).

Si la forja se realiza a temperatura ambiente se recomienda utilizar disulfuro de molibdeno como lubricante sólido (Kalpajkian y Schmid, 2008). También los mismos autores recomienda utilizar jabón como lubricante líquido. Si la forja se realiza en caliente, se recomienda utilizar grafito disuelto en agua (ASM, 1996).

Es necesario retirar la capa de óxido formada sobre las placas de acero ASTM A36 y se recomienda un procedimiento de limpieza continuo para la herramienta de forjado. Se podría experimentar mediante un sistema con aire comprimido.

Referencias Bibliográficas

- Abachi, S., Akkök, M. y Gökler, M. (2010). Wear analysis of hot forging dies. *Tribology International*, 43, 467-473. doi: 10.1016/j.triboint.2009.07.011
- Apraiz, J. (1949). *Tratamiento Térmico de los Aceros*. Madrid, España: Patronato de Publicaciones de la Escuela Especial de Ingenieros Industriales
- Askeland, D. R. y Phulé, P. P. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Ciudad de México, México: Editorial Thomson.
- ASM Handbook. (1991). *Heat Treating*. Ohio, Estados Unidos: ASM International.
- ASM Handbook. (1996). *Forming and forging*. Ohio, Estados Unidos: ASM International.
- ASM Handbook. (1993). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*. Ohio, Estados Unidos: ASM International.
- ASTM. (2014). *ASTM A36/A36M Standard Specification for Carbon Structural Steel*. Estados Unidos: ASTM International.
- ASTM. (2008). *ASTM A681 Standard Specification for Tool Steel Alloys*. Estados Unidos: ASTM International.
- ASTM. (2007). *ASTM E18 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. Estados Unidos: ASTM International.
- ASTM. (2007). *ASTM E407 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. Estados Unidos: ASTM International.
- Bryson, W. E. (2013). *Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels*. Cincinnati, Estados Unidos: Editorial Hanser Publications.

- Groover, M. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Ciudad de México, México: Editorial McGraw-Hill Interamericana.
- Hutchings, I., y Shipway, P. (2017). *Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials*. Estados Unidos: Editorial Elsevier
- Marashi, J., Yakushina, E., Xicouchakis, P., Zante, R., y Foster, J. (2017). An evaluation of H13 tool Steel deformation in hot forging conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 246, 276-284. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.03.026
- Mesquita, R. (2017). *Tools Steels Properties and Performance*. Boca Raton, Estados Unidos: Editorial Taylor & Francis Group
- Molera, P. (1991). *Tratamientos Térmicos de los Metales*. Barcelona, España: Editorial Marcombo
- Kalpakjian, S., y Schmid, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. México: Editorial Pearson Educación.
- Kim, D. H., Lee, H. C., Kim, B. M. y Kim, K. H. (2005). Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 166, 372-380. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.07.103
- Venkatesan, K. (1997). *Wear and Surface engineering of hot forging dies* (Tesis doctoral). Universidad de Australia Meridional, Australia.
- Zum-Gahr, K. (1987). *Microstructure and Wear of Materials*. New York, Estados Unidos: Editorial Elsevier.

Apéndice A

BÖHLER W302

Courbe de revenu:

Diagrama de revenido:

Température de trempe: 1050°C
Eprouvette: carré 50 mm

Temperatura de temple: 1050°C
Sección de la probeta: cuadrada 50 mm

