



**EFFECTO DEL PROCESO DE AFILADO DE UNA MATRIZ
PARA PUNZONADO SOBRE LA DUREZA**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN
MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA

ING. JOSÉ DANIEL VENCES CLEMENTE

ASESOR: DR. JOHN EDISON GARCÍA HERRERA

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO. DICIEMBRE 2019.

**EFFECTO DEL PROCESO DE AFILADO DE UNA MATRIZ
ARA PUNZONADO SOBRE LA DUREZA**

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR

SIEMENS

Santiago de Querétaro, 12 de noviembre de 2019.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del Ing. José Daniel Vences Clemente, una vez revisado su Proyecto Termina de tesis, titulado "Efecto del proceso de afilado de una matriz para punzonado sobre la dureza" **autorizamos** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de Maestro en Manufactura Avanzada.

Sin otro particular por el momento, agradecemos la atención prestada.



Doctor, John Edson García Herrera
Asesor Académico



Maestro, Pavel Iván Gutiérrez Vega
Asesor en Planta

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



Santiago de Querétaro, 12 de diciembre del 2019.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno **Vences Clemente José Daniel**, cuyo título es:

"EFECTO DEL PROCESO DE AFILADO DE UNA MATRIZ PARA PUNZONADO SOBRE LA DUREZA"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,



Dr. Juli Mayén Oláhuen
CVU 270236
ID 2309

"2019, Año del Centenario del Sr. Emiliano Zapata"

San Luis Potosí, S.L.P.

+52 (444) 824 0310

| 01 800 800 3798

| mkt@ciateq.mx

www.ciateq.mx

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Daniel y Oliva:

Gracias por su apoyo, guía y ejemplo. Todos los objetivos logrados y las nuevas metas planteadas no serían posibles sin la formación que ustedes me dieron, el ánimo de ser mejor cada día y de nunca dejar de luchar por aquello que soñamos.

Angélica:

Gracias por tu infinito apoyo, paciencia y comprensión. Este logro no hubiera sido posible sin tu respaldo, consejos y la motivación de ser mejor cada día.

Selene y Karina:

Por estar unidos en cada momento. Les agradezco no solo por estar presentes aportando buenas cosas a mi vida, sino por los grandes momentos de felicidad y de diversas emociones que siempre me han causado.

Ricardo y Alma:

Gracias por escucharme en cada momento y darme palabras de aliento. Gracias por ser mi familia por elección.

RESUMEN

Actualmente Siemens Balvanera no cuenta con un procedimiento de afilado, por lo que es realizado de manera empírica.

Como primer paso se recolectaron los datos de los registros de afilado indicados en el sistema de gestión de calidad, lo cuales son llenados por los operarios a pie de máquina, con la finalidad de identificar la matriz más usada, la frecuencia de afilado y conocer cuánto se desbasta la matriz en cada afilada.

Acorde con los datos obtenidos se identifica que la matriz más utilizada es la rectangular de 50 x 6 mm; fabricada en acero para herramienta clasificación D, en cromo con un temple aire, que de acuerdo con la composición medida corresponde a un D2, esta matriz presenta una frecuencia de afilado en promedio de 8.6 veces por mes con un desbaste de hasta 500 μm , con una vida útil de hasta 4 y 5 afiladas.

Para determinar el desgaste que sufre la matriz por el proceso de afilado, realice ensayos de dureza universal Vickers, inicialmente hice pruebas en función de la profundidad, con el fin de determinar el alcance del templado en una matriz nueva, posteriormente hice pruebas en cada una de las caras superiores de las tres condiciones de las matrices: una nueva, una por afilar y una recién afilada, con la finalidad de determinar la evolución que la dureza presenta con los ciclos de trabajo, correlacionando el análisis microestructural y el de la composición química.

De acuerdo con las investigaciones realizadas y en base con todos los datos obtenidos, lo recomendable a desbastar en cada afilada es 0.25 mm (250 μm), ya que de esta manera la matriz presenta mejores condiciones de punzonado para alcanzar hasta 100,000 golpes, aumentado la vida útil del punzón hasta 50 %.

Palabras clave: proceso de afilado, punzonado, resistencia de materiales.

ABSTRACT

Currently, Siemens Balvanera does not have a sharpening procedure, it is performed empirically.

As a first step, the sharpening registers data indicated in the quality management system were collected, these are filled manually by the operators of the machine, the purpose of identifying the die most used, the frequency of sharpening and knowing how much is roughing in each sharpening.

According to the data obtained, it is identified that the punching die most used is the rectangular 50 x 6 mm; made of tool steel D, made of steel for tools classification D, according to the composition measured corresponds to a D2, this die has an average sharpening frequency of 8.6 times per month with a roughing of up to 500 μm with a lifetime of 4 or 5 sharp.

To determine the wear of the die by the sharpening process, Vickers universal hardness tests were carried out, initially tests were carried out as a function of the depth, in order to determine the extent of tempering in a new die, additionally tests were made in each of the upper faces of the three conditions of the matrix: new, to be sharp, freshly sharpened, in order to evaluate the evolution that the hardness with the work cycles, correlating with the microstructural and chemical composition analysis.

According to the data obtained and the results, in each sharpening is recommended a wear 0.25 mm (250 μm), this way the die has optimal punching conditions to reach up to 100,000 strokes, increasing cycle life in 50%.

Keywords: sharpening process, punching die, material resistance.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Definición del problema.....	5
1.3	Justificación	5
1.4	Objetivos	7
1.4.1	Objetivo general.....	7
1.4.2	Objetivos específicos.....	7
1.5	Hipótesis.....	7
2	MARCO TEÓRICO	8
2.1	Punzonado.....	8
2.2	Mecánica del corte	9
2.3	Fuerza de corte	15
2.4	Aceros para herramienta	17
2.5	Tratamiento térmico de aceros para herramienta	20
2.6	Templado	20
2.7	Profundidad del templado	23
2.8	Templado	24
2.9	Pulido de metales.....	27
2.9.1	Procedimiento de pulido	28
2.10	Durómetros.....	30
2.10.1	Durómetro Rockwell	31

2.10.2	Durómetro Brinell.....	32
2.10.3	Durómetro Vickers.....	33
3	PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN	35
4	RESULTADOS.	43
	CONCLUSIONES.	58
	APORTACIÓN DE LA TESIS.....	61
	RECOMENDACIONES	62
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Panel MCC, estructura principal realizada a través del proceso de punzonado.....	3
Figura 2. Punzón y matriz.....	5
Figura 3. Gráfica comparativa de tiempos entre corte por punzonado y corte láser.....	6
Figura 4. Esquema de corte de una lámina.....	9
Figura 5. Características del borde cizallado.....	10
Figura 6. a) Punzonado y b) Perforado.....	12
Figura 7. Efecto del espacio.....	13
Figura 8. Tamaño de la matriz.....	14
Figura 9. Operación de cizallado.....	16
Figura 10. Diagrama para la recomendación delafilado de la matriz o punzón [13].	25
Figura 11. Tipos de penetradores y cargas en ensayos Rockwell y Rockwell superficial.	32
Figura 12. Dimensiones del penetrador Brinell.....	33
Figura 13. Dimensiones del penetrador Vickers.	34
Figura 14. Formato: No. M-IC LMV MV MF-I7.712.02 registro deafilado deherramental.....	36
Figura 15. De izquierda a derecha: matriz nueva, recién afilada y por afilar, respectivamente.	37
Figura 16. Representación gráfica del corte de la matriz.....	37
Figura 17. Representación del corte de la matriz y cubo de 150 mm, para la medición de dureza.....	38

Figura 18. Representación del corte de la matriz, para la medición de dureza en la cara paralela a la frontal.....	38
Figura 19. Representación de las tres zonas para la medición de la dureza... ..	39
Figura 20. Marca de huella realizada por un indentador en una prueba de dureza Vickers en una a) matriz nueva, b) matriz recién afilada y c) matriz por afilar.	40
Figura 21. Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM).	41
Figura 22. Preparación del cubo para la medición de composición química.	42
Figura 23. Máquina punzonadora “Trupunch 5000” para procesamiento de lámina calibre 11 y 12.	43
Figura 24. Representación de la matriz 50 x 6 mm.	44
Figura 25. Frecuencia de afilado de matrices año 2019.	45
Figura 26. a) Máquina utilizada para realizar el desbaste de una matriz. b) Montaje de la matriz para realizar el afilado.	46
Figura 27. Indentaciones en función de la profundidad matriz en estado de suministro.	47
Figura 28. Dureza en función de la profundidad de la matriz en estado de suministro.	48
Figura 29. Huellas de indentación a 40 μm de la superficie y precipitados.	49
Figura 30. Huellas de indentación a 100 μm de la superficie y precipitados fracturados.....	50
Figura 31. Dureza a lo largo de la profundidad.	50
Figura 32. Medición de dureza Vickers (HV 0.7) en una a) matriz nueva b) matriz recién afilada y c) matriz por afilar.	52

Figura 33. Espectro de EDS de la composición química de la matriz para punzonar lámina rolada en caliente..... 54

Figura 34. Microestructura del acero en estado de suministro. 55

Figura 35. Mapeo de composición química en precipitados grandes y alargados..... 56

Figura 36. Mapeo de composición química en precipitados pequeños y redondos. 57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1, Valor de tolerancias para los tres grupos de lámina.	14
Tabla 2, Acero para herramienta con el prefijo de identificación de AISI.....	17
Tabla 3, Tablas de temperaturas para realizar el templado a matrices.	22
Tabla 4, Recomendaciones de afilado.	26
Tabla 5. Frecuencia de afilado de matrices	44

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Siemens Balvanera se dedica a la fabricación de tableros de media y baja tensión e interruptores de media tensión, así como a la investigación y desarrollo. Los tableros fabricados son equipos de alta tecnología que ofrecen seguridad, eficiencia y digitalización, para un control óptimo de la electricidad en las plantas automatizadas de alto rendimiento de las principales industrias del país como la energética, la minera, alimentos, bebidas y automotriz. Los tableros fabricados, 80 % son colocados en el mercado exterior y el 20% en el mercado nacional. Cerca del 70% de la fabricación se destina hacia Norteamérica y el 10% a otras regiones como Asia y Sudamérica y el 20% a México.

Debido al cierre de la planta ubicada en West Chicago Illinois E.U., Siemens Balvanera abre una nueva línea de producción para absorber en su totalidad la producción de los “Centros de control de motores de baja tensión” MCC (*Motor Control Center*) por sus siglas en inglés, ampliado su capacidad productiva en un 100%; pasando de una capacidad para producir 7,000 paneles anuales a una proyección de 14,000 paneles anuales.

El incremento de volumen de producción afecta directamente al proceso de punzonado realizado en el área de Prefabricación, debido a que este proceso es la base principal para la realización de todos los paneles que se ensamblan en Siemens Balvanera.

En el área de prefabricación se realizan los procesos de punzonado, doblado y soldado, siendo el proceso principal el punzonado; ya que en él se fabrican todos los elementos base para la construcción de los paneles, tales como puertas, laterales, charolas y accesorios; sin estos elementos no es posible iniciar con el proceso de ensamble.

Una punzonadora es una máquina que se usa para perforar y conformar placas de diferentes materiales usando un punzón y una matriz a semejanza de una prensa. Éstas pueden ser sencillas (comandadas manualmente, con un solo juego de herramienta) o muy complejas (punzonadora CNC, con carga automática, múltiples herramientas).

El área de punzonado tiene cinco punzonadoras CNC de múltiples herramientas marca TRUMPF modelo "Trupunch 5000", donde se procesan diferentes productos de lámina en calibres 9, 10, 11, 12, 13, 16, 18, 20, 24 y 3/16", siendo los calibres más procesados el 11 y 12. La distribución del procesamiento de los diferentes calibres se encuentra de la siguiente manera:

- Punzonadora 1: 3.04 mm (#11) y 2.66 mm (#12).
- Punzonadora 2: 3.80 mm (# 9), 3.42 mm (#10), 2.28 mm (#13), 1.52 mm (# 16), 1.21 mm (#18), 0.91 mm (# 20), 0.61 mm (#24), 4.76 mm (# 3/16").
- Punzonadora 3: 3.80 mm (# 9), 3.42 mm (#10), 2.28 mm (#13), 1.52 mm (# 16), 1.21 mm (#18), 0.91 mm (# 20), 0.61 mm (#24), 4.76 mm (# 3/16").
- Punzonadora 4: 3.80 mm (# 9), 3.42 mm (#10), 2.28 mm (#13), 1.52 mm (# 16), 1.21 mm (#18), 0.91 mm (# 20), 0.61 mm (#24), 4.76 mm (# 3/16").
- Punzonadora 5: 3.04 mm (#11) y 2.66 mm (#12).

Las características del proceso del punzonado son:

- Utilización de múltiples punzones y matrices.
- La calidad del agujero está determinada por el espacio (*clearance*) que hay entre el punzón y la matriz.
- El desperdicio (*scrap*), es generado a medida que el punzón entra en la matriz.
- El contorno de las piezas cortadas tiene un acabado superficial en forma de pulido.
- Las rebabas son presentadas en la parte inferior de la pieza cortada.
- Hay un patrón de perforación similar en cada línea de perforación.

Todas las piezas que salen de las punzonadoras provienen de materia prima en formato de lámina. Las piezas elaboradas son piezas planas que de acuerdo con la Figura 1 pueden ser de contornos rectos o curvos.



Figura 1. Panel MCC, estructura principal realizada a través del proceso de punzonado.

Elaboración propia.

Actualmente por el incremento de volumen de producción en el área de punzonado, los diferentes tipos de matrices y punzones que son usados para el procesamiento de las diferentes láminas, presenta mayor desgaste; debido a que son utilizados más veces o por un periodo más largo, con la finalidad de satisfacer las demandas de las líneas de ensamble y evitar paros de línea por falta de lámina procesada.

Para poder prolongar el uso de las matrices y los punzones (Figura 2), son afilados periódicamente según se requiera; sin embargo, este requerimiento solo está citado en el procedimiento del Sistema de Gestión de Calidad de Siemens Balvanera "Instructivo de punzonado de lámina" No. M-IC LMV MV MF-17.712.02 indicado en la sección 6.1 como "Afilado del herramental" en el cual solo se cita lo siguiente: "Es responsabilidad de la persona asignada de afilar los herramientas de las punzonadoras (matrices y punzones), periódicamente según se requiera, de tal manera que se mantengan en buenas condiciones".

El proceso de afilado se caracteriza por ser realizado por una sola persona en toda la planta de manera empírica y sin una operación de trabajo, la matriz es montada en una máquina de desbaste marca Wilson Tool en la cual se le realiza un desbaste aproximado de 500 μm , por esta razón se requiere crear un proceso estándar para poder incrementar el ciclo de vida de la matriz y así el proceso de punzonado sea mejor, evitando paros de máquina por cambio de herramental.



Figura 2. Punzón y matriz. Elaboración propia.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Dentro del proceso de punzonado en el área de prefabricación, se necesita la creación de un estándar para el afilado de las matrices, ya que actualmente este proceso está siendo realizado de forma empírica por un solo operario, pudiendo tener como consecuencia un afilado incorrecto que repercute en la vida útil de la matriz y en una mala calidad en el punzonado.

1.3 JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con la Figura 3, se puede observar que el corte por punzonado es más económico y hasta un 95% más rápido que el corte por láser. Actualmente el corte láser se ha posicionado por arriba debido a que ofrece productividad y competitividad a las empresas, sin embargo, hay operaciones que aun no se logran realizar por medio de una cortadora láser; tales como: embutidos, roscados, plegados, deformados progresivamente, mecanizado de piezas, entre otros.

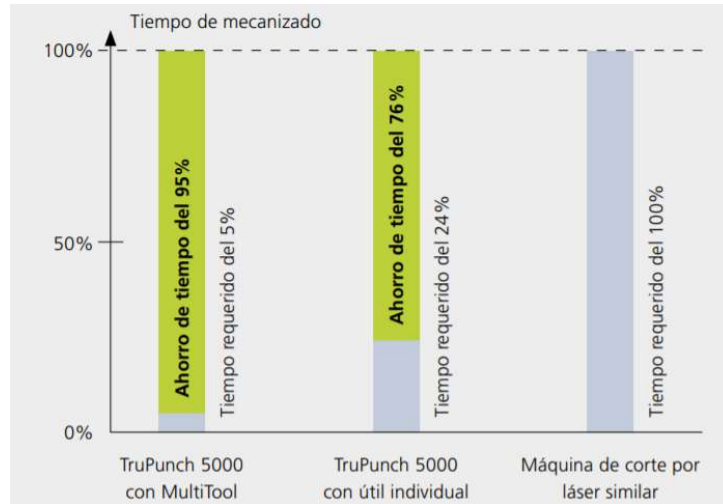


Figura 3. Gráfica comparativa de tiempos entre corte por punzonado y corte láser [1]

Siemens Balvanera tiene definido todos los parámetros en relación con el ajuste de la máquina y cambio de herramientas, sin embargo, no hay un procedimiento o una serie de pasos establecidos para elafilado de los herramientas (matriz y punzón).

Es por eso que es necesario la recolección de datos de las punzonadoras para poder determinar un correcto proceso de afilado de matrices, ya que el proceso bajo el cual está trabajando actualmente Siemens Balvanera no garantiza la calidad del punzonado de la lámina, pudiendo generar modos de fallas tales como: rebabas en el contorno de la pieza punzonada, fracturas internas en el herramienta o defectos superficiales que aun no son detectados debido a la falta de un estándar de afilado, teniendo como consecuencia la reducción de la vida útil del herramienta.

Los beneficios que se pueden obtener de esta investigación son, el incremento del ciclo de vida de la matriz, ya que se aumentará la durabilidad y se disminuirá la periodicidad de su adquisición, impactando directamente en ahorros económicos para Siemens Balvanera.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Determinar el efecto del proceso de afilado de una matriz para punzonado sobre la dureza.

1.4.2 Objetivos específicos

- Recopilar todos los datos de afilado (formato: No. M-IC LMV MV MF-17.712.02 indicado en la sección 6.1 del manual del sistema de gestión de calidad), y realizar una base de datos.
- Identificar cuál es el calibre de lámina más punzonada y cuál es la matriz que más se utiliza en el área de punzonado de Siemens Balvanera.
- Identificar cuáles son los parámetros que son utilizados actualmente cuando se realiza el afilado de una matriz y cuáles son las recomendaciones estándar para el afilado.
- Caracterizar la dureza en una matriz nueva y comparar dicha propiedad con otras condiciones de la matriz.

1.5 HIPÓTESIS

Con la evaluación del desgaste de un herramental por efecto de trabajo y afilado, es posible llegar a tener un procedimiento de afilado adecuado que permita incrementar el ciclo de vida de una matriz hasta 10%, disminuyendo los modos de falla de rebaba y fracturas en las láminas procesadas.

2 MARCO TEÓRICO

La importancia comercial del punzonado de las láminas es significativa, tomando como referencia la cantidad de productos industriales tales como: las carrocerías de automóviles, aeroplanos, ferrocarriles y como es el caso de los tableros de baja tensión para Siemens Balvanera, ya que no solo están fabricados de lámina en su exterior si no que, muchos de sus componentes internos están fabricados de láminas.

Las piezas de lámina de metal se caracterizan generalmente por su alta resistencia, buena precisión dimensional, buen acabado superficial y bajo costo relativo[1].

2.1 PUNZONADO

El punzonado es una técnica muy común en la industria. Es un proceso mecánico de alta precisión de deformación, en el cual se corta una placa de acero suave (acero bajo al carbón, galvanizado, inoxidable o aluminio), este proceso pertenece a la rama de la matricería; la cual estudia y desarrolla operaciones para obtener piezas en serie por medio de una operación que se realiza en frío[2], consiste en perforar (corte cerrado) una lámina metálica por medio de un corte o deformación sin arranque de viruta. Se emplea un punzón perfectamente afilado y una matriz que permiten diferentes operaciones tales como embutidos y aboquillados, ambos con posibilidad de roscado.

2.2 MECÁNICA DEL CORTE

El corte de la lámina se realiza por una acción de cizalla entre dos bordes afilados, esta acción es realizada en cuatro pasos, como se observa en la Figura 4.

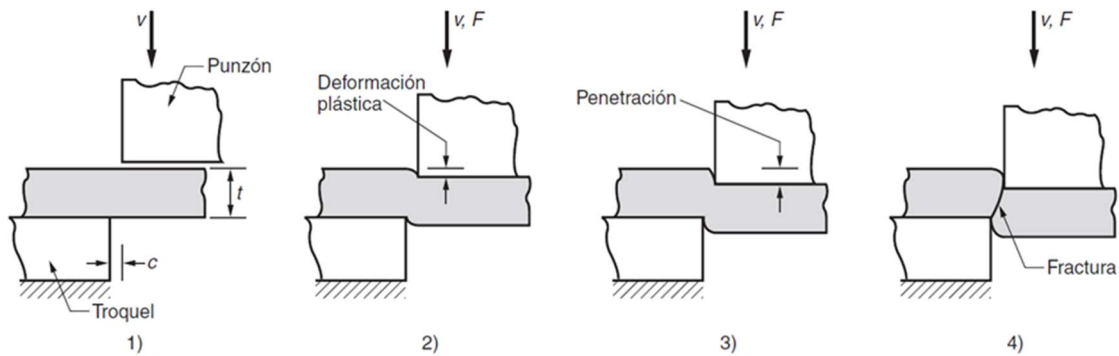


Figura 4. Esquema de corte de una lámina [3]. Los símbolos v y F indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente, t =espesor del material y c =espacio.

- 1) **Borde superior del corte (punzón):** se mueve hacia abajo sobrepasando el borde estacionario inferior de corte (el troquel o matriz).
- 2) **Deformación:** los esfuerzos del punzón sobre la lámina metálica originan en ésta una deformación, inicialmente elástica y después plástica, alrededor de los bordes del punzón y matriz.
- 3) **Penetración:** los filos del corte del punzón y matriz penetran dentro del material produciéndose grietas en el material debido a la concentración de tensiones a lo largo de los filos del corte. Esta zona de penetración generalmente es una tercera parte del espesor de la lámina.

- 4) **Fractura:** a medida que el punzón continúa su viaje, se inicia la fractura entre los dos bordes del corte. Si el espacio entre el punzón y el troquel es correcto, las dos líneas de fractura se encuentran y el resultado es una separación limpia de trabajo en dos piezas o dos partes de metal

De acuerdo con la Figura 5, las características producidas en los bordes de la chapa y el material cortado son:

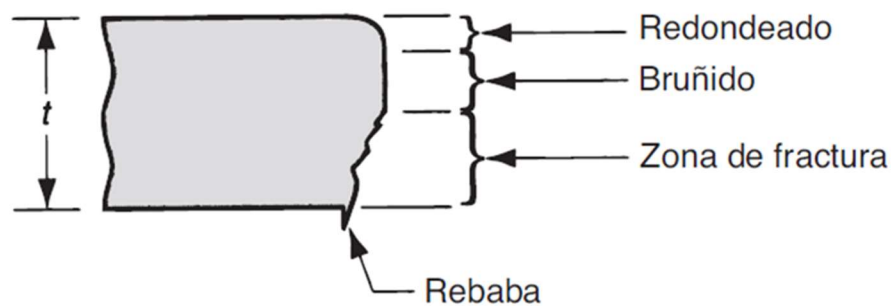


Figura 5. Características del borde cizallado [3].

Redondeo: éste corresponde a la depresión hecha por el punzón en el trabajo antes de empezar el corte. Aquí es donde empieza la deformación plástica, caracterizada por un pequeño radio o redondeo.

Bruñido: se localiza por debajo del redondeo, resulta de la penetración del punzón en el material antes de empezar la fractura y es de un aspecto brillante.

Zona de fractura: localizada por debajo del bruñido, superficie relativamente tosca del borde del corte donde el movimiento continuo del punzón hacia abajo causa la fractura, tiene un aspecto mate y está definida por la penetración.

En esta zona la calidad del corte depende del juego de la matriz y el punzón, si no se tiene un correcto juego se presentan los siguientes modos de falla [3]:

- Juego insuficiente: Debido a que presenta un mayor grado de precisión, se genera un corte secundario, ocasionando un mayor desgaste en el herramental.
- Juego normal: Las grietas se alinean por lo cual no causa corte secundario, obteniendo una rebaba pequeña en los bordes del corte de la lámina. Este es el juego ideal para el punzonado de las láminas
- Juego excesivo: Debido a que presenta un menor grado de precisión, se obtiene mayor rebaba y un menor desgaste de herramental.

Rebaba

Al fondo del borde está la rebaba, un filo causado por la elongación del metal durante la separación final de las dos piezas.

Es importante resaltar que todas las características antes descritas, dependen del tipo de dureza, espesor del material, juego del punzón y la matriz, estado de los filos del corte, sujeción de material y tamaño del punzón.

El punzonado implica (Figura 6), el corte de una lámina de metal a lo largo de una línea cerrada en un solo paso para separar la pieza del material circundante. La parte que se corta es la pieza deseada en la operación. El perforado es muy similar al punzonado, excepto porque la parte que se corta se desecha y se llama pedacería o como comúnmente se le conoce *scrap*. El material remanente es la pieza a obtener.

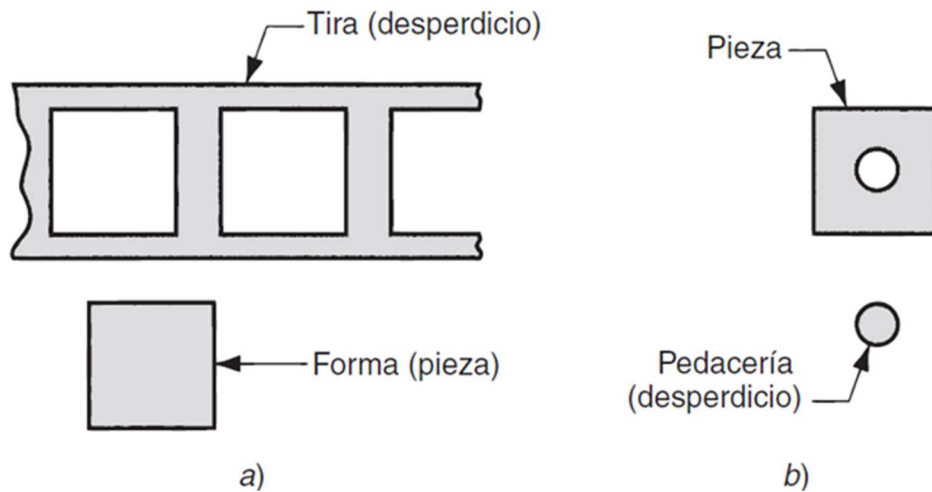


Figura 6. a) Punzonado y b) Perforado [3].

Los parámetros importantes en el corte de lámina metálica son el espacio entre el punzón y el troquel, el espesor del material, el tipo de metal y su resistencia y la longitud del corte. A continuación, se examinan los aspectos relacionados.

Espacio

Es la distancia entre el punzón y el troquel o matriz. Los espacios convencionales fluctúan entre el 4% y el 8% del espesor de la lámina metálica. Si el espacio es demasiado pequeño, las líneas de fractura tienden a pasar una sobre otra, causando un doble bruñido y requiriendo mayor fuerza de corte. Si el espacio es demasiado grande, los bordes de corte pellizcan el metal y da por resultado una rebaba excesiva, por lo cual si el espacio es el adecuado; las grietas serán alineadas, no causando un corte secundario y obteniendo una rebaba pequeña. A continuación, en la Figura 7 se puede observar el efecto del espacio.

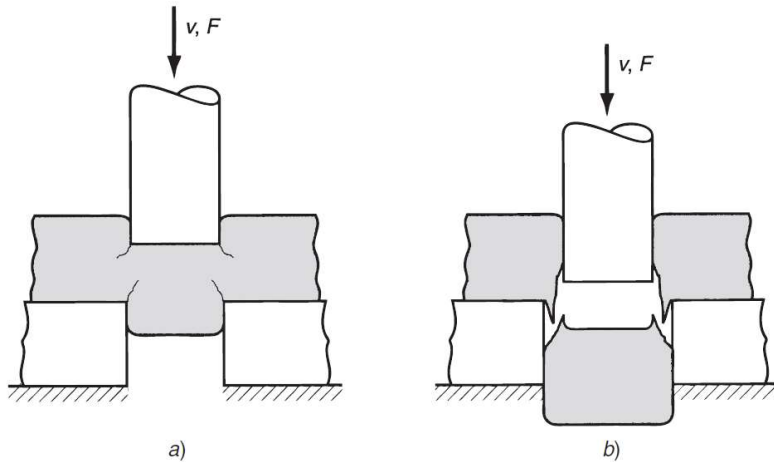


Figura 7. Efecto del espacio: a) Demasiado pequeño y b) Demasiado grande. Los símbolos v y f indican movimiento y fuerza respectivamente [3].

El espacio correcto depende del tipo de lámina y su espesor. El espacio que se recomienda se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$c = A_c t \quad ec.1$$

Donde:

c = Espacio, valor determinado (constante del material).

A_c =Tolerancia del espacio.

t =Espesor del material.

La tolerancia se determina de acuerdo con el tipo de material. Los materiales son clasificados por conveniencia en tres grupos como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1, Valor de tolerancias para los tres grupos de lámina [4].

Grupo metálico	A_c
Aleaciones de aluminio 1100S y 5052S, todos los temple	0.045
Aleaciones de aluminio 2024ST y 6061ST; latón, todos los temple; acero suave laminado en frío; acero inoxidable frío	0.060
Acero laminado en frío, dureza media; acero inoxidable, dureza media y alta	0.075

Los valores calculados del espacio se pueden aplicar al punzonado convencional y a las operaciones de perforado de agujeros para determinar los tamaños del punzón y de la matriz adecuados. Es evidente que la abertura de la matriz debe de ser más grande que el tamaño del punzón. Debido a la forma del borde cizallado, la dimensión exterior de la pieza que se corta de la lámina será más grande que el tamaño del agujero.

Para que las formas o la pedacería caigan a través de la matriz, la abertura de este debe tener un espacio angular entre 0.25° y 1.5° de cada lado.

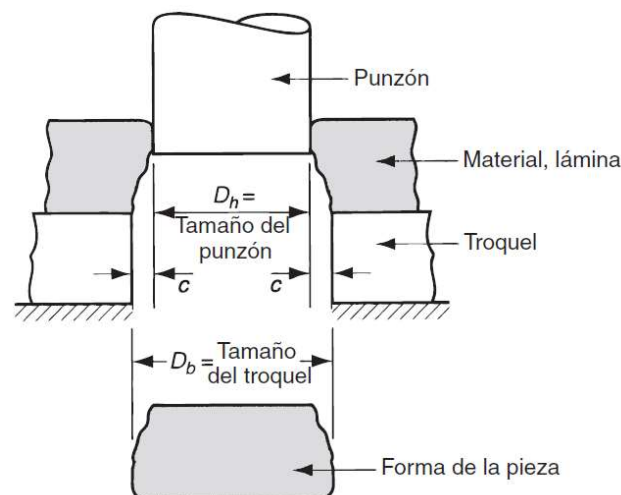


Figura 8. Tamaño de la matriz [3].

En base con la Figura 8, se puede observar que el tamaño del troquel (D_b) determina el tamaño de la forma de la pieza; el tamaño del punzón (D_h) determina el tamaño del agujero y el espacio (c).

2.3 FUERZA DE CORTE

El esfuerzo del corte es directamente proporcional al perímetro a cortar y al espesor de la chapa, por eso es importante estimar la fuerza de corte ya que determina el tamaño (tonelaje) de la prensa necesaria.

La fuerza de corte F en el trabajo de láminas puede determinarse por la siguiente ecuación:

$$F = StL \quad ec. 2$$

Donde:

S = resistencia al corte de la lámina en MPa (ó en lb/in^2).

t = espesor del material en mm (in).

L = longitud del corte en mm (in).

En el punzonado, perforado, rasurado y operaciones similares, L es la longitud del perímetro de la forma del agujero que se corta. En la determinación de L se puede anular el efecto del espacio.

Si se desconoce la resistencia del corte, se puede estimar mediante el uso de la resistencia a la tensión, de la siguiente manera:

$$F = 0.7 TStL \quad ec. 3$$

Donde:

TS = Resistencia última a la tensión, MPa (ó en lb/in^2).

L = longitud del corte en mm (in).

Las ecuaciones 2 y 3 son para estimar la fuerza de corte, suponiendo que el corte entero se hace al mismo tiempo a todo lo largo L del borde de corte. Es posible reducir la fuerza máxima usando un borde de corte sesgado en el punzón o en el troquel, como se muestra en la Figura 9.

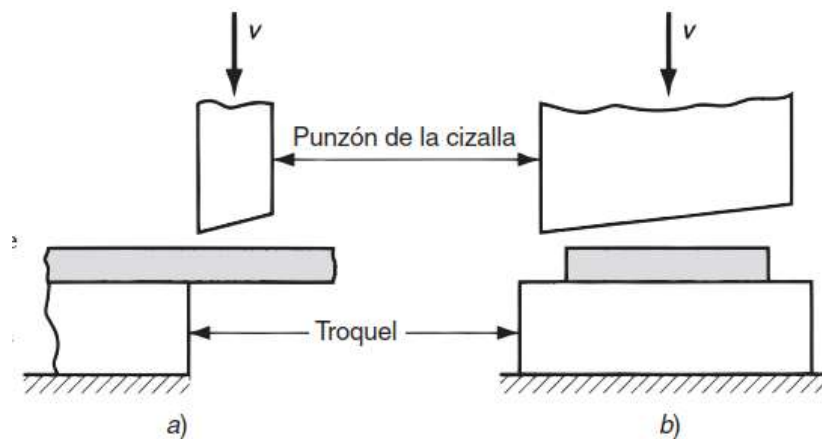


Figura 9. Operación de cizallado: a) vista lateral de la operación b) vista frontal de la cizalla equipada con una cuchilla superior sesgada [3].

El ángulo de corte distribuye el corte en el tiempo y reduce la fuerza que se experimenta a cada momento. Los aceros para herramientas están hechos para usarse en aplicaciones en las que se requiere mucha tenacidad, como en muchos cortes de lámina metálica, punzonado y operaciones de doblado.

2.4 ACEROS PARA HERRAMIENTAS

Los aceros para herramientas son por lo general una aleación altamente, diseñada para su uso en herramientas de corte industriales, troqueles y moldes [5]. Para desempeñarse en estas aplicaciones deben de poseer resistencia elevada, dureza, dureza en caliente, resistencia al desgaste y tenacidad a los impactos. Para obtener estas propiedades los aceros para herramienta se tratan térmicamente, obteniendo propiedades mecánicas como: dureza mejorada, distorsión reducida durante el tratamiento con calor, dureza en caliente, formación de carburos metálicos duros para que sean resistentes a la abrasión y tenacidad mejorada.

Los aceros para herramienta se dividen en tipos de acuerdo con la aplicación y composición. La AISI (Tabla 2) utiliza un esquema de clasificación que incluye el prefijo de una letra para identificar el acero para herramienta.

Tabla 2, Acero para herramienta con el prefijo de identificación de AISI [4]

AISI	Ejemplo	Análisis químico ^a							Dureza ^b
		C	Cr	Mn	Mo	Ni	V	W	HRC
T	T1	0.7	4.0				1.0	18.0	65
M	M2	0.8	4.0		5.0		2.0	6.0	65
H	H11	0.4	5.0		1.5		0.4		55
D	D1	1.0	12.0		1.0				60
A	A2	1.0	5.0		1.0				60
O	O1	0.9	0.5	1.0				0.5	61
W	W1	1.0							63
S	S1	0.5	1.5					2.5	50
P	P20	0.4	1.7		0.4				40
L	L6	0.7	0.8		0.2	1.5			45

^a Composición porcentual redondeada a la décima más cercana.

^b Dureza estimada.

T, M: aceros para herramientas de alta velocidad (HSS); se usan en herramientas de corte de maquinado, tienen una gran resistencia al desgaste y dureza en caliente.

H: aceros de herramientas para trabajos en caliente; se usan en troqueles para trabajos en caliente en el forjado, extracción y moldes para fundición.

D: Aceros de herramientas para trabajos en frío; son aceros para troqueles que se emplean en operaciones en frío, tal como moldear láminas metálicas, extrusión en frío y ciertas operaciones en forja. La designación D es por dado (*die*), proporcionan buena resistencia al desgaste y una distorsión baja.

W: aceros para herramienta de endurecimiento por agua; tiene contenido elevado de carbono como poco o nada de otras aleaciones, solo se pueden endurecer por enfriamiento por inmersión rápida en agua, son empleados mucho debido a su bajo costo; comúnmente son utilizados en los troqueles de cabezales en frío.

S: aceros de herramientas resistentes a los golpes; se utilizan en aplicaciones que requieren mucha tenacidad, como en cortes de lámina metálica, punzonado y operaciones de doblado.

P: aceros para moldes; se utilizan para fabricar moldes para plásticos y caucho.

L: aceros para herramientas de baja aleación; por lo general utilizados para aplicaciones generales

Diversos estudios hacen recomendaciones para desarrollar materiales y métodos de endurecimiento de las matrices y punzones.

M.N. George [6], afirma que dependiendo del tipo de herramental se especificarán los parámetros de optimización, sin embargo, para poder llegar a esto, es necesario que se realice una investigación en dos etapas. La primera etapa deberá de incluir la anatomía de los daños por el uso y la segunda etapa, será resultante de los datos obtenidos de la primera etapa.

El resultado de tales investigaciones será la creación de modelos que permitan determinar de manera confiable los parámetros que caracterizan la vida útil de la matriz y el punzón (herramental). Conociendo estos parámetros se podrá modificar la estructura del material que determinarán un método adecuado para poder endurecer el material, por medio de un tratamiento térmico.

Por otro lado, hace referencia a que el desprendimiento de metal en la matriz es debido a que tiene un significativo concentrador de tensiones e indica que el desprendimiento es sistemático, el cual se observa en una cierta combinación de parámetros geométricos de la pieza que se está punzonando. Para matrices sometidas a desprendimiento, el momento en el que comienza la falla es controlado por la resistencia a la tensión de la pieza que se está punzonando.

M.N. George [6] determina que, para obtener una mayor durabilidad o ciclo de vida de la matriz, es necesario un tratamiento térmico en el cual se modifique la estructura del acero para que se combinen propiedades mecánicas duras y blandas.

Dentro de este marco I. A. Rudenko [7] indica que, la vida útil de los troqueles (matriz y/o punzón) depende de diversos factores, sin embargo, los principales factores son la resistencia al desgaste del acero y la profundidad del templado que se le haya realizado a la matriz.

2.5 TRATAMIENTO TÉRMICO DE ACEROS PARA HERRAMIENTAS

Un proceso de enfriamiento adecuadamente diseñado y controlado es de gran importancia para el efecto final del tratamiento térmico y por lo tanto es subyacente para la durabilidad y la idoneidad del elemento tratado. El tratamiento térmico de los aceros grado herramientas consiste en un proceso de endurecimiento seguido inmediatamente por un proceso de templado, lo que asegura la adecuada estructura del material.

De acuerdo con Emilia Wolowiec [8], el templado al aire es el tratamiento térmico más usado para los acero grado herramientas para trabajo en frío, ya que garantiza la resistencia a la abrasión así como al desgaste. En términos generales, el temple al aire se caracteriza por presentar una elevada dureza, resistencia a la abrasión, poca deformabilidad y poca susceptibilidad al sobrecalentamiento.

2.6 TEMPLADO

El templado [9] es una condición que se produce en el metal o aleación por efecto del tratamiento mecánico o térmico superficial, impartándole estructuras y propiedades mecánicas características. Es un proceso térmico por el cual las aleaciones de acero y el hierro fundido se fortalecen y

endurecen. Este procedimiento se realiza calentando el material a una determinada temperatura, dependiendo del material, para después ser enfriado rápidamente y a menudo después es aplicado un revenido, este tratamiento térmico ayuda al templado a aumentar la tenacidad de la aleación a cambio de dureza y resistencia, disminuyendo su fragilidad. La finalidad del revenido es llevar al acero a un punto mínimo de fragilidad [10].

Antes de endurecer el material, la microestructura del material es una estructura de grano de perlita que es uniforme y laminar. La perlita es una mezcla de ferrita y cementita formada cuando el acero o hierro fundido se fabrican y se enfrían a una velocidad lenta. Después del enfriamiento y rápido endurecimiento, la microestructura de la forma material en martensita como estructura fina, grado de aguja.

Debido a que las matrices son herramientas caras, un pequeño aumento en su durabilidad tiene un efecto económico sustancial.

Un factor importante que se debe considerar cuando se fabrican las matrices es el endurecimiento del metal. Matrices para punzonar son templadas a gran profundidad, y por lo tanto se debe de usar un acero con alta capacidad de endurecimiento o seleccionar la temperatura de templado en relación con el grado de endurecimiento.

Tabla 3, Tablas de temperaturas para realizar el templado a matrices [7].

Grado de endurecimiento		Temperatura de enfriamiento
0*	.....	-
I	.....	840
II	.....	820
III	.....	800
IV	.....	780
V	.....	760

De acuerdo con la Tabla 3, la recomendación hecha por I. A. Rudenko, [7] para la fabricación de matrices menores a 1 mm de espesor, es la utilización de acero grado 1, ya que el acero de grado 0 es inadecuado.

En síntesis, la resistencia al desgaste del acero determinará el número de piezas que serán punzonadas entre cada afilado de la matriz. La profundidad del templado determina la cantidad de veces que se puede afilar una matriz o punzón.

Se requiere de una gran precisión en la fabricación de una matriz. La mayoría de las matrices tienen formas que excluyen la posibilidad de ser afiladas después de ser templadas, por lo tanto; las operaciones de acabado se realizan a mano. Para acortar esta operación difícil, ya que es necesario eliminar la deformación que sufren las matrices durante el temple.

I. A. Rudenko [7], considera que el acero U9-U9A (0.85 - 0.94 C%) con un grado de endurecimiento IV es el mejor para la fabricación de matrices.

2.7 PROFUNDIDAD DEL TEMPLADO

También conocida como templabilidad, en otras palabras, es la propiedad que determina la profundidad y distribución de la dureza producida por el temple[11], la cual depende de la composición química del acero, del tamaño de grano austenítico y de la estructura del acero antes del temple.

Es una medida de la profundidad de la dureza que se puede obtener mediante calentamiento y enfriamiento posterior [12]. El término “templabilidad” no debe confundirse con dureza, que es la resistencia de un material a la indentación o el rayado.

De acuerdo con el libro Estructura y propiedades de las aleaciones [13], en el capítulo 8 “dureza y templabilidad de los aceros”; indica que; la templabilidad o profundidad del templado, también se define como “la susceptibilidad a endurecer por enfriamiento rápido” o “como la propiedad que determina la profundidad o distribución de la dureza producida por el temple en aleaciones ferrosas”.

Además, el libro cita un estudio realizado en barras de acero SAE 1045 y SAE 6140, donde se determina que los factores para establecer la profundidad del temple son los siguientes:

- La velocidad de temple influye en la distribución de la dureza.
- La velocidad de enfriamiento depende tanto del tamaño de la muestra, así como la severidad del temple.

Por lo cual, se determina que la profundidad del temple está relacionada a la velocidad que sea realizado. Mientras más grande sea la profundidad a la cual penetre la dureza, mayor será la templabilidad o capacidad de endurecimiento de la aleación.

Alrededor del año 1870, las técnicas microscópicas se convirtieron en un complemento muy importante para la validación de la dureza, actualmente para la validación de la profundidad del templado se utiliza la norma ASTM 255 [10], la cual determina los métodos estándar para la validación de la dureza de los aceros.

La profundidad del templado, usualmente se puede determinar por los métodos de Grossmann (o del diámetro crítico ideal) o método de Jominy.

2.8 TEMPLADO

Es un tratamiento térmico que se emplea para incrementar la dureza de aleaciones de hierro. Se realiza generalmente después de endurecer, para aumentar la dureza, y se realiza calentando el metal a una temperatura mucho más baja que la utilizada para el endurecimiento.

El artículo Teoría del punzonado de la página de internet inter empresas [14], indica que existen varios factores para poder determinar cuántos golpes se pueden dar antes de afilar una matriz. A continuación, se citan los factores que define como determinantes para el afilado del herramienta:

Espesor y el tipo de lámina: debido a que no es la misma fuerza que se requiere para punzonar lámina de acero de 4 mm que lámina de aluminio de 1 mm;

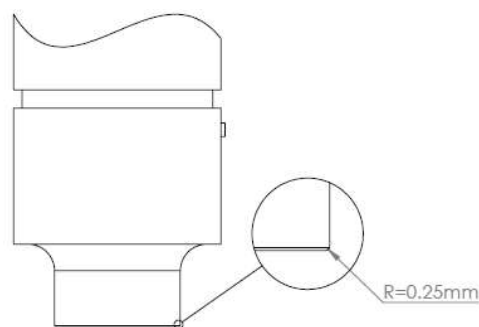
puesto que, cuanto más fuerza sea necesaria, más se desgastará el herramental.

Uso correcto de las tolerancias: si las tolerancias no son las correctas el herramental deberá realizar más esfuerzo para poder punzonar láminas [15].

Tolerancias: deben de estar uniformemente repartidas, si se detecta que el herramental está debidamente mecanizado (centrado y orientado) el problema puede ser la punzonadora, ya que la alineación entre la matriz y el punzón no es la correcta.

Lubricación del herramental: La lubricación del herramental ayuda a aumentar la vida útil, debido a que se reduce el coeficiente de fricción.

La recomendación para afilar el herramental indicada por C. Molinero [14] es, rectificar o desbastar 0.25 mm. Lo anterior indica que tanto en el punzón como en la matriz el filo de corte se ha convertido en un radio de 0.25mm, como se muestra en la siguiente Figura 10.



Afilar cuando se forme un radio de 0.25mm en el **punzón o matriz**

Figura 10. Diagrama para la recomendación del afilado de la matriz o punzón [13].

Se debe de tener en cuenta que cada vez que se da un punzonado, se crea un micro radio debido al desgaste, así mismo está claro que al realizar el siguiente punzonado las condiciones de corte son considerablemente peores que el punzonado anterior; lo cual obligará a ejercer algo más de fuerza para poder realizar el agujero, por lo tanto, el punzón y la matriz se desgastaran un poco más que en el punzonado anterior. Es conveniente considerar que el desgaste entre un punzonado y el siguiente es inapreciable, pero a su vez el ir acumulando punzonados, el desgaste va creciendo rápidamente. En la Tabla 4 se muestra el análisis del total de punzonados que se pueden obtener entre un herramental afilado apropiadamente y un herramental afilado incorrectamente.

Tabla 4, Recomendaciones de afilado [14].

Afilado inapropiado		Afilado apropiado	
Total, agujeros punzonados	Radio formado	Total, agujeros punzonados	Radio formado
100,000	0.25 mm	100,000	0.25 mm
50,000	0.50 mm	100,000	0.25 mm
25,000	0.75 mm	100,000	0.25 mm
10,000	1 mm	100,000	0.25 mm
Total, golpes: 185,000	Desgaste total: 1.0 mm	Total, golpes: 400,000	Desgaste total: 1.0 mm

De acuerdo con la Tabla 4, se puede deducir que hasta que se crea un radio de 0.25 mm en el filo de corte se han realizado 100,000 golpes, por lo cual; si se rectifica 0.25 mm el herramental estará en condiciones para realizar el punzonado, alcanzando a dar 100,000 golpes más. Si se sigue este procedimiento cuando se haya rectificado hasta 1 mm se habrán realizado 400,00 golpes.

De otra manera en la Tabla 4 en el apartado de "afilado inapropiado", se puede observar que después de que el filo de corte del herramienta redondee a un radio de 0.25 mm y no se haya afilado, al no estar en las mejores condiciones de corte; el herramienta cuando tuviese que rectificarse 0.5 mm (0.25 mm más que antes) se podrán realizar 50,000 golpes. Si se sigue este procedimiento el número de golpes correspondientes para cada afilado de 0.25 mm más, será menor. En síntesis, cuando se tendría que rectificar un total de 1 mm se habrán dado 185,000 golpes, lo que representa un 162% menos de golpes para realizar el punzonado de una pieza.

Se observa que, depende del procedimiento de rectificado que se siga, se pueden dar el doble de golpes. En resumen, un buen mantenimiento del utilaje puede alargar mucho la vida útil de los utilajes y es el mejor método para alargarla.

2.9 PULIDO DE METALES

El lijado y pulido es la parte de la preparación de la muestra que nos permite tener una superficie lo suficientemente lisa como para hacer el análisis microscópico o de dureza [16].

La preparación de la pieza consiste, en general, en obtener primero una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de papeles de esmeril de finura de grano creciente o realizando este desbaste con discos adecuados sobre los que se deposita un abrasivo, terminando con un pulido fino y final sobre discos provistos de paños. El final de la operación es la obtención de una superficie especular que es la requerida para, después, efectuar el ataque y observar adecuadamente la estructura.

Los tipos de lijas que existen son:

- Lijas de SiC (Carburo de Silicio): Son lijas tradicionales y más extendidas en su uso.
- Lijas de Zr (Zirconio): Son lijas para realizar desbastes y especialmente para preparar ensayos de espectrometría.
- Lijas de diamante: Son lijas de gran duración con las que se consigue gran planitud de la muestra y retirar una gran cantidad de material rápidamente.

2.9.1 Procedimiento de pulido

De acuerdo con Neurtek Instruments [16], las recomendaciones dadas para el pulido de un metal son:

1) Toma de muestra:

La probeta seleccionada debe ser características del metal estudiado y servir para el fin a que se dirige tal estudio.

2) Desbaste burdo:

La superficie que haya de observarse se debe de hacer primero plana mediante un desbaste bruto. Cuando el área es grande, se puede terminar en un tiempo muy corto si se le gira ligeramente mientras se desbasta.

Ni durante el desbaste bruto, ni durante los posteriores, intermedio y final, se debe aplicar la probeta contra el medio abrasivo con presión demasiado grande. La presión excesiva no sólo produce rayas muy profundas, difíciles de

eliminar después, sino que también distorsiona intensamente el metal de la superficie de la probeta.

La distorsión del metal superficial no se puede evitar enteramente, pero se puede aminorar mucho mediante técnicas adecuadas de desbaste y pulido; la presión de contacto en las operaciones citadas debe mantenerse baja, y en todo caso, el metal distorsionado se elimina mediante varios ciclos de pulido y ataque. Biselando los bordes de la probeta durante el desgaste bruto se evitan roturas y desgarrones de papeles y paños en las operaciones posteriores.

Cuando la superficie es completamente plana y se han eliminado sus irregularidades, se da por terminado el desbaste bruto.

3) Desbaste intermedio:

El papel de esmeril se coloca sobre una placa o sobre cualquier superficie bien plana y limpia. La probeta se mueve longitudinalmente de un lado a otro del papel comprimiéndola con una presión suave; la dirección del movimiento se mantiene constante, para que todas las rayas producidas sean paralelas. El final de la operación sobre un papel está determinado por la desaparición de las rayas producidas por el desbaste grosero o el papel anterior, y para poder reconocerlo fácilmente se opera en forma que las nuevas rayas sean perpendiculares a las anteriores; así es más fácil ver cuándo estas nuevas rayas sustituyen totalmente a las anteriores más gruesas.

Para desbastar muchas probetas de aleaciones tratadas térmicamente, y en

particular muchos de los metales blandos, es conveniente impregnar los papeles de esmeril con un lubricante adecuado. Para este fin se han puesto muchos líquidos, tales como aceites, gasolina, soluciones de parafina en queroseno, jabones líquidos, glicerina, y mezclas de glicerina y agua. Estos lubricantes disminuyen la fluencia superficial de los metales blandos y evitan la modificación estructural superficial de las tratadas térmicamente, al actuar como refrigerantes, mejorándose los resultados que se obtendrían desbastando en seco

4) Desbaste final:

El desbaste final o fino se realiza de la misma forma que el desbaste intermedio, pasando del papel de esmeril empleado al número 00; en general se utilizan dos papeles, que son el número 00 y el 000.

Cada vez que se cambia de papel se opera en la forma descrita anteriormente, a fin de obtener rayas nuevas perpendiculares a las anteriores. Cuando la observación visual demuestra que sólo existen las rayas producidas por el último papel empleado y se han eliminado totalmente las anteriores, la probeta está en condiciones de ser pulida.

2.10 DURÓMETROS

Un durómetro es un aparato que mide la dureza de los materiales, existen diversos procedimientos para efectuar esta medición, los más utilizados son los de Rockwell, Brinell y Vickers.

Funcionamiento del durómetro:

Para la medición de la dureza de materiales el durómetro funciona de la siguiente manera: Una vez que se selecciona el material del cual se quiere conocer la dureza, se normaliza la fuerza que se le ha de aplicar a través de un elemento penetrador, que también debe estar normalizado.

Dependiendo de la profundidad o tamaño de la huella que se obtenga de esta aplicación de fuerza es como sabremos el grado de dureza del material.

Así se puede conocer la resistencia al corte de la superficie que tiene el material analizado y se utilizan diferentes tipos de durómetros, entre los que encontramos los que se explicaron más arriba.

2.10.1 Durómetro Rockwell

Es el método más utilizado debido a su facilidad de llevar a cabo. El método consiste en aplicar primeramente una precarga menor a 10 kg para eliminar la deformación estática. Luego se aplica una carga que puede variar entre 60 y 150 kg.

Las escalas utilizadas con esta técnica son variadas acorde a las distintas combinaciones de penetradores y cargas que se usen, pudiendo ensayar cualquier metal o aleación, tanto duros como blandos. Hay dos clases de penetradores, los de bolas esféricas de acero endurecido con diámetros normalizados y los cónicos de diamante. El método de medición de dureza

consiste en aplicar primero una carga inicial pequeña, lo que aumenta la exactitud de la medida, y después una carga mayor.

Basándose en la magnitud de las cargas mayores y menores, existen dos tipos de ensayos: Rockwell y Rockwell superficial. En la Figura 11 se especifican las cargas utilizadas para ambos ensayos.

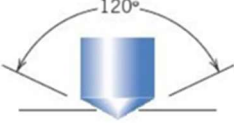



Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga
		Vista lateral	Vista superior	
Rockwell y Rockwell superficial	Cono de diamante			60 kg
				100 kg
				150 kg
	Esferas de acero de $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ pulgadas de diámetro			15 kg
				30 kg
				45 kg

Figura 11. Tipos de penetradores y cargas en ensayos Rockwell y Rockwell superficial [17].

La escala de dureza Rockwell está representada por una letra del alfabeto (A, B, C, D, E, F, G, H y K). Para Rockwell superficial se designa por un número que representa la carga mayor aplicada y una letra que puede ser N, T o W. El número de dureza Rockwell se indica con el sufijo HR y la identificación de la escala. Por ejemplo, 80 HRB representa una dureza Rockwell de 80 en la escala B.

2.10.2 Durómetro Brinell

En los ensayos de dureza Brinell, al igual que en los Rockwell, se usa un penetrador duro esférico en la superficie del material a ensayar. El penetrador es una bola de acero endurecido o de carburo de tungsteno de 10 mm de

diámetro (Figura 12). Las cargas normalizadas están definidas entre 500 y 3000 kg, incrementándose de a 500 kg. Durante el ensayo, la carga se mantiene constante durante un tiempo que va de entre 10 a 30 segundos. El número de dureza Brinell se denota HB (HBW si el penetrador es de carburo de tungsteno) y es función de la magnitud de la carga y del diámetro de la huella resultante. Este diámetro se mide con un microscopio y se convierte a un número HB específico como se indica en la ecuación 4.

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad ec. 4$$

Donde:

P = Carga a utilizar en Kilopondios (Kp).

D = Diámetro de la bola (mm).

d = Diámetro de la huella superficial (mm).

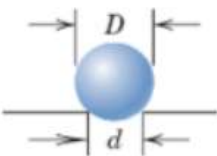

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador	
		Vista lateral	Vista superior
Brinell	Esfera de acero endurecido o carburo de tungsteno, 10mm de diámetro		

Figura 12. Dimensiones del penetrador Brinell [17].

2.10.3 Durómetro Vickers.

En el ensayo Vickers el penetrador está compuesto por un diamante piramidal muy pequeño (Figura 13). Su penetrador es una pirámide de diamante con un ángulo base de 136°.

Para determinar el número de dureza se aplica la ecuación 5.

$$HV = \frac{1.854P}{d_1^2} \quad ec. 5$$

Donde:

P = Carga sobre el diamante (kgf)

d = Diagonal de la huella (mm)

El principio fundamental es observar la habilidad que tiene el material indentado de resistir la deformación plástica. Las cargas aplicadas van de 1 a 1000 g, por lo cual este ensayo es considerado de micro dureza. La marca resultante se observa al microscopio y se mide, esta medida es convertida a un número de dureza que se identifica con HV (Número Pirámide Vickers) o DPH (Número Pirámide de Diamante Vickers). Es necesario que la superficie de la muestra haya sido preparada con desbaste y pulido.

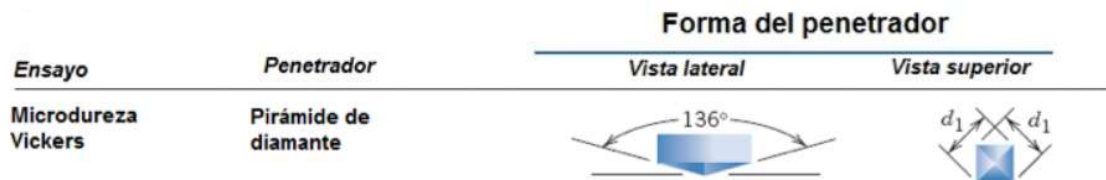


Figura 13. Dimensiones del penetrador Vickers [17].

3 PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

Las matrices para punzonar lámina de acero rolado en caliente (HRS por sus siglas en ingles), están fabricadas de aceros grado herramienta, que son por lo general una aleación diseñada para su uso en cortes industriales, troqueles y moldes. Para obtener las propiedades exigidas en estas aplicaciones, los aceros grado herramienta son tratados térmicamente, obteniendo propiedades mecánicas como: dureza mejorada, distorsión reducida durante el tratamiento con calor, dureza en caliente, tenacidad a los impactos, tenacidad mejorada, formación de carburos metálicos duros para que incrementen su resistencia al desgaste.

Como primer paso para la realización de este trabajo, recolecte toda la información vaciada en el formato de registros de afilado (Figura 14) de herramienta (formato: No. M-IC LMV MV MF-I7.712.02 indicado en la sección 6.1 del manual del sistema de gestión de calidad), el cual es llenado por los operarios a pie de máquina de manera manual. Estos registros no cuentan con la trazabilidad adecuada, debido a que los operarios no tienen el hábito de llenarlos adecuadamente y con la periodicidad indicada (semanalmente) así como tampoco se disponía de un lugar para poder resguardarlos.

NUMERO TRUMPF	NUMERO DE IDENTIFICACION	DEFINICION	Remark	X - Dim	Y - Dim	Min. thick	Max. thick	St. Nr	St. Typ	PERIODO /SEMANA				PERIODO	FECHA DE AFILADO	REVISO
										1	2	3	4			
xyyzz	21999013	MTS-3	MULTI CUADRADO 12.0	12	12	0.5	0.5	802	MTS_5					SEMESTRAL		
xyyzz	11999013	MTS-3	MULTI CUADRADO 11.0	11	11	0.5	3.1	801	MTS_5					SEMESTRAL		
xyyzz	31999013	MTS-3	MULTI RECTANGULO 10 X 5	10	5	0.5	3.1	803	MTS_5					SEMESTRAL		
xyyzz	41999013	MTS-3	MULTI RECTANGULO 10 X 3	10	3	0.5	3.1	804	MTS_5					SEMESTRAL		
xyyzz	51999013	MTS-3	MULTI MICROJOINT 10 X 5	10	5	0.5	0.8	805	MTS_5					SEMESTRAL		
xyyzz	11999014	MTS-4	MULTI RECTANGULO 9 X 4.8	9.5	4.8	0.5	3.1	801	MTS_6					SEMESTRAL		
xyyzz	51999012	MTS-2	MULTI CUADRADO 10.0	10	10	0.5	3.1	505	MTS_7					SEMESTRAL		
xyyzz	41999012	MTS-2	MULTI CUADRADO 9.5	9.5	9.5	0.5	3.1	504	MTS_7					SEMESTRAL		
xyyzz	21999012	MTS-2	MULTI CUADRADO 9.0	9	9	0.5	3.1	503	MTS_7					SEMESTRAL		
xyyzz	21999012	MTS-2	MULTI CUADRADO 8.5	8.5	8.5	0.5	3.1	502	MTS_7					SEMESTRAL		
xyyzz	11999012	MTS-2	MULTI CUADRADO 8.0	8	8	0.5	3.1	501	MTS_7					SEMESTRAL		
xyyzz	51999011	MTS-1	MULTI CUADRADO 7.0	7	7	0.5	3.1	205	MTS_9					SEMESTRAL		
xyyzz	41999011	MTS-1	MULTI CUADRADO 6.5	6.5	6.5	0.5	3.1	204	MTS_9					SEMESTRAL		
xyyzz	31999011	MTS-1	MULTI CUADRADO 6.0	6	6	0.5	3.1	203	MTS_9					SEMESTRAL		
xyyzz	21999011	MTS-1	MULTI CUADRADO 5.0	5	5	0.5	3.1	202	MTS_9					SEMESTRAL		
xyyzz	11999011	MTS-1	MULTI CUADRADO 4.0	4	4	0.5	3.1	201	MTS_9					SEMESTRAL		
xyyzz	4210081	RECTANGULO 21 X 8	RECT	21	8	0.5	0	0	NORM					15 DIAS		
xyyzz	4130080	RECTANGULO 13 X 6	RECT	13	6	0.5	2.5	0	NORM					15 DIAS		
xyyzz	4540050	RECTANGULO 54 X 5	RECT	54	5	0.5	2	0	NORM					15 DIAS		
xyyzz	4800080	RECTANGULO 80 X 6	RECT	80	6	2.1	3.1	0	NORM					15 DIAS		
xyyzz	4200050	RECTANGULO 20 X 5	RECT	20	5	0.5	5	0	NORM					15 DIAS		
xyyzz	4127254	RECTANGULO 34.5 X 12.75	RECT	25.4	12.75	0.5	3.3	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	4100330	RECTANGULO 10 X 3	RECT	10	3	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	4100350	RECTANGULO 10 X 5	RECT	10	5	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	4090045	RECTANGULO 9 X 4.5	RECT	9	4.5	0.5	3.1	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3050000	CUADRADO 50.8	CUAD	50.8	50.8	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3400000	CUADRADO 40.0	CUAD	40	40	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3318000	CUADRADO 31.8	CUAD	31.8	31.8	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3305000	CUADRADO 30.0	CUAD	30	30	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3254000	CUADRADO 25.4	CUAD	25.4	25.4	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3222000	CUADRADO 22.2	CUAD	22.2	22.2	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3200000	CUADRADO 20.0	CUAD	20	20	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3191000	CUADRADO 19.1	CUAD	19.1	19.1	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3150000	CUADRADO 15.0	CUAD	15	15	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3140000	CUADRADO 14.0	CUAD	14	14	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3130000	CUADRADO 13.0	CUAD	13	13	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3121000	CUADRADO 12.7	CUAD	12.7	12.7	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3120000	CUADRADO 12.5	CUAD	12.5	12.5	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3120000	CUADRADO 12.5	CUAD	12	12	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3110000	CUADRADO 11.0	CUAD	11	11	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3100000	CUADRADO 10.0	CUAD	10	10	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3095000	CUADRADO 9.5	CUAD	9.5	9.5	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3090000	CUADRADO 9.0	CUAD	9	9	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3085000	CUADRADO 8.5	CUAD	8.5	8.5	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3080000	CUADRADO 8.0	CUAD	8	8	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3075000	CUADRADO 7.5	CUAD	7.5	7.5	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3065000	CUADRADO 6.5	CUAD	6.5	6.5	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3060000	CUADRADO 6.0	CUAD	6	6	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3050000	CUADRADO 5.0	CUAD	5	5	0.5	5	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3040000	CUADRADO 4.0	CUAD	4	4	0.5	4	0	NORM					MENSUAL		
xyyzz	3030000	CUADRADO 3.0	CUAD	3	3	0.5	3	0	NORM					MENSUAL		

Figura 14. Formato: No. M-IC LMV MV MF-I7.712.02 registro de afilado de herramental.

En Siemens Balvanera se utilizan diferentes matrices, entre ellas una de 50 x 6 mm que de acuerdo con la especificación técnica del fabricante *Mate Precision Tooling* está fabricada en acero grado herramienta (tipo D) con cromo (con formulación protegida), templado al aire con alta resistencia al desgaste. Dicha matriz es usada para el procesamiento de lámina rolada en caliente de calibre 11 y 12 (3.04 mm y 2.66 mm respectivamente).

Para determinar el desgaste que sufre la matriz utilice tres tipos: una nueva con altura efectiva de 20 mm, una a punto de ser afilada con una altura efectiva de 18.22 mm y una recién afilada con una altura efectiva de 17.97 mm como se muestra en la Figura 15, las demás dimensiones de la matriz están representadas en la Figura 16.



Figura 15. De izquierda a derecha: matriz nueva, recién afilada y por afilar, respectivamente.

Con la finalidad de tomar una parte representativa y comparativa de las matrices, de cada una de ellas extraje un cubo de aproximadamente 15 mm (Figura 16 y Figura 17) de la parte central, con el objetivo de medir la profundidad del templado y dureza, por medio del ensayo universal de dureza Vickers.

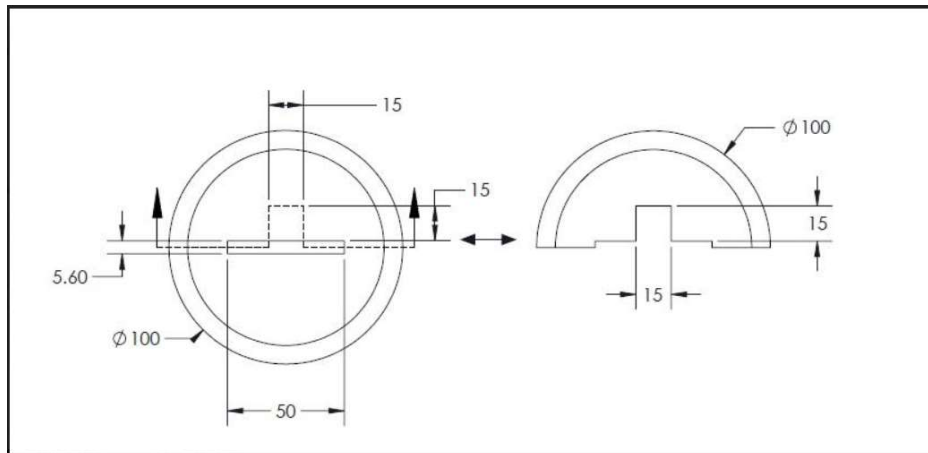


Figura 16. Representación gráfica del corte de la matriz.



Figura 17. Representación del corte de la matriz y cubo de 150 mm, para la medición de dureza.

Para obtener las medidas de dureza, utilice un durómetro RST3 (*Revetest Scratch Tester*) con un penetrador en forma de diamante, ángulo de base de 136° , aplicando una carga de 0.7 kgf con un tiempo de indentación de 10 – 15 segundos[18], [19].

Realice cuatro pruebas en total a cada una, con cinco indentaciones y conservando la distancia mínima entre huellas de 2.5 veces el tamaño de la diagonal (de acuerdo con la norma ASTM E384). La primera prueba la realice en la matriz nueva. La dureza la medí en función de la profundidad en la cara paralela a la frontal como se muestra en la Figura 18.

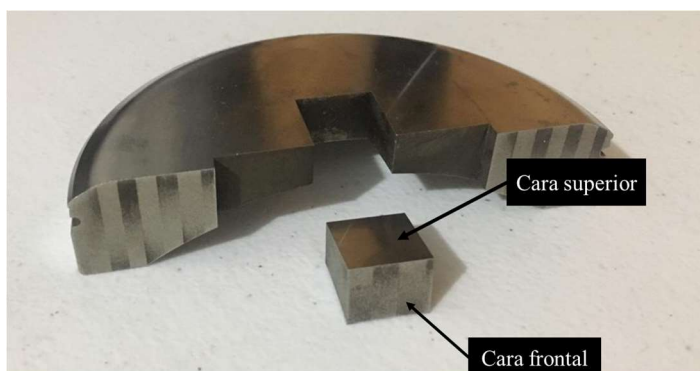


Figura 18. Representación del corte de la matriz, para la medición de dureza en la cara paralela a la frontal.

Realice cinco indentaciones en tres zonas diferentes, con el fin de evaluar la dureza en función del espesor de la matriz, como se muestra en la Figura 19.

1. Zona 1: parte superior aproximadamente a 2 mm de la superficie.
2. Zona 2: parte media aproximadamente a 7 mm de la superficie.
3. Zona 3: parte baja aproximadamente a 14 mm de la superficie.

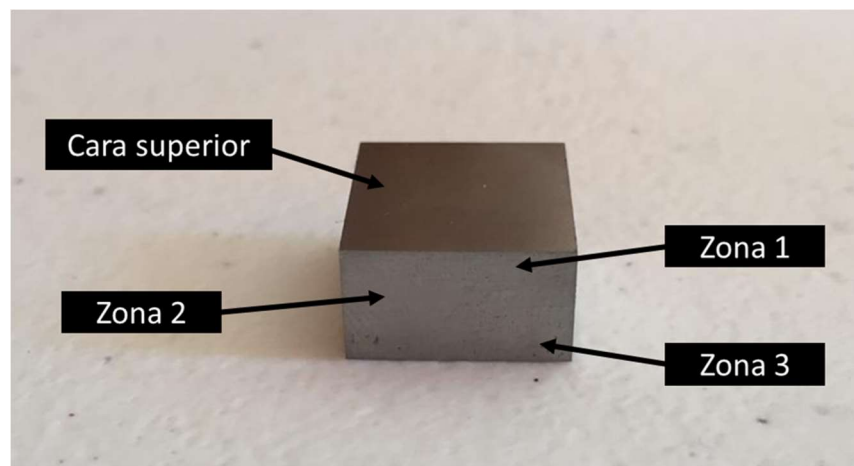
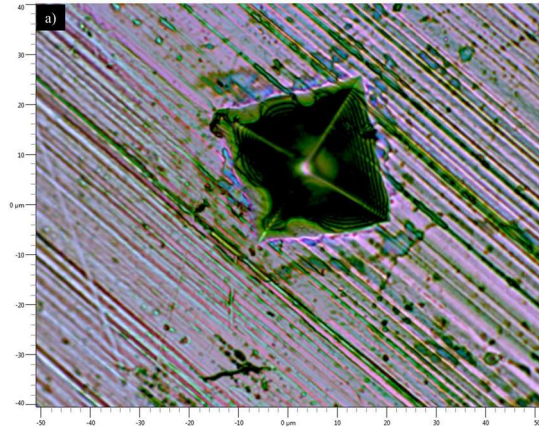


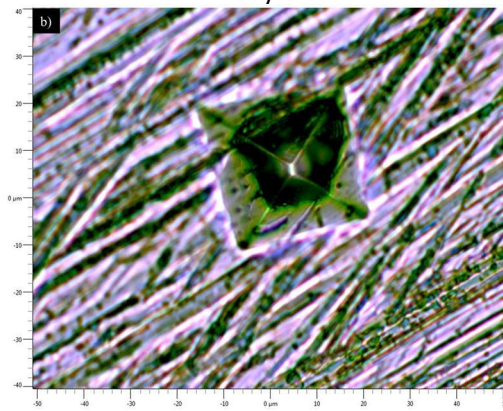
Figura 19. Representación de las tres zonas para la medición de la dureza.

Las otras tres pruebas las realice en cada una de las caras superiores de las tres condiciones de las matrices: matriz nueva, afilada y por afilar.

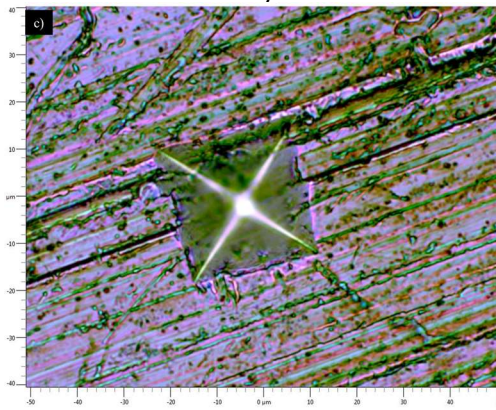
Tome imágenes representativas en un microscopio óptico como se muestra en la Figura 20, a una escala de 20x, con la finalidad de representar la marca de huella del indentador en cada una de las caras superiores de cada matriz.



a)



b)



c)

Figura 20. Marca de huella realizada por un indentador en una prueba de dureza Vickers en una a) matriz nueva, b) matriz recién afilada y c) matriz por afilar.

Finalmente, para corroborar los resultados de dureza en función de la profundidad y medir la composición química prepare la muestra de la matriz

en condición nueva. Para observar la microestructura y medir la composición use un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (*Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM*), marca Jeol, modelo JSM 7200F (Figura 21); es un equipo versátil que revela morfología y composición de materiales de todo tipo, a nivel micro y nanoscópico, permite la evaluación morfológica de la superficie, espesores de capas, zonas de Inter difusión y porosidad de muestras metálicas y no metálicas.



Figura 21. Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM).

El cubo extraído de la matriz (Figura 15) lo monte en una resina en frío y se realice una preparación metalográfica convencional hasta obtener acabado espejo; use papel abrasivo de diferentes tamaños de grano; 46 μm (P#320), 30 μm (P#500), 22 μm (P#800), 10 μm (P#2000), 5 μm (P#4000), alúmina en suspensión de 1 μm y para el acabado final utilice sílice coloidal de 0.02 μm .

Para la observación en el microscopio, la muestra preparada la puse en el porta muestra y la coloqué una cinta conductiva de cobre para aterrizarla (Figura 22), la cámara debe alcanzar un vacío de $\sim 4 \times 10^{-4}$ Pa para poder realizar la prueba.

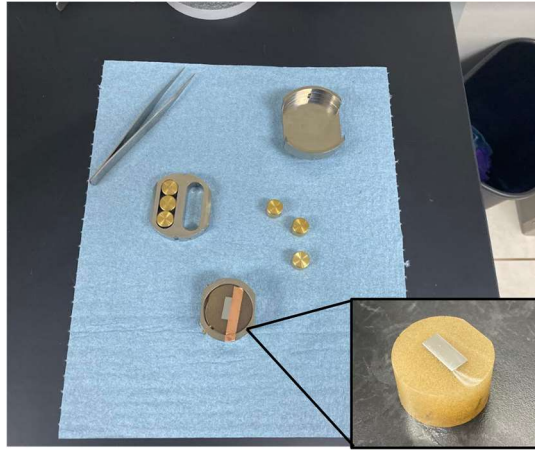


Figura 22. Preparación del cubo para la medición de composición química.

4 RESULTADOS.

En la Figura 23 se puede observar la máquina punzonadora utilizada para realizar el procesamiento de lámina calibre 11 (3.04 mm) y 12 (2.66 mm).



Figura 23. Máquina punzonadora "Trupunch 5000" para procesamiento de lámina calibre 11 y 12.

El resumen de la recopilación de la información de los afilados de las diferentes matrices usadas para el punzonado, de lo que va transcurrido del año se muestra en la Tabla 5 que la matriz más utilizada es la rectangular de 50 x 6 mm (Figura 24), fabricada en acero grado herramienta (tipo D) en cromo, templada al aire con alta resistencia al desgaste, presentando una frecuencia de afilado en promedio de 8.6 veces por mes.

Tabla 5. Frecuencia de afilado de matrices.

Año 2019					
Mes	RECTÁNGULO 21 X 6	RECTÁNGULO 13 X 6	RECTÁNGULO 54 X 5	RECTÁNGULO 50 X 6	RECTÁNGULO 20 X 5
Enero	1	2	6	8	2
Febrero	1	1	4	10	2
Marzo	3	2	7	8	1
Abril	2	2	4	9	2
Mayo	1	1	4	10	1
Junio	1	3	5	8	1
Julio	1	2	4	8	2
Agosto	2	2	4	9	2
Septiembre	1	1	6	8	2
Total	13	16	44	78	15

Esta matriz es usada para el procesamiento de lámina de acero rolada en caliente (*HRS Hot Rolled Steel*, por sus siglas en inglés) calibre 11 (3.04 mm). Se puede apreciar que hay un incremento de volumen de producción en los meses de febrero y mayo, lo cual afecta directamente al procesamiento de lámina calibre 11 (3.04 mm) ocasionando que la matriz sea afilada en mayor cantidad, cuando regularmente esta matriz es afilada en un total de 8 veces al mes.

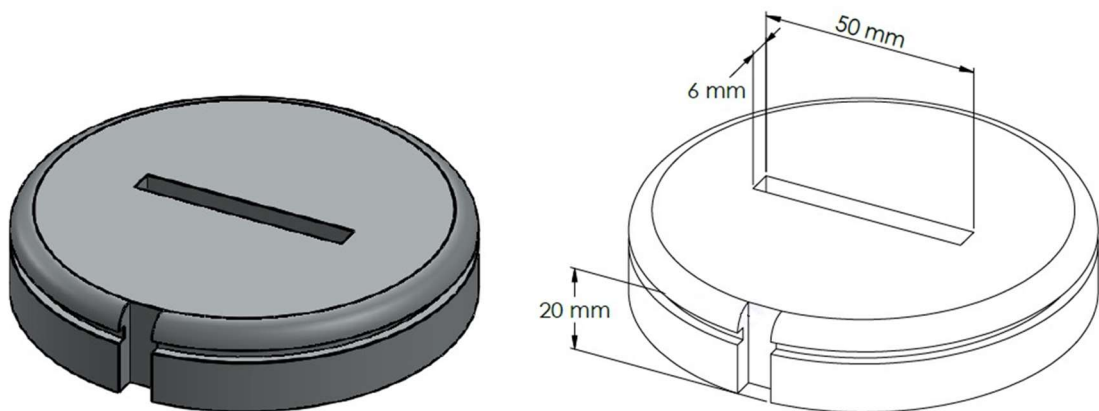


Figura 24. Representación de la matriz 50 x 6 mm.

Para prolongar el uso y la calidad de corte de una matriz, ésta debe afilarse periódicamente según se requiera. Una matriz nueva tiene una altura de 20 mm y de acuerdo con el procedimiento del Sistema de Gestión de Calidad de Siemens Balvanera "Instructivo de punzonado de lámina" No. M-IC LMV MV MF-I7.712.02, se indica que una matriz debe de ser afilada 4 o 5 veces en promedio por mes, sin embargo, como se puede observar en color morado en la Figura 25, la matriz 50 x 6 mm es afilada hasta un 80% más, por encima del promedio, con respecto de las demás matrices. Esto es debido a que este tipo de matriz es la que se utiliza para procesar el calibre 11 (3.04 mm), la cual representa un procesamiento del 70% en las cinco punzonadoras disponibles en planta.

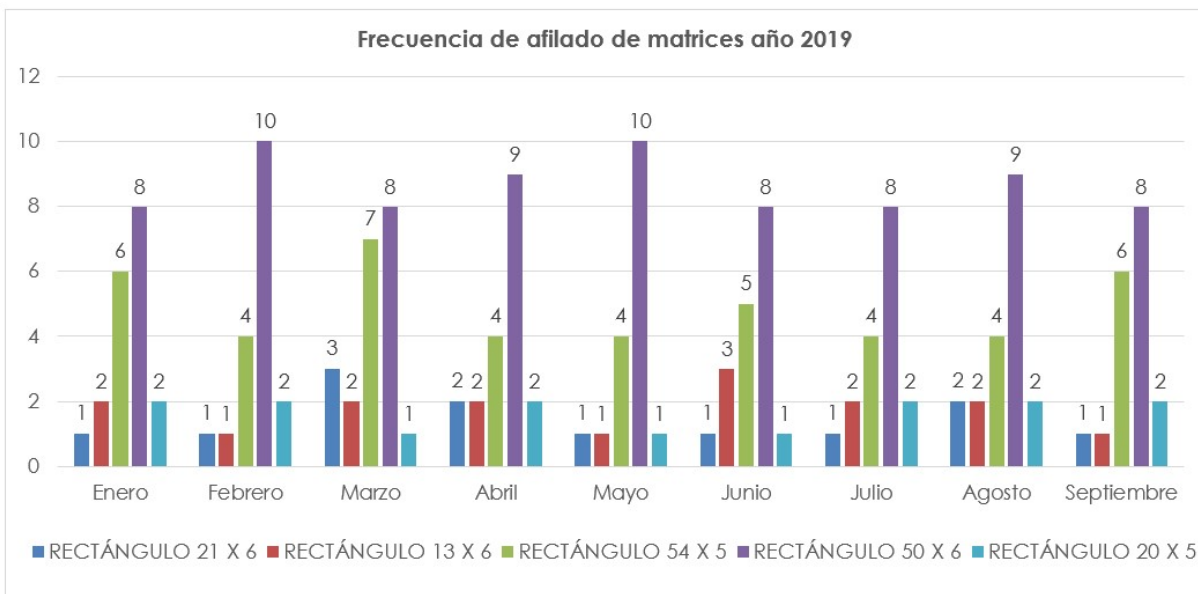


Figura 25. Frecuencia de afilado de matrices año 2019.

Dentro del proceso de punzonado, no hay un estándar para el afilado de la matriz, ya que se afila/desbasta de manera empírica pudiendo tener como

consecuencia un afilado incorrecto que repercute en la vida útil de la matriz y en una mala calidad en el punzonado.

Actualmente el afilado de la matriz se realiza en con una máquina de desbaste (rectificadora tangencial), sin embargo; los parámetros en el proceso del afilado no están controlados. En la Figura 26 se muestra la máquina usada en Siemens Balvanera para el afilado y el montaje convencional de la matriz para el dicho proceso.

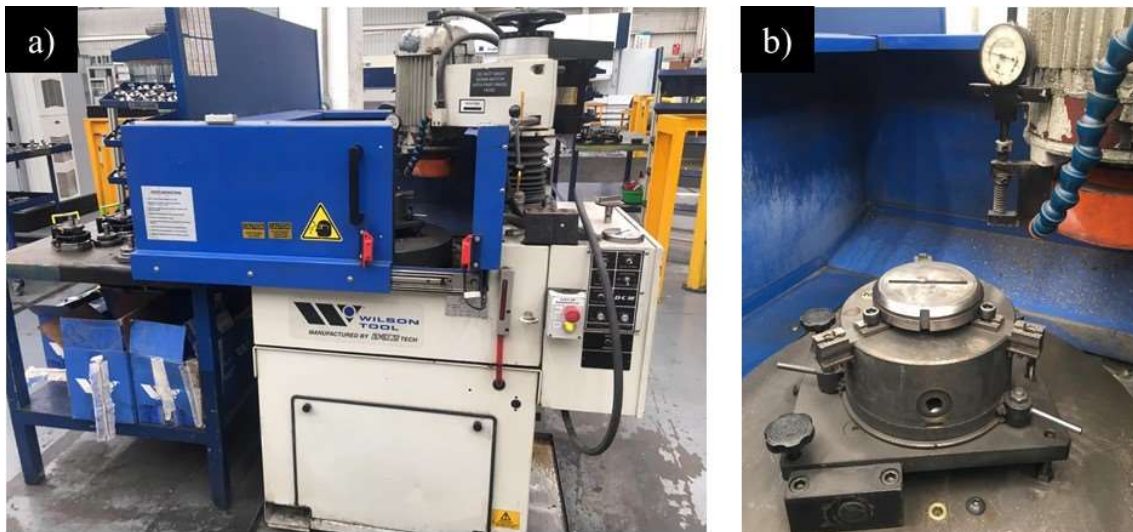


Figura 26. a) Máquina utilizada para realizar el desbaste de una matriz. b) Montaje de la matriz para realizar el afilado.

En el proceso de cada afilada se desbasta aproximadamente $500 \mu\text{m}$, al llegar a una altura efectiva aproximadamente de 18 mm (2 mm menos de la altura nominal) después de 3 a 4 afiladas, la matriz es desechada (considerada como scrap) debido a que ya no se considera apta para punzonar lámina de acero rolada en caliente con calidad.

Acorde con lo mostrado en la Tabla 4, se indica que lo recomendable a desbastar en cada afilada es 0.25 mm (250 μm) ya que, de esta manera la matriz presenta mejores condiciones de punzonado para alcanzar hasta 100,000 golpes[14].

Un factor importante para considerar es la dureza que tiene la matriz y que esta propiedad se conserve a lo largo de todo el ciclo de vida útil, es decir que la dureza sea la misma, aunque ésta se desbaste para ser afilada. Como se vio en la sección 2.7 la dureza está determinada por el tipo de tratamiento térmico y la penetración o profundidad que este alcance en la pieza tratada [11]. Es por esta razón la importancia del conocimiento del gradiente de la dureza en función de la profundidad para la matriz en estado de suministro y conocer la penetración del templado.

En la Figura 27 se muestra la imagen de las indentaciones hechas en la matriz en estado de suministro, así como su ubicación respecto a la superficie, teniendo en cuenta que la superficie es la cara de trabajo de la matriz.

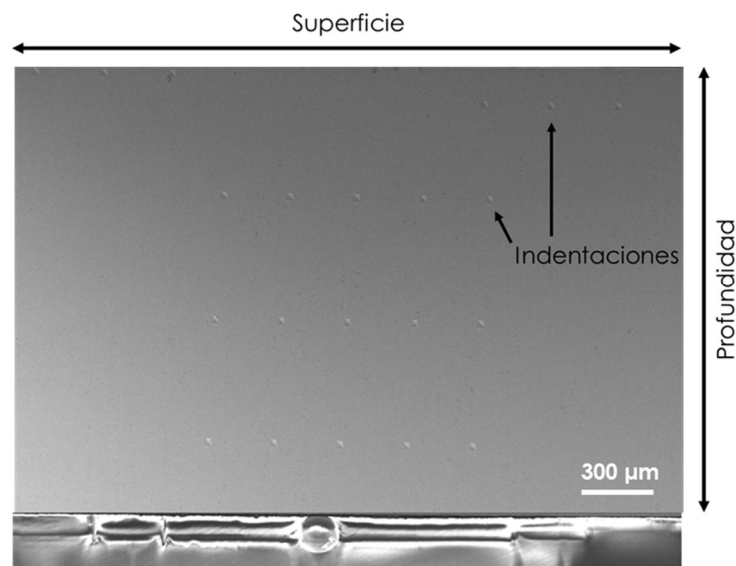


Figura 27. Indentaciones en función de la profundidad matriz en estado de suministro.

Los ensayos de dureza fueron realizados a 40, 100, 200, 500, 1000, 1500 y 2000 μm respecto de la superficie, como se observa en la Figura 27, realice cinco ensayos a cada distancia, las cuales promedie y los resultados son presentados en la Figura 28.

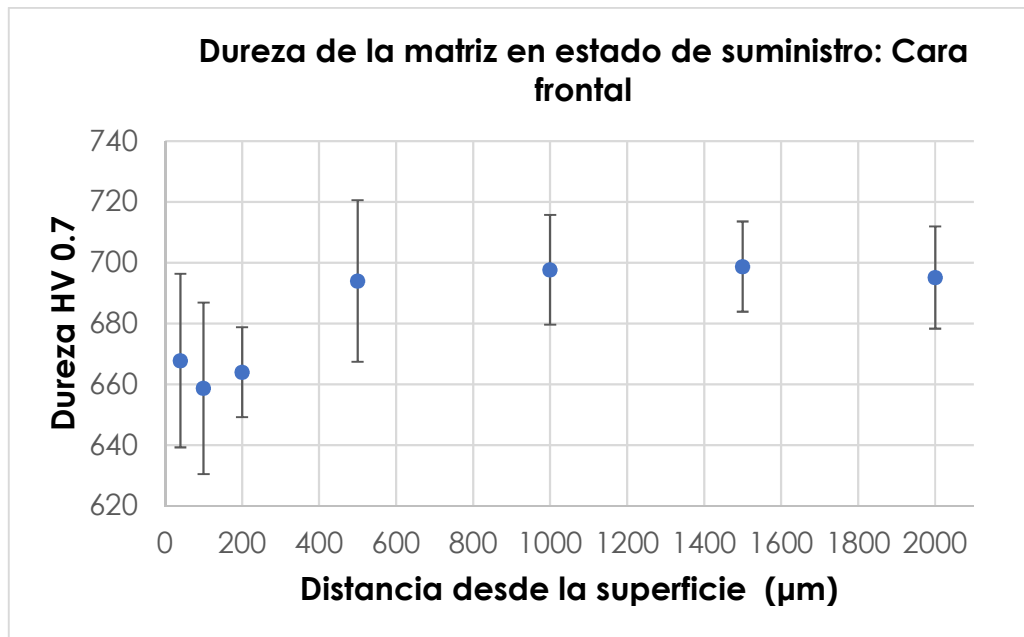


Figura 28. Dureza en función de la profundidad de la matriz en estado de suministro.

Como se puede observar en la Figura 28, los resultados de dureza se comportan de manera homogénea a lo largo de la profundidad evaluada, teniendo en cuenta la dispersión. Es de resaltar que en las primeras micras (40, 100 y 200 μm) se observa mayor dispersión con respecto a las otras, esto al igual que las demás dispersiones en las medidas puede deberse a la microestructura del acero y los precipitados que presenta, en donde por estar más cerca de la superficie facilita la propagación de las grietas a lo largo del interfaz precipitado/matriz o la fractura del mismo precipitado, tal como se observa en la Figura 29.

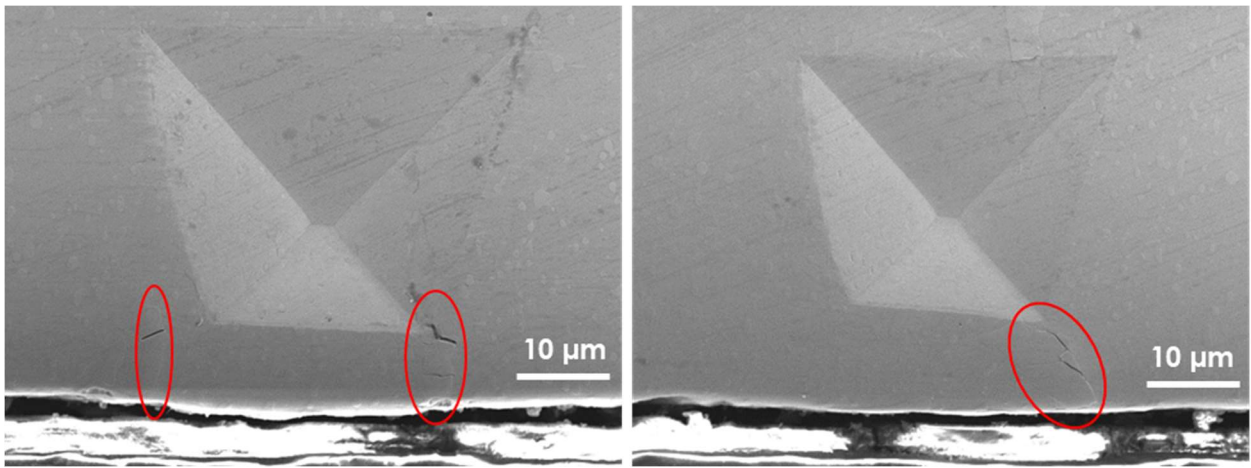


Figura 29. Huellas de indentación a 40 μm de la superficie y precipitados.

Para el caso de las indentaciones hechas a 100 μm , también se observa dispersión la cual como se mencionó anteriormente, dicha dispersión puede estar relacionada con las indentaciones que fueron influenciadas por los precipitados, los cuales son más duros y por lo tanto frágiles, observándose fracturas de los mismos, como se puede observar a detalle en dos de las huellas en la Figura 30, para el caso de esta huella donde se observa claramente la influencia de los precipitados, en la dureza tiene un valor de 775.49 HV, esto significa un incremento de 117.38 HV por arriba del valor promedio. La influencia de los precipitados puede minimizarse si se seleccionan zonas muy específicas en la muestra que no tengan dichos precipitados, pero cabe resaltar que las indentaciones fueron hechas en zonas aleatorias, esto con el fin de no influenciar los valores de dureza y poder obtener resultados representativos de la medida.

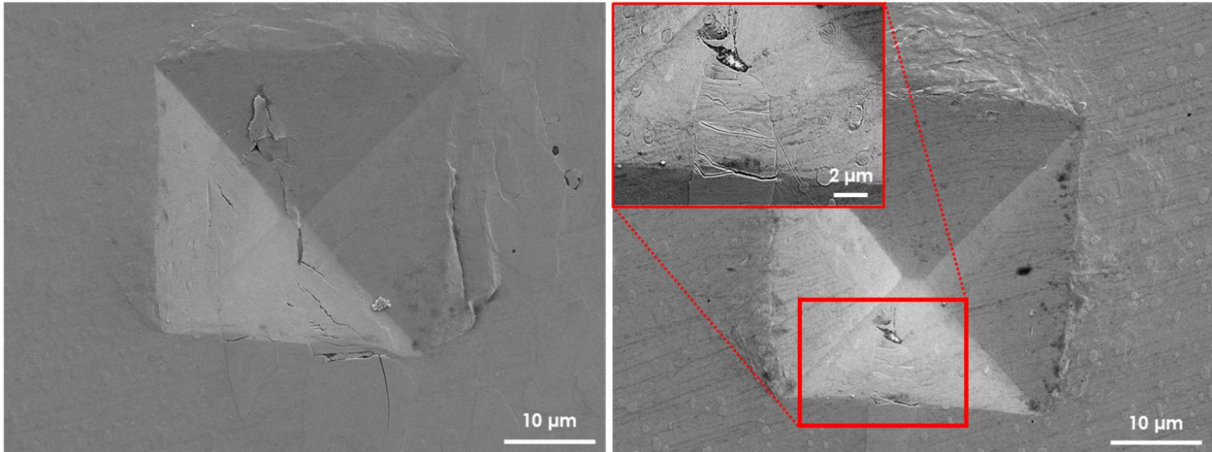


Figura 30. Huellas de indentación a 100 µm de la superficie y precipitados fracturados.

De acuerdo con los resultados anteriores, no se observan variaciones significativas en la dureza en función de la profundidad (distancia desde la superficie) hasta las 2000 µm (2 mm) procedí a evaluar la dureza sobre la misma muestra, pero a otras dos distancias más alejadas de la superficie, pero esta vez se realizadas sobre la cara posterior a la frontal como se indicó en la Figura 15, a 2 mm, 7 mm y 14 mm de la superficie.

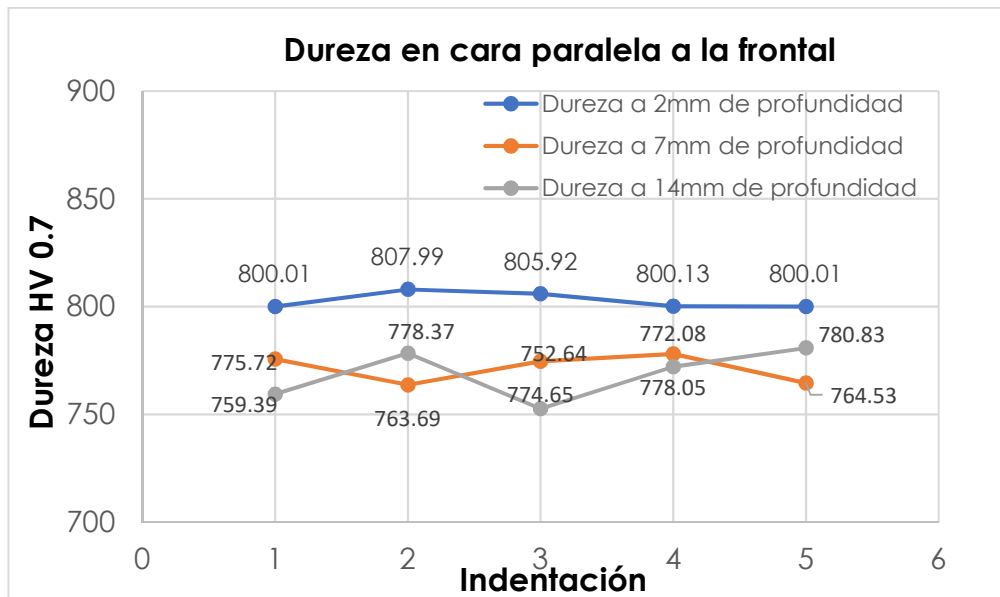
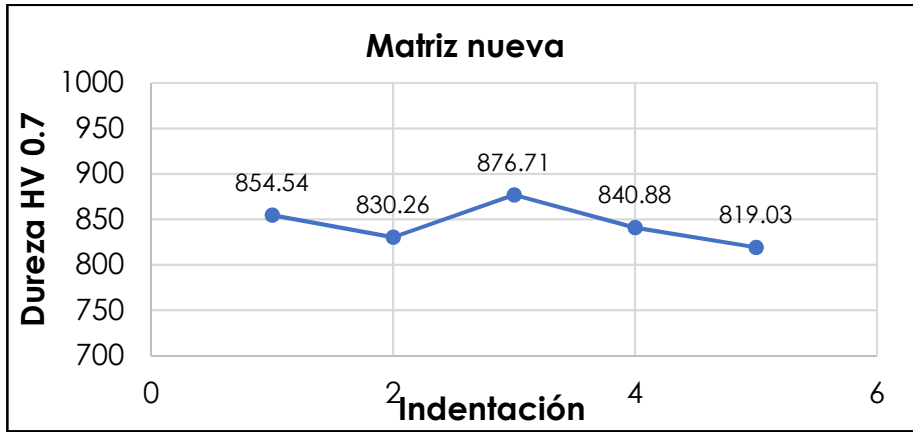


Figura 31. Dureza a lo largo de la profundidad.

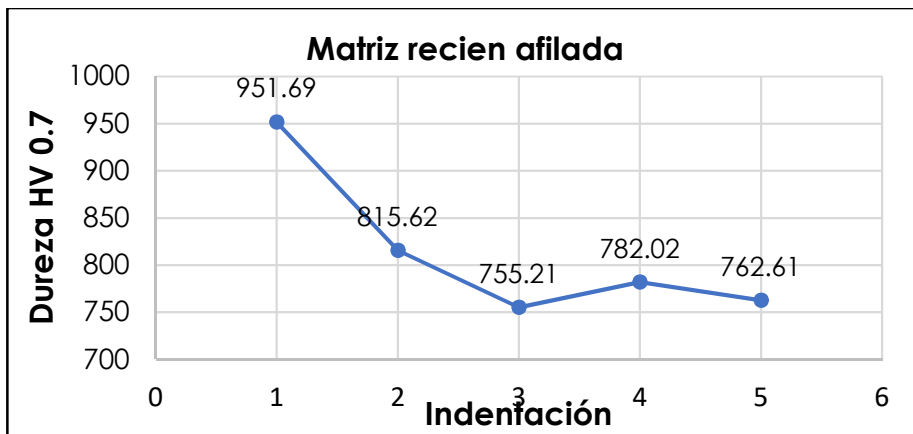
En la Figura 31 se pueden observar los resultados obtenidos de la dureza en función de la profundidad. Se puede observar que la dureza a 2 mm de profundidad tiene una dureza promedio de 802.12 ± 3.85 HV, mientras que la dureza a 7 mm tiene una dureza promedio de 771.33 ± 6.70 HV y por último la dureza a 14 mm cuenta con una dureza promedio de 768.66 ± 12.21 HV.

En la Figura 31 se observa que la dureza es aproximadamente uniforme en toda la cara con un valor promedio de 780.93 ± 0.06 HV, que acorde con el acero para herramienta (D) en cromo templado al aire con alta resistencia al desgaste con el que está fabricada la matriz, deberá de presentar una dureza de 765 Vickers (HV) o su equivalente a 60 Rockwell C (HRC)[4], lo cual implica que el valor obtenido de dureza es 3% superior del que debe tener. Este resultado indica las variaciones obtenidas en dureza como función de la profundidad debidas al temple en aire, aplicado por el fabricante no afecta en este caso, todo esto nos confirma que la matriz en su totalidad presentará una buena resistencia al desgaste, lo cual es determinante para conocer el número de piezas que se pueden punzonar entre cada afilado.

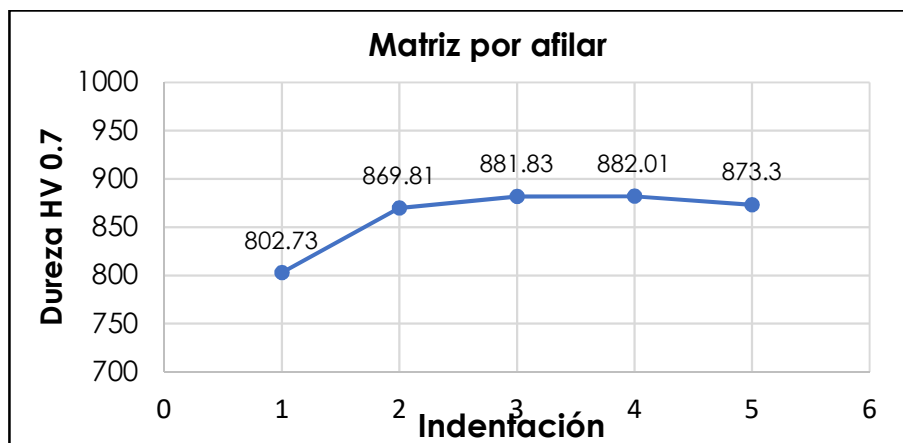
Teniendo en cuenta que la dureza no varía en función de la profundidad, procedí a medir en las tres matrices la dureza en la cara superior (Figura 32) con la finalidad de conocer el comportamiento y comparar del acero estructural en las tres condiciones y ver el efecto del proceso de afilado.



a)



b)



c)

Figura 32. Medición de dureza Vickers (HV 0.7) en una a) matriz nueva b) matriz recién afilada y c) matriz por afilar.

En la Figura 32 se puede observar que la dureza en la matriz recién afilada (Figura 32b) existe una disminución un 26 % con respecto a la dureza más alta presentada en la matriz nueva (Figura 32a), esta disminución se atribuye a una relajación de esfuerzo superficial por el incremento de la temperatura localmente o por la inclusión de esfuerzos a compresión por el trabajo mecánico de desgaste. Sin embargo, aun se encuentra por arriba de lo mínimo requerido (765 HV), por consiguiente, aun presenta resistencia al desgaste requerida para la aplicación.

Por otro lado, en la matriz que esta por afilar (Figura 32c) se observa que la dureza aumenta 10% con respecto a la dureza presentada en la matriz recién afilada (Figura 32a), este aumento se atribuye al endurecimiento local por deformación plástica irreversible provocado por el impacto, que tiene el efecto de incrementar la densidad de la microestructura del material después de cumplir su ciclo de trabajo, lo cual de acuerdo con lo reportado por Feltner and Laird [20] indica que cuando un metal se somete a deformaciones plásticas cíclicas, se puede endurecer o ablandarse dependiendo de su estructura inicial, por lo cual los metales en estado templado que son sometidos a deformaciones plásticas tienden a endurecerse, como lo es el caso de la presente matriz de estudio. Por otro lado, este endurecimiento puede deberse a fatiga, teniendo en cuenta que la fatiga de un metal es producida por un fenómeno llamado *Slip Process* (por sus siglas en inglés), el cual produce un deslizamiento a través de varios planos en el material. La extraordinaria capacidad de un metal para agotar su endurecimiento y alcanzar una tensión cíclica constante, ofrece un enfoque dual para que se produzca el endurecimiento por fatiga (*Hardening Behaviour in fatigue* [21]). Ciertamente el endurecimiento por deformación plástica se puede relacionar

con la fatiga que es generalmente causado por la tensión plástica ocurrida en un ciclo de trabajo (*Plastic strain energy in fatigue failure* [22]).

Con base en los resultados obtenidos del FESEM, se obtiene que la composición química del acero de la matriz (Figura 33) es: 74.2% de Fe, 12.8% de Cr, 9.7 % de C, 1.3% de Mo y 1.1% V., lo cual va acorde con lo reportado por Roberts [23] para un acero D2. Se observan pequeñas diferencias en la composición con respecto a la nominal, esto puede deberse a que el acero por parte del proveedor tiene una formula patentada (*Mate Precision Tool, USA*) y otra razón es que la técnica de EDS es semicuantitativa debido a que no se tiene una referencia exacta de la composición química de la matriz ya que esta patentada por el proveedor. De acuerdo con el esquema de clasificación de la AISI [4] (Tabla 2) indica que un acero grado estructural tipo D debe de tener 1.0 de C, 12.0 de Cr y 1.0 de Mo, se comprueba que la matriz tiene los requerimientos mínimos para que tenga una dureza mínima de 765 Vickers (HV) o su equivalente a 60 Rockwell C (HRC) [4].

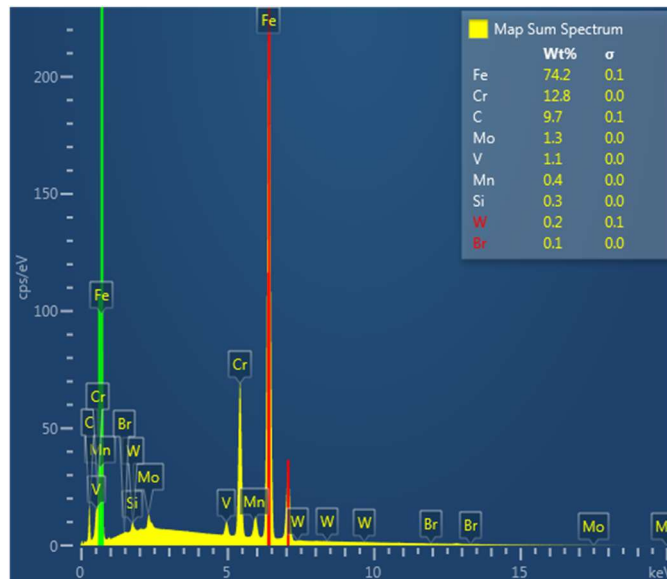


Figura 33. Espectro de EDS de la composición química de la matriz para punzonar lámina rolada en caliente.

La composición química del acero determinará las características de éste y las propiedades requeridas para el trabajo que fue diseñado, adicionalmente el tratamiento térmico como lo es el templeado, le brinda la característica específica al acero [11].

Como se observa en los resultados de dureza (Figura 29 y 30), estos están influenciados por la microestructura, la cual es resultado de la composición química del acero y el tratamiento del temple en aire al cual fue sometido.

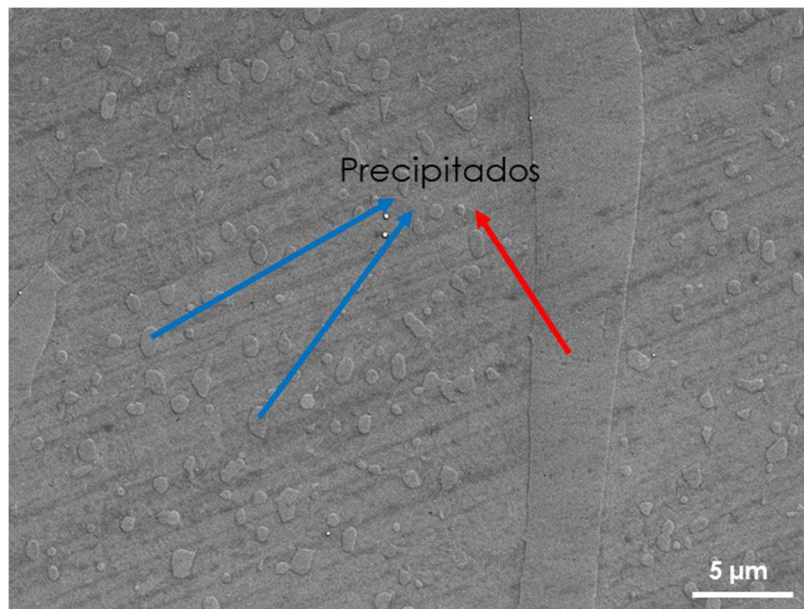


Figura 34. Microestructura del acero en estado de suministro.

La Figura 34 presenta la microestructura del acero. Como se puede observar se distinguen dos tipos de precipitados que pueden diferenciarse por geometría y tamaño, el mapeo de composición química presentado en la Figura 35, permite identificar con claridad.

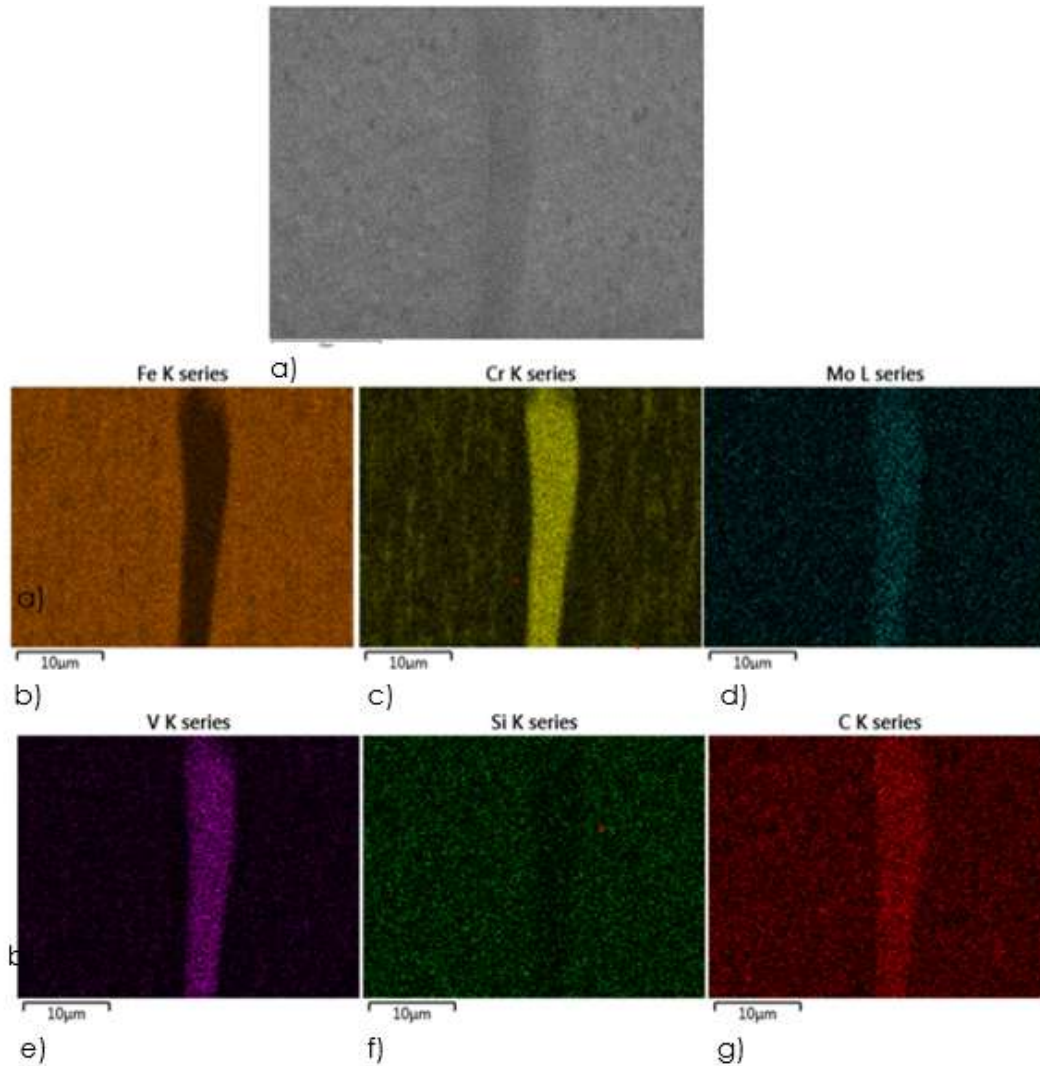


Figura 35. Mapeo de composición química en precipitados grandes y alargados.

En la Figura 35, se puede concluir que los precipitados grandes y alargados son ricos principalmente en Cr, V y contienen trazas importantes de Mo y C. En la Figura 35a, se puede observar la estructura del precipitado (alargada), en la Figura 35b se observa en color marrón la presencia de Fe, en la Figura 35c se observa en color verde la presencia de Cr, en la Figura 35d observa la ausencia de Mo (color azul), en la Figura 35e se observa en color morado la presencia de V, en la Figura 35f se observa la ausencia de Si (color verde) y en la Figura 35g observa la presencia del C.

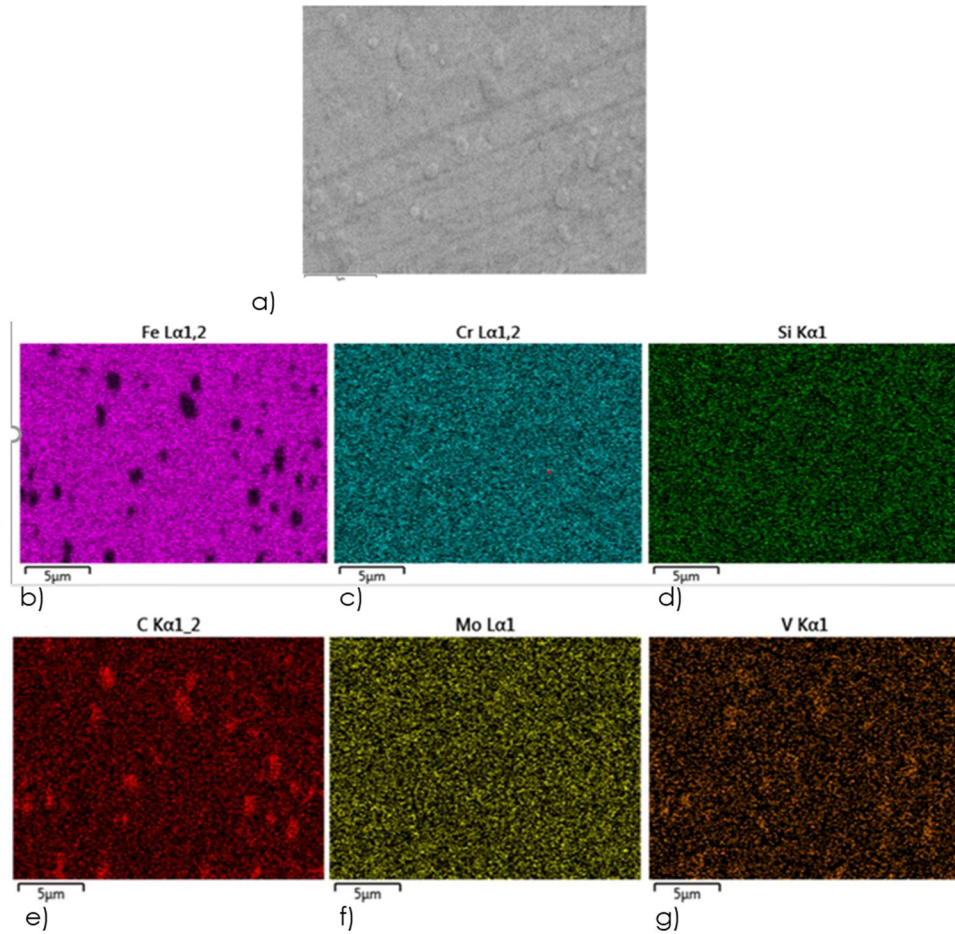


Figura 36. Mapeo de composición química en precipitados pequeños y redondos.

Para el mapeo de los precipitados pequeños y redondos (Figura 36), se puede observar que los precipitados redondos y pequeños son mayoritariamente ricos en C con trazas de V, el Mo y Cr en esta zona están distribuidos en la matriz, a diferencia de la zona donde los precipitados son grandes y alargados. En la Figura 36a se observa la estructura del precipitado, en la Figura 36b se observa en color morado la presencia de Fe, en la Figura 36c se observa en color azul la presencia de Cr, en la Figura 36d observa la ausencia de Si (color verde), en la Figura 36e se observa en color rojo la presencia de C, en la Figura 36f se observa la presencia de Mo y en la Figura 36g observa la ausencia del V (color negro).

CONCLUSIONES.

Los resultados de los ensayos de dureza universal Vickers en función de la profundidad y en cada una de las caras superiores de tres condiciones de matrices: una nueva, una por afilar y recién afilada, se comprueba que la dureza no varía en relación con la profundidad del temple, por lo cual se afirma que es uniforme en los 20 mm efectivos de la matriz. Tomando en consideración que la matriz se desecha después de 4 mm de afilado (16 mm de altura efectiva) y se desbasta acorde al criterio del operador, en síntesis, la matriz puede seguir afilándose para continuar con el procesamiento de lámina calibre 11 (3.04 mm).

Considerando lo anterior, las recomendaciones de afilado para una matriz hechas por C. Molinero [14] son: normalizar el desbaste de la matriz en 0.25 mm (250 μ m), ya que de esta manera la matriz presentara mejores condiciones para poder alcanzar hasta 100,000 golpes reduciendo el afilado que se realiza actualmente (500 μ m) en un 50%, esperando que se duplique la vida útil de la matriz.

Para la creación de la base de datos, se recopiló la información que es vaciada en el formato M-IC LMV MV MF-I7.712.03-F02 llenado por los operarios a pie de máquina. La información obtenida se ejemplifica en gráficas, las cuales detallan los calibres de lámina más procesados, así como el tipo de matriz más usada y su frecuencia de afilado.

De los datos obtenidos y presentados en gráficas, se identifica que los calibres de lámina más utilizados son el 11 (3.04 mm) y el 12 (2.66 mm), los cuales representan un 40% de procesamiento total en las cinco punzonadoras

disponibles en el área de prefabricación. También se identifica que la matriz 50 x 6 mm es la más utilizada en el área de punzonado, representando un 70% de uso, la cual de acuerdo con lo descrito en el párrafo anterior es la utilizada para el procesamiento de lámina acero rolada en caliente (*HRS Hot Rolled Steel*, por sus siglas en inglés) calibre 11 y 12 (3.04 mm y 2.66 mm respectivamente).

Los parámetros actuales de afilado (desbaste de 500 µm realizados dos veces por semana) no son efectivos, debido a que el filo de la matriz al alcanzar un redondeado de 0.25 mm pierde la capacidad de corte, por lo cual al no estar en las mejores condiciones de corte; de realizar 100,000 golpes efectivos solo realizara 50,000 golpes, llegando a reducir hasta en un 162% el número de golpes totales.

Para una matriz con geometría de 50 x 6 mm fabricada de acero clasificación tipo D, he identificado por los resultados de EDS como un D2, la longitud efectiva de desbaste por afilado es más de los 2 mm que se tiene contemplados actualmente en el proceso en planta.

La matriz nueva no tiene variación de la dureza en función de la profundidad, por lo cual el tratamiento térmico es en toda la profundidad de la pieza, lo cual es benéfico para posteriores procesos de afilado, ya que se puede seguir afilando la matriz.

Acorde a las pruebas de dureza realizadas se demuestra que la matriz en cualquiera de sus etapas; nueva, afilada o por afilar cumple con la dureza requerida de al menos 765 HV, indicando homogeneidad del temple a lo largo de los 20 mm que es el total de su espesor.

Se observa de manera puntual que la matriz, después de cumplir su ciclo de trabajo, muestra un incremento de un 10% en la dureza y esto es debido a un endurecimiento local por deformación plástica irreversible provocado por el impacto.

La dispersión en las medidas de dureza es debida a los precipitados que presenta la microestructura del acero, los cuales son ricos Cr, V y Mo, para el caso de los que tienen aspecto alargado y ricos en C y V para de los precipitados de aspecto redondeados.

APORTACIÓN DE LA TESIS

En el desarrollo de este trabajo se logró tener trazabilidad y forma electrónica de los datos de frecuencia de afilado de las matrices usadas, adicionalmente se puede tener una estadística de material usado por meses. Se determinaron los factores que intervienen en el comportamiento mecánico de la matriz para punzar lámina rolada en caliente (*HRS*).

Se atendió la problemática que tiene Siemens Balvanera sobre el afilado del herramental, el cual es realizado acorde a las necesidades del proceso del punzonado de lámina (forma empírica), ya que, a través de la observación del proceso, registro y análisis de datos, se mejorará el proceso productivo del afilado de la matriz. Actualmente la mejora de un proceso productivo se hace en base a las necesidades de la planta, mas no en base a los parámetros inherentes al proceso.

RECOMENDACIONES

Como seguimiento a la implementación del proceso de afilado, se sugiere darlo de alta en el sistema de gestión de calidad en la sección 6.1 "Afilado de herramienta" para su correcta documentación, así como su despliegue en piso para su implementación por parte de los operarios.

Así mismo se recomienda la implementación de la herramienta de calidad SMED (*Single-Minute Exchange of die*, por sus siglas en inglés) con la finalidad de reducir los desperdicios del sistema productivo, esta herramienta se basa en asegurar un tiempo de cambio de herramienta en un solo dígito de minutos.

Para finalizar la continuidad a esta investigación, se recomienda el análisis de la herramienta de calidad de "El estudio de tiempo y movimientos", con la finalidad de establecer un estándar de tiempo en el cambio de herramienta y así poder cuantificar el ahorro (hora/hombre) que representa la reducción de cambio de herramienta (matriz) por un mal punzonado debido a un incorrecto afilado realizado, así como realizar la validación pertinente de la altura de los *fixtures* donde son montados los punzones para validar hasta que medida se puede afilar el punzón.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. A. Robert H. Todd, Dell K. Allen, *Manufacturing Process Reference Guide*. Industrial Press Inc, 1994.
- [2] A. Florit, "Fundamentos de matricería: Corte y punzonado," Grupo Planeta (GBS), Ed. Barcelona, España: CEAC técnico: Mecánica, 2005, p. 11.
- [3] K. Schmid, *Manufacturing engineering and technology*. Pearson, 1995.
- [4] M. P.- Groover, *Fundamentos de Manufactura*. 2007.
- [5] R. A. K. Degarmo, J. T. Black, *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing*. 2011.
- [6] M. N. G. and G. S. Fuks-Rabinovich, "Influence of the crack resistance of tools steels on the life of punching dies," vol. 43, no. 21, pp. 89–92, 1987.
- [7] I. A. Rudenko, "Increase of the durability of punching dies of carbon steel and decrease of distortion during quenching," *Met. Sci. Heat Treat.*, vol. 8, no. 10, pp. 866–867, 1967.
- [8] M. K. Emilia Wolowiec, Piotr Kula, "Tratamiento térmico de aceros para herramientas en hornos de vacío con temple de gas," pp. 1–8, 2012.
- [9] M. Yu Lajtin, "Principios Generales De Los Tratamientos Térmico S De Los Aceros," *Met. y Trat. termicos*, 1973.
- [10] ASTM, "A255-10 Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel," *ASTM Int.*, vol. 03, no. May, pp. 1–24, 2018.
- [11] "Templabilidad de los aceros," 2002. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20071117225139/http://www2.ing.puc.cl/icmcursos/metallurgia/apuntes/cap4/43/>.
- [12] S. Bravo Vargas, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, vol. 3, no. 5. 2018.
- [13] G. Krauss, *Capítulo 8: Dureza y templabilidad en aceros Dureza y*

contenido de carbono. McGraw-Hill, Inc, 2002.

- [14] C. Molinero, "Teoría del punzonado," 2016. [Online]. Available: <http://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/7447-Teoria-del-punzonado.html>.
- [15] S. Subramonian, T. Altan, B. Ciocirlan, and C. Campbell, "Optimum selection of variable punch-die clearance to improve tool life in blanking non-symmetric shapes," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 75, pp. 63–71, 2013.
- [16] R. Generales, P. La, and M. D. E. C. Material, "Preparaciones Metalográficas :," pp. 1–13.
- [17] "De máquinas y herramientas." [Online]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/herramientas-de-medicion/durometro-tipos>.
- [18] ASTM, "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials1," E 384. pp. 1–24, 2005.
- [19] ISO, "Metallic materials — Vickers hardness test," vol. ISO 6507. 1997.
- [20] C. E. Feltner and C. Laird, "Cyclic stress-strain response of F.C.C. metals and alloys-I Phenomenological experiments," *Acta Metall.*, vol. 15, no. 10, pp. 1621–1632, 1967.
- [21] C. Laird and L. Buchinger, "Hardening behavior in fatigue," *Metall. Trans. A*, vol. 16, no. 12, pp. 2201–2214, 1985.
- [22] F. Ellyin and D. Kujawski, "Plastic strain energy in fatigue failure," *J. Press. Vessel Technol. Trans. ASME*, vol. 106, no. 4, pp. 342–347, 1984.
- [23] K. G. Roberts George and K. Richard, *Tool steels*, 5th ed. ASM international, 1998.