

Análisis de la geometría óptima de los dientes de la
escofina para cascos equinos

Eduardo Henao Posada
Ingeniero de producción

Asesor:

Carlos Arturo Rodríguez
Magister en Ingeniería

Universidad EAFIT
Departamento de Ingeniería de producción
Medellín, Antioquia, Colombia
2017

Tabla de Contenidos

LISTADO DE FIGURAS	3
LISTADO DE TABLAS	6
INTRODUCCIÓN	7
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	9
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA COMPAÑÍA	9
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.3. OBJETIVOS	12
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	12
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.4. JUSTIFICACIÓN	13
1.5. METODOLOGÍA	13
2. MARCO DE REFERENCIA	16
3. ESTADO DEL ARTE	18
3.1. MATERIAL DE LA HERRAMIENTA	18
3.2. GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA	20
3.3. AFILADO	25
3.4. MECANISMO DE DESGASTE	27
3.5. MATERIAL A CORTAR	28
4. PROPUESTA DE TRABAJO	29
4.1. METODOLOGÍA	29
4.2. CRONOGRAMA Y PLAN DE TRABAJO	29
4.3. DESCRIPCIÓN DE CADA TAREA DEL CRONOGRAMA	30
5. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN	32
5.1. ANÁLISIS/ESTUDIO DEL PROCESO	32
5.2. ANÁLISIS DEL EFECTO DEL AFILADO	48
5.3. BÚSQUEDA DE MATERIAL SUSTITUTO	51
5.4. ANÁLISIS GEOMÉTRICO DIMENSIONAL	56
5.5. ANÁLISIS DEL PROCESO DE FORMADO	60
5.6. BÚSQUEDA DE LA GEOMETRÍA DE DIENTE ÓPTIMA Y SUS CONDICIONES DE PRODUCCIÓN	62
6. CONCLUSIONES	93
7. RECOMENDACIONES	95
8. AGRADECIMIENTOS	96
BIBLIOGRAFÍA	97

Listado de figuras

Imagen 1. Fotografía de una escofina referencia Legend de la empresa Heller International.....	7
Imagen 2. Fotografía de una escofina referencia Red Tang de la empresa Heller International.....	7
Imagen 3. Fotografía de una escofina por ambos lados. Por un lado tiene dientes mas grandes (lado raspa) y por el otro lado tiene una lima mas fina para dar acabados (lado lima).....	8
Imagen 4. Diagrama de fases Hierro - Carbono. Tomado de las memorias de clase Estructura de los materiales, Gladys Ruiz, 2013-2.	19
Imagen 5. Imágenes de la patente de Whyde 1986.	21
Imagen 6. Imágenes de una raspa Pferd hoof plane. Patente Althoff 2009.....	21
Imagen 7. Descripción de un brochado. Imagen tomada de internet.....	22
Imagen 8. Representación del modelo de fuerzas que interactúan con la herramienta durante el corte (Work material: Material trabajado, Chip: Biruta, Cutting tool: Herramienta de corte). Tomado de (Kobayashi, 1981).	24
Imagen 9. Componente vertical al plano de movimiento de la fuerza de corte vs ángulo de la herramienta de corte (Cutting forces: Fuerzas de corte, Cutting speed: Velocidad de corte, Depth of cut: profundidad de corte, Rake Angle: explicado en la Imagen 8). Tomado de (Kobayashi, 1981).....	24
Imagen 10. Efecto del afilado sobre la vida útil de la herramienta para fresas de acabado según Platit Advanced Coating Systems co (Tool life: Vida de la herramienta, Cutting Edge Radius: Radio del filo). Tomado de (Ashtakov, 2010)	26
Imagen 11. Influencia de el radio de el filo en una broca (Number of holes: Número de agujeros realizados, Cutting edge radius: Radio del filo). Tomado de (Ashtakov, 2010).....	26
Imagen 12. Modulo elástico según la humedad de la muestra (Modulus of elasticity: Módulo de elasticidad, Moisture Content: Contenido de humedad, Mean: promedio, Median: mediana). (S. N. COLLINS, 1998)	28
Imagen 13. Fotografía de la probeta cortada de manera longitudinal para análisis metalográfico y de microdureza.	34
Imagen 14. Fotografía de la probeta cortada de manera transversal para análisis metalográfico y de microdureza.	34
Imagen 15. Fotografía de la metalografía realizada a la muestra A1-1. Corte transversal. 500x	35
Imagen 16. Fotografía de la metalografía realizada a la muestra A1-2. Corte transversal. 200x	37
Imagen 17. Fotografía de la metalografía realizada a la muestra A1-2. Corte longitudinal. 200x.....	37

Imagen 18. Fotografía de la metalografía realizada a la muestra A1-2. Corte longitudinal. Zona cercana a la superficie, martensita muy fina. 1000x.....	38
Imagen 19. Corte longitudinal para metalografía y para microdureza, con las respectivas mediciones luego enunciadas en la tabla de resultados.....	40
Imagen 20. Corte transversal para metalografía y para microdureza, con las respectivas mediciones luego enunciadas en la tabla de resultados.....	40
Imagen 21. Imagen de un intento de medición cerca de la superficie.	42
Imagen 22. Imagen con las especificaciones utilizadas en Heller para valores de dureza HV.....	42
Imagen 23. Gráficas de los resultados de los ensayos de microdureza realizados.	43
Imagen 24. Fotografía de la medición de microdureza de la muestra A1-5.....	44
Imagen 25. Muestras A1-2 (izquierda) y A1-3 (derecha), antes y después del afilado.....	46
Imagen 26. Imágenes de la muestra A1-7.	47
Imagen 27. Imágenes de la muestra A1-8.	48
Imagen 28. Imagen de un diente sin afilar a 200x de magnificación.....	49
Imagen 29. Imagen de un diente después de afilar a 200x de magnificación.	49
Imagen 30. Imagen del diente y la dirección en la cual golpea el chorro de arena y vapor de agua en el proceso de afilado.	50
Imagen 31. Bloque de Hytrel 5556 visto con una escala de medición para aproximar la medida de espesor (1 pulgada).....	52
Imagen 32. Bloque de Hytrel 5556 con una escala de medición para darse una idea de la dimensión de la materia prima suministrada.	53
Imagen 33. Bloque de Hytrel 5556 proveído por Emcoclavos después de ellos realizar sus pruebas.....	53
Imagen 34. Escofina montada en el estereoscopio para análisis de imágenes y digitalización.....	57
Imagen 35. Fotografía producida por el estereoscopio después del análisis de imágenes a diferentes enfoques.	57
Imagen 36. Reconstrucción de superficie y malla poligonal producido por el software del estereoscopio luego del análisis de imágenes a diferentes enfoques.	58
Imagen 37. Imagen tomada para medición de ángulos del diente con el estereoscopio por el equipo de control de calidad de Heller	59
Imagen 38. Bosquejo de los componentes que sujetan el buril en la máquina punzonadora	61
Imagen 39. Imagen del buril desde la vista superior marcando los ángulos formados mediante el rectificado.	62
Imagen 40. Diagrama de flujo del proceso para llevar a cabo un diseño de experimentos.....	64
Imagen 41. Resultados tribómetro convencional sobre las muestras del diseño de experimentos para la referencia Legend.	69
Imagen 42. Fuerza vs número de dato registrado en el ciclo, gráfica común de un ciclo del tribómetro,	71

Imagen 43. (Posición vs dato registrado) Gráfica de la totalidad de los datos de la distancia recorrida por la probeta durante un ensayo.....	72
Imagen 44. Promedio de distancia en cada ciclo registrado.	72
Imagen 45. Remoción específica y fuerza por cada probeta en la escofina a-4.	73
Imagen 46. Remoción específica promedio en cada probeta para la segunda ejecución de el diseño de experimentos completo.....	75
Imagen 47. Remoción específica promedio en cada probeta para la primera ejecución de el diseño de experimentos completo.....	76
Imagen 48. Consolidado de ensayos realizado sobre escofinas de la referencia “abc”.	77
Imagen 49. Imagen de las modificaciones y el montaje realizado en el tribómetro convencional para poder ensayar con probetas del material sustituto encontrado (Hytrel 5556).....	78
Imagen 50. Primer ensayo con el tribómetro convencional sobre el material Hytrel 5556.....	79
Imagen 51. Tiempo total requerido para consumir la totalidad de 50 mm de probeta por cada escofina.	79
Imagen 52. Variación en porcentaje del menor y mayor (con respecto al menor) tiempo para remover 50 milímetros de probeta durante los ensayos con el material Hytrel 5556 en el tribómetro convencional.	80
Imagen 53. Diseños de experimento de factorial fraccionado con sus niveles y factores y niveles de resolución (precisión). Imagen tomada del software Minitab.....	82
Imagen 54. Explicación de cada variable de la lima. Donde A es el ángulo superior, B es el ángulo inferior, E es el paso (en dientes por pulgada) superior y F es el paso inferior (en dientes por pulgada).....	83
Imagen 55. Bosquejo de el cincel que forma el diente de la lima.....	84
Imagen 56. Comparativo de el perfil de el diente de la lima entre la ABF y una lima regular de la producción.....	86
Imagen 57. Comparativo de fotografía superior entre una lima ABF y una común.	86
Imagen 58. Prueba de tribómetro de remoción. Cantidad removida de probeta vs ciclos.	87
Imagen 59. Fuerza inicial promedio de los primeros 50 ciclos de corte.	87
Imagen 60. Imagen de corte para metalografía con aumento de 100x de la lima ABF y porcentaje de composición de microestructura(Area Percentage: Porcentaje de área).....	89
Imagen 61. Resultados de la prueba de clogging en varias limas, en el eje Y está el peso adicional en gramos.	90
Imagen 62. Comparación de acabado superficial de el casco de el caballo con una lima ABF y una lima normal.	91

Listado de tablas

Tabla 1. Cronograma de actividades.	29
Tabla 2. Tabla de resultados para el análisis de composición química de las muestras A1-1 y A1-3.	39
Tabla 3. Tabla de resultados para el análisis de composición química de las muestras A1-4 y A1-6.	39
Tabla 4. Resultados de ensayos de microdureza para todas las muestras en ambas direcciones.	41
Tabla 5. Promedio de microdureza en HV0.2 para cada zona de cada muestra. ...	45
Tabla 6. Valores de volumen, peso y densidad de las muestras de Hytrel 5556 en escala de dureza: Shore D.....	52
Tabla 7. Valores de dureza según la dirección de prueba para verificar la anisotropía del Hytrel 5556 en escala de dureza Shore D.....	54
Tabla 8. Valores de dureza entre las 3 muestras escogidas aleatoriamente para verificar la reproducibilidad de sus propiedades en la dirección de remoción en escala de dureza Shore D.....	54
Tabla 9. Valores de la ficha técnica del Hytrel 5556, de los ensayos realizados sobre el Hytrel 5556 y sobre los valores de la literatura y ensayos hechos sobre el casco equino.	55
Tabla 10. Factores y niveles para el diseño de experimentos.	65
Tabla 11. Muestras y nivel de factor que contienen.....	65
Tabla 12. Factores y niveles para diseño de experimentos lado lima.....	82
Tabla 13. Diseño de experimentos completo para lado lima.....	84
Tabla 14. Valores de microdureza y dureza superficial obtenidos de la escofina ABF.....	88
Tabla 15. Resultados de mediciones de rugosidad para las mejores 4 limas y una estándar en micrómetros. El último valor es el promedio.	91
Tabla 16. Valores actuales y valores sugeridos para las variables de producción en las escofinas (Lado raspa).....	93
Tabla 17. Valores actuales y valores sugeridos para las variables de producción en las limas.....	94

Introducción

Este proyecto busca, de forma conjunta entre el grupo de investigación de Heller International y el Grupo de Investigación en Tecnologías de Producción del Departamento de Ingeniería de producción de la universidad EAFIT, investigar el proceso de formado de la lima escofina utilizada en el proceso de herrado de los caballos. Se busca contar con la información que le permita a la empresa conocer las variables del proceso de fabricación, la influencia de la geometría del diente en el desempeño de la lima y los procesos de aseguramiento de la calidad requeridos para garantizar una alta durabilidad de la vida útil de la herramienta y unas condiciones de uso adecuadas para el herrero y con buenos acabados finales. En la Imagen 1 e Imagen 2, se observan las escofinas tradicionales de Heller para cada una de las referencias a estudiadas.



Imagen 1. Fotografía de una escofina referencia Legend de la empresa Heller International.



Imagen 2. Fotografía de una escofina referencia Red Tang de la empresa Heller International.

En una primera fase, se analizan las condiciones geométricas y de proceso de las escofinas, se plantean soluciones en el proceso y en la geometría. Esto se realiza por medio del trabajo conjunto de un estudiante de Maestría en Ingeniería y el profesor Carlos Arturo Rodríguez del Grupo de Investigación en Tecnologías de la Producción del departamento de Ingeniería de Producción y el grupo de investigación conformado por los empleados de Heller International, encargados del proceso técnico de la compañía.

Como resultado final del proyecto se presentan unos informes técnicos para la compañía y esta tesis de Maestría.

En la Imagen 3, se observa una fotografía de una escofina por lado y lado, donde un lado es el lado raspa y el otro es el lado lima, esto para tener la posibilidad de mayor desbaste y una de mejor acabado en una sola herramienta.



Imagen 3. Fotografía de una escofina por ambos lados. Por un lado tiene dientes mas grandes (lado raspa) y por el otro lado tiene una lima mas fina para dar acabados (lado lima)

1. Generalidades del proyecto

En este capítulo se presenta una descripción de la compañía con la cual se realiza el proyecto, los problemas que tienen y que se buscan resolver, y la forma mediante la cual se pretende resolver estos problemas.

1.1. Descripción de la compañía

Nombre de la compañía: Heller International S.A

Eslogan: Heller Rasps. Reach for tradition.

Página Web: www.hellerhoofrasps.com

Dirección: Bodega 34 – Zona Franca de Rionegro, Antioquia, Colombia

Teléfono: +57(4)5622244

Fundada por Elías Heller en Newark en 1836, producía solo para el comercio local. En 1866 Elías George Heller, hijo mayor, y Paul Elías Heller, hijo menor, se mudaron a una fábrica más grande y se expandieron aprovechando el nuevo sistema de ferrocarriles en USA. Tuvieron mucha oposición tanto de distribuidores como de consumidores que decían que era mejor el producto importado que tenía un monopolio del mercado. Con esfuerzo y perseverancia rompieron el mercado convenciendo al público que los americanos podían hacer iguales, o mejores escofinas.

En 1912 muere George Elías Heller y lo sucede su hijo Paul como cabeza del negocio. En 1917 Paul compró los terrenos de una recién incendiada fábrica de limas y sierras llamada Rex File & Saw Co. Aprovechando mayor espacio y costo de mano de obra más barato. Poco a poco movió todas las operaciones y en 1953 cerró Newark y se movieron completamente de Newcomerstown, Ohio.

En los años cincuenta, casi toda la tercera generación de los Hellers había muerto y la nueva generación no tenía interés en el negocio. Esta generación le vende la compañía a Simmonds en 1955. Simmonds producía limas en

Fitchburg hasta 1960 cuando cerraron y se movieron a Newcomerstown a la planta de Heller.

Heller International S.A. fue creada en noviembre de 2006 a raíz de la compra del negocio que era propiedad de Simmonds, por parte del grupo Mustad. Este grupo tiene sede en Suecia, y se dedica a la fabricación de productos para el cuidado del casco de los equinos (clavos de herrar, herraduras, herramientas de herrado, entre otros), con plantas ubicadas en USA, Europa, Asia, Latinoamérica y Australia. El producto que fabrica Heller, ubicada en la zona franca de Rionegro, Antioquia, consiste en las escofinas que son usadas para el herrado de equinos, el mismo que es exportado en su totalidad hacia los 4 grandes centros de distribución del grupo Mustad en USA, Colombia (Bogotá), Holanda y Australia, desde donde se distribuye alrededor del mundo a todos los almacenes de productos relacionados con el sector. Como parte del grupo, hay una planta de fabricación de clavos de herrar ubicada en Bogotá, Emcoclavos.

1.2. Planteamiento del problema

Heller International, empresa localizada en la zona franca de Rionegro, Antioquia, montó localmente la producción de limas escofinas a través del traslado de una planta de los Estados Unidos a Colombia, con el fin de producir para el mercado de exportación. Sin embargo el nivel tecnológico de los equipos importados no es muy alto, el producto y el proceso productivo trasladados a la compañía fueron los métodos tradicionales de producción. Sin embargo, el departamento de producción de Heller en Colombia ha estado interesado en mejorar varios aspectos del proceso productivo, y superar algunas dificultades de producción, tales como:

- Problemas de calidad (durabilidad y reproducibilidad de el producto)
- Problemas de trazabilidad del proceso

- Estandarización del proceso
- Reducción de productos rechazados por los clientes
- La necesidad del lanzamiento de nuevos productos al mercado
- La competencia de otros productores en el orden mundial con productos muy competitivos en diseño y producción.

Por lo tanto, la empresa para poder conservar y aumentar su participación en el mercado mundial, requiere, a partir de herramientas de ingeniería, conocer mucho más su producto, sus características de proceso, las características del material donde se usa el producto (casco del caballo) y la búsqueda de nuevas geometrías y formas que hagan su producto innovador en el mercado y de muy alta aceptación por los herreros en todo el mundo a donde lleguen los productos.

Dado el nivel actual de la tecnología de los equipos, se requiere de igual forma analizar las condiciones actuales del proceso, para identificar las fuentes de producto rechazado, estandarizar el producto y reducir la cantidad de unidades rechazadas por los usuarios.

Actualmente se utilizan máquinas para el conformado de los dientes de las escofinas, con diseños que datan de los años cuarenta (1940), los cuales no tienen los elementos para lograr un producto consistente, a causa de las altas variaciones que presentan sus sistemas mecánicos mientras fabrican las escofinas. Esto genera una alta variabilidad en la forma de los dientes obtenidos, que se traduce en una inconsistencia del desempeño de la escofina. A raíz de esta situación se presentan reclamaciones del mercado, afectando la imagen del producto de alta calidad y el posicionamiento en el mercado frente a la competencia, que podría afirmarse se compone de no más de 5 empresas alrededor del mundo. El concepto de los herradores allegados a la empresa Heller (clientes principales de los productos) es que la competencia también ofrece productos con baja consistencia en su desempeño. El interés, para lograr consolidarse como la empresa líder a nivel mundial en la calidad de las

escofinas, es buscar la morfología ideal para el diente, que garantice el óptimo desempeño de corte y longevidad, con la consistencia que permita obtener un nivel de reventa superior al actual, y una mayor participación del mercado, conllevando esto a un incremento en las ventas de la compañía. Solo a manera de información, el producto Heller, participa en el mercado mundial en un 35%, lo que significa que, aún siendo líderes en este sentido, todavía hay mucho campo para incrementar la participación en el mercado. Una vez definido el diente ideal, hay que buscar la manera de reproducirlo con los equipos actuales y establecer procesos de control de proceso y de calidad que aseguren que siempre se está sacando el mismo diente diseñado.

Hoy en día, se puede obtener una escofina (cuyo desempeño se mide en número de caballos herrados) que dure 100 caballos, seguida por una que solo dure 2 según las pruebas de campo realizadas por Heller con sus herradores de confianza. Se desea reproducir cualquiera de los dos productos, ya que con el sistema actual no es posible. Sin esa estandarización es difícil consolidar el producto con diferenciación y liderazgo en el mercado.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la forma adecuada del diente de las limas escofinas de Heller International S.A., con el fin de incrementar la durabilidad del filo de corte representado en el número de caballos mínimos trabajados por unidad.

1.3.2. Objetivos específicos

Analizar las condiciones de corte de las limas de Heller International y compararlas con las detectadas en los productos similares de la competencia,

con el fin de determinar unas condiciones para las variables que influyen al momento del corte, y analizar las variables en las que influye la empresa que ayuden a un buen desempeño o en su defecto un mal desempeño.

Revisar las condiciones del proceso de afilado y las modificaciones que puede generar en la forma del diente que afecten el proceso de corte y la durabilidad de la herramienta, mediante escaneo tridimensional, técnicas de microscopía y análisis de fuerzas en el tribómetro de la empresa.

Analizar el proceso actual de formado del diente en la empresa con la tecnología y equipos actuales para determinar parámetros de proceso, afilado del buril, trazabilidad, parámetros de máquina y condiciones de la materia prima, con el fin de determinar cuál es el diente que actualmente se obtiene bajo estas condiciones y su repetitividad.

1.4. Justificación

La necesidad de Heller International de investigar, en compañía del grupo de Investigación de Tecnologías de la Producción de EAFIT, las características del proceso productivo y los elementos de análisis basados en ingeniería, requeridos para el control de proceso y el aseguramiento de la calidad, así como las condiciones de conocimiento del producto (a través del estudio de la geometría del diente y de las condiciones de fuerzas de corte) que permitan a la compañía obtener un producto mas confiable y con mejores condiciones de desempeño y durabilidad.

1.5. Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos se realiza la siguiente metodología:

1. Revisión Bibliográfica y estado del arte.
Se realizan búsquedas en las bases de datos y en la literatura para encontrar estudios previos sobre este tema y conocer un poco mas las posibles variables que influyan sobre el objetivo

2. Estudio del proceso actual.
Se visita la planta de producción de Heller para conocer mejor los procesos de fabricación y como se pueden mejorar o cambiar para cumplir con los objetivos del proyecto.
3. Análisis del material actual de las escofinas
Se realiza un estudio para validar el material y sus propiedades.
4. Análisis de proceso de tratamiento térmico
Se realiza un estudio sobre el tratamiento térmico para determinar los cambios que está realizando dentro del material y sus propiedades para determinar si son adecuados para la herramienta.
5. Revisión del proceso de afilado de los dientes
Se realiza un estudio sobre el proceso de afilado y como afecta la herramienta, se estudia la forma de cuantificar el filo.
6. Revisión de proceso del proceso de fabricación del diente y las variables que influyen en el formado del diente.
Con base en el estudio del proceso actual (ítem 2), se estudia como realizar los cambios requeridos para obtener cambios en las variables que influyan sobre la geometría de la herramienta.
7. Planteamiento de DOE para lado raspa y lado lima.
Teniendo las variables y como cambiarlas, se procede a realizar un diseño de experimentos para encontrar en la práctica, cuanto y como afecta cada variable.
8. Realización de lotes de prueba.
Se fabrican las herramientas con las variables requeridas para el diseño de experimentos
9. Ensayos y pruebas en laboratorios de Heller y Universidad EAFIT
Se realizan los ensayos de calidad como de desempeño acordados entre Heller y el Grupo de Investigación en EAFIT
10. Ensayos y pruebas de capo con herreros
Se llevan las herramientas a los usuarios finales para obtener sus apreciaciones y comentarios.

11. Análisis de resultados

Se realizan los análisis de los resultados obtenidos en todos los ensayos y se elaboran conclusiones.

12. Elaboración de Informes y Trabajo de Grado.

2. Marco de referencia

Dentro de los trabajos que Heller ha emprendido desde sus inicios, con el fin de buscar mejoras al proceso productivo y a sus productos, se puede contar con los siguientes dentro del campo de la investigación:

Con la Universidad Nacional, se han adelantado desarrollos como la selección de nuevos materiales para la fabricación de las escofinas. Un estudio del comportamiento del horno de bismuto de templado, con el fin de mejorar las condiciones del proceso de tratamiento térmico. Estudios para incrementar la vida útil del herramental de corte de las escofinas y limas. Eliminación de la salmuera como elemento de temple, reemplazándola por agua. Capacitaciones en el uso de máquinas de laboratorio. Desarrollo de un sistema de automático para la recuperación de la arena del afilado. Recuperación del bismuto.

Con la Universidad EAFIT, contando con la participación de dos profesores, se diseñó y fabricó una máquina punzonadora automática, de tipo hidráulico, para la conformación de los dientes de la escofina. Se adelantó un estudio de las características de corte de las escofinas y las de la competencia. Se realizó un escaneo digital por contacto y posiciones en tres dimensiones de las escofinas, con el fin de determinar parámetros críticos de desempeño. Asesoría de personal experto para la calibración de los equipos de laboratorio. Se diseñó y se construyó una máquina CNC para automatizar y estandarizar el redondeo de los buriles que se usan en las máquinas punzonadoras. Está en proceso un proyecto para instalar un nuevo tribómetro con celda de carga para medición de fuerzas de corte y desgaste de la herramienta.

Con la Universidad de Antioquia se está trabajando en un proyecto que pretende cambiar completamente el concepto actual del proceso de afilado que se usa en la planta. El proceso de afilado gasta mucha arena, elemento que no es muy amigable con el medio ambiente.

Con la firma Asei S.A.S se diseñó un sistema de alimentación automática de arena al proceso de afilado.

Con la empresa Sumicol S.A.S y su área de desarrollo de producto, se realizó un estudio para sustituir la arena importada por arena del mercado local.

Con la compañía Quimincol S.A se desarrolló la aplicación de un desengrasante amigable con el medio ambiente, y está en proceso el diseño del uso de un decapante, así como dos lubricantes protectores para la escofina que actualmente son importados, para sustituirlos por producto local.

A través del acompañamiento de una firma de consultoría en lean manufacturing, se logra iniciar el proceso de rediseño de los procesos de la empresa. Actualmente se cuentan con el apoyo de un ingeniero de producción egresado de EAFIT, quien está al frente de la implementación del sistema.

Con la empresa hermana ubicada en Bogotá, Emcoclavos, se rediseña parte de una de las punzonadoras, con el fin de automatizar los movimientos de las mesas principales, logrando una mejora notable en la distribución de los dientes de la escofina.

3. Estado del Arte

Cuando se habla de extender la vida de la herramienta, los factores mas importantes a tener en cuenta según la literatura (Gorczyca, 1978) (Kobayashi, 1981) (Valls, 1967) (American Society of Mechanical Engineers, 1980) (Atkins, 2009) (A Kishawy, A. H and Hosseini, A, 2013), son:

3.1. Material de la herramienta

El material de la herramienta define su éxito o su fracaso, tiene una influencia profunda en el desempeño de la herramienta. Este material debe contar con:

- Resistencia a altas fuerzas para no deformarse
- Dureza apropiada para que no se fracture por fragilidad del material
- Resiliencia para poder absorber el choque y la deformación
- Resistencia al desgaste

Existen demasiados materiales para fabricar herramientas de corte. Para este caso se estudian los aceros de mediano y alto carbono, debido a que este no es un estudio de material óptimo ya que la empresa realizó uno con la Universidad Nacional y lo que se pretende es hacer una verificación y desarrollo de conocimiento propio sobre este acero que se usa actualmente.

Se están utilizando actualmente dos tipos de aceros importados. Un acero AISI 1050 y uno 1070. Este último (1070) con el objetivo de aumentar la dureza y para buscar alargarle la vida a la herramienta.

El hierro, generalmente es aleado con el carbono para generar lo que llaman aceros. El carbono le modifica propiedades al hierro dependiendo del porcentaje de carbono adicionado. Para los tipos de aceros y nomenclatura usada, se tiene que los dos últimos números de la referencia de acero indican el contenido de carbono en centésimas de porcentaje (ejemplo: el 1050 tiene 0.5% de carbono y el 1070 tiene 0.7% de carbono). Los dos primeros números son para indicar otros aleantes pero en este caso no hay más aleantes. La serie 10 no contiene elementos aleantes.

Para mostrar el comportamiento de dos elementos cuando son aleados, existe un diagrama llamado diagrama de fases (las fases, son la microestructura que

se tiene en el material). Este muestra el contenido de uno y de otro elemento y la fase que forman, a determinada temperatura. Estas fases tienen propiedades diferentes las unas de las otras.

En la Imagen 4 se observa el diagrama de fase Hierro – Fe₃C (carburo de hierro – Fe₃C, un cerámico que se forma a partir del hierro y el carbono.) Solo es de interés el diagrama hasta 6% de carbono debido a que los porcentajes de carbono que utiliza Heller son muy bajos (0.5% y 0.7%) y no se utilizan aceros con contenidos de carbono por encima de estos valores.

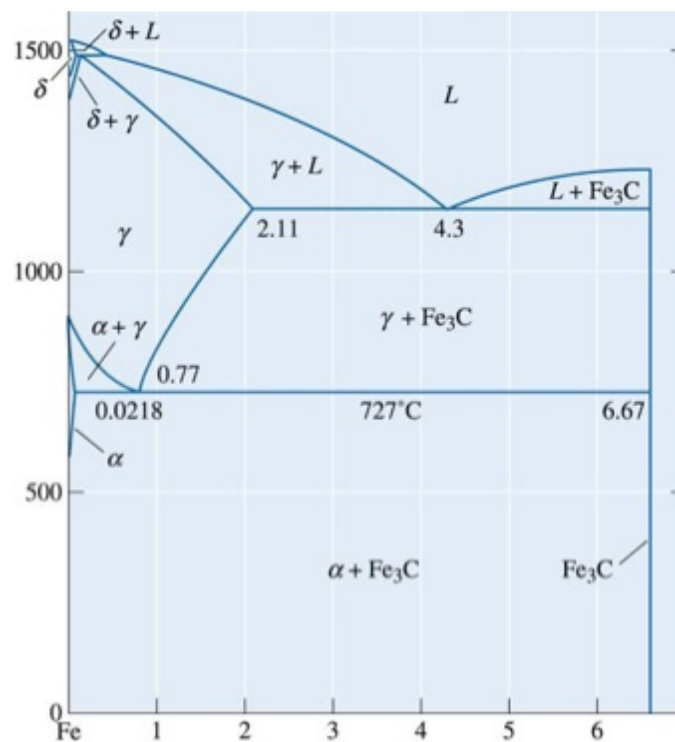


Imagen 4. Diagrama de fases Hierro - Carbono. Tomado de las memorias de clase Estructura de los materiales, Gladys Ruiz, 2013-2.

Los aceros generalmente tienen un proceso de templado para obtener la microestructura o fase deseada y aumentar la dureza, este se hace elevando la temperatura del acero por encima de un cambio o transformación de fase y dejándolo un tiempo a esta temperatura para que la microestructura del material logre uniformidad. La temperatura debe ser elevada en hornos especiales para prevenir la pérdida de algún elemento aleante, para este caso en particular se usa un baño de bismuto fundido. Luego se enfría de manera

rápida ya sea en agua o en aceite, para “congelar” esa microestructura obtenida a unas temperaturas mas altas. Las microestructuras diferentes, pueden darle propiedades diferentes a un mismo material, tales como mayor dureza y mayor módulo de elasticidad.

3.2. Geometría de la herramienta

Existen varias patentes para productos relacionados con el desbaste y cuidado del casco equino para el herrado, hay tanto patentes para el estilo clásico (Whyde, 1986) que se observa en la Imagen 1, patentes que buscan asistir el modelo actual de escofina (Jones, 2012), como patentes novedosas que tratan de cambiar la tendencia clásica (Haugaard, 2008) (Tomlinson, 2009) (Walker, 2006), a pesar de estos cambios e intentos de cambiar tendencias el mercado mundial sigue siendo dominado por la forma clásica de escofina, a excepción de la escofina maquinada marca Pferd (Althoff, 2009) que se observa en la Imagen 6, esta se asemeja mas a un proceso de brochado (Imagen 7) que las demás.

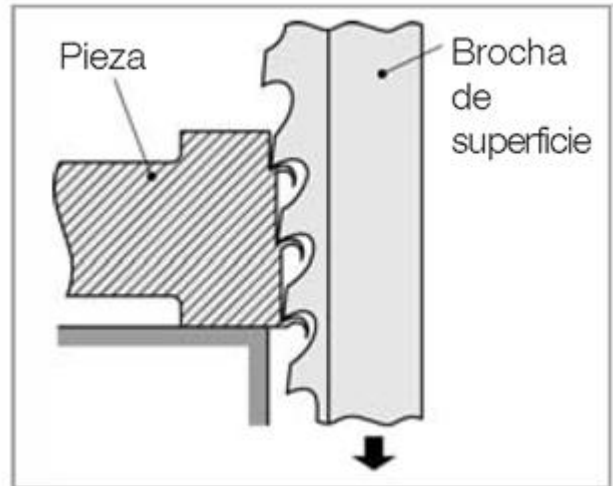


Imagen 7. Descripción de un brochado. Imagen tomada de internet.

Debido a la particularidad del producto en estudio, no existen estudios previos acerca de geometrías óptimas de desempeño en herramientas para limado de cascos equinos, existen sin embargo, estudios y libros de herramientas que trabajan de manera similar, como el brochado (Kishawy, 2013) y las herramientas de corte de un solo punto como buriles (Ashtakov, 2010). Estos estudios se centran alrededor de maquinado de metales, nunca se habla sobre maquinado de polímeros o materiales blandos que es este caso, a excepción del libro de maquinado de plásticos ya mencionado (Kobayashi, 1981).

Mediante búsqueda en las bases de datos y la literatura, se logra determinar los factores geométricos más importantes a tener en cuenta para el desempeño óptimo de las herramientas de corte para todos los materiales en general, teniendo en cuenta que el análisis se realiza partiendo desde cada diente en particular para luego escalarlo a la herramienta entera.

- **Área de contacto de la herramienta con el material**

Se encuentra que existen herramientas con un alto desempeño según las evaluaciones de los usuarios en blogs de internet (www.forloveofthehorses.com/forum/index.php?topic=1024.0) y por pruebas de campo realizadas marca “Pferd” y la patente es la ya mencionada en el estado del arte (Althoff, 2009). Esta escofina por ser maquinada, permite que el área

transversal entera actúe como punto de contacto y de corte en la herramienta. Basados en esta premisa, se supone que a mayor área de contacto, mejor será el desempeño de la escofina. Esto se ha verificado mediante evaluaciones de campo de una nueva escofina que tiene 8 dientes y no 6 como la tradicional. Esto aumenta el área de contacto de la herramienta en un 33%.

- **Ángulo de incidencia de la herramienta**

En la literatura se encuentra que el ángulo de ataque del diente es muy importante en el desempeño y en reducir los esfuerzos de corte. En las siguientes imágenes, tomadas de la literatura (Kobayashi, 1981), se puede observar un modelo simple de fuerzas de corte y la influencia del ángulo.

En la Imagen 8 se observa un esquema de las fuerzas involucradas en el proceso de corte y las respectivas variables que se involucran en el proceso. El proceso de corte en un diente de una escofina, funciona de la misma manera que otras herramientas de corte, el filo penetra y desprende el material a cortar.

En la Imagen 9 se observa la magnitud de la componente vertical al plano de corte, de la fuerza de corte y se puede observar como tiende a 0 o se hace 0 en algunos casos para determinados ángulos.

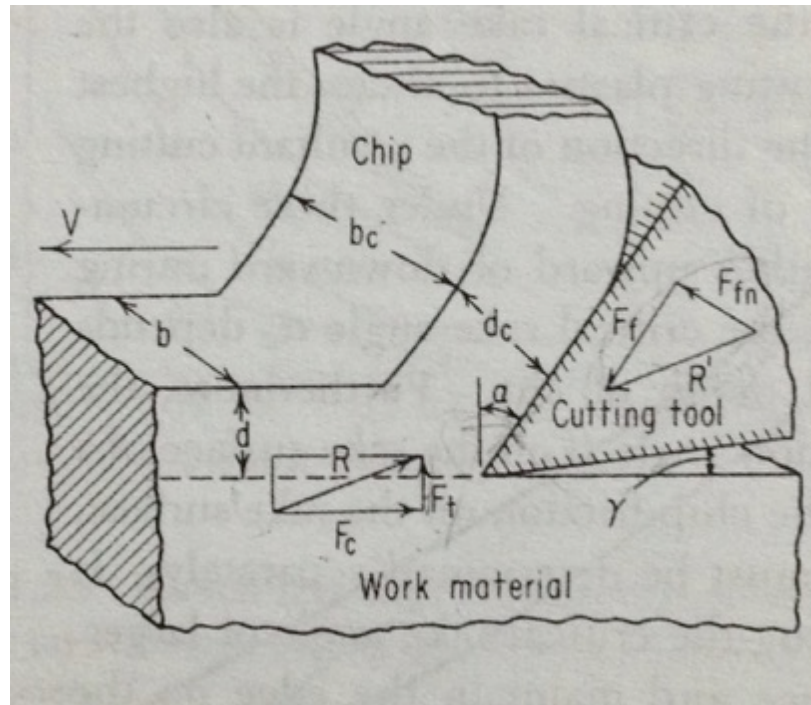


Imagen 8. Representación del modelo de fuerzas que interactúan con la herramienta durante el corte (Work material: Material trabajado, Chip: Biruta, Cutting tool: Herramienta de corte). Tomado de (Kobayashi, 1981).

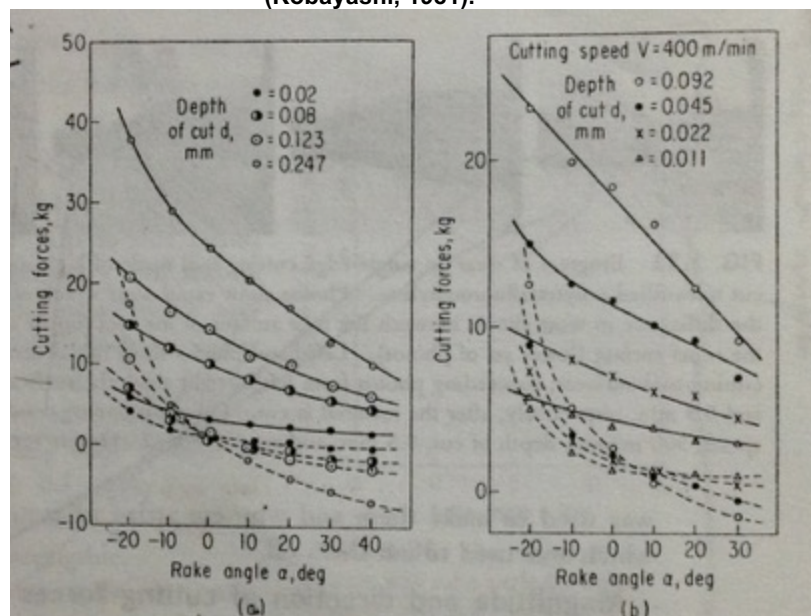


Imagen 9. Componente vertical al plano de movimiento de la fuerza de corte vs ángulo de la herramienta de corte (Cutting forces: Fuerzas de corte, Cutting speed: Velocidad de corte, Depth of cut: profundidad de corte, Rake Angle: explicado en la Imagen 8). Tomado de (Kobayashi, 1981)

El autor menciona que esto se debe hacer de manera experimental para cada material a cortar y que, a medida que se encuentre un ángulo óptimo de corte, se reduce la componente vertical a 0 o cerca de 0 y se reduce la fuerza total de

corte. Esto prolonga la vida de la herramienta debido a que se reduce la fuerza total de corte y hace que esta sea mayormente o totalmente en la dirección para la cual está diseñada la herramienta.

3.3. Afilado

Por afilado se entiende la facilidad de corte de una herramienta. Siempre se dirá que una herramienta más afilada corta más fácil que una menos afilada.

En términos más específicos y técnicos el filo de una herramienta se puede medir como el radio que tiene el borde de corte de esta herramienta visto desde una sección transversal. Este filo es proporcional a la fuerza específica de corte de la herramienta para determinado material, debido que tiene una mayor facilidad de penetración.

Esta geometría o radio del borde de la herramienta, es muy importante por el hecho ya mencionado que afecta directamente las fuerzas involucradas en el proceso, lo que la mayoría de la gente en la industria falla de ver, es la importancia que tiene controlar esta variable cuando se diseña la herramienta, es decir, no por el hecho de que se reduzca la fuerza específica de corte, quiere decir que la herramienta sea mejor. Será mejor en este aspecto pero peor en otros. Controlar esta micro geometría con afilados controlados tampoco es una tarea fácil, pero puede traer beneficios a la herramienta.

En las imágenes 10 y 11, se observan gráficas de la vida de la herramienta (medida en % del máximo) en el eje “y”, con el radio del filo en el eje “x”

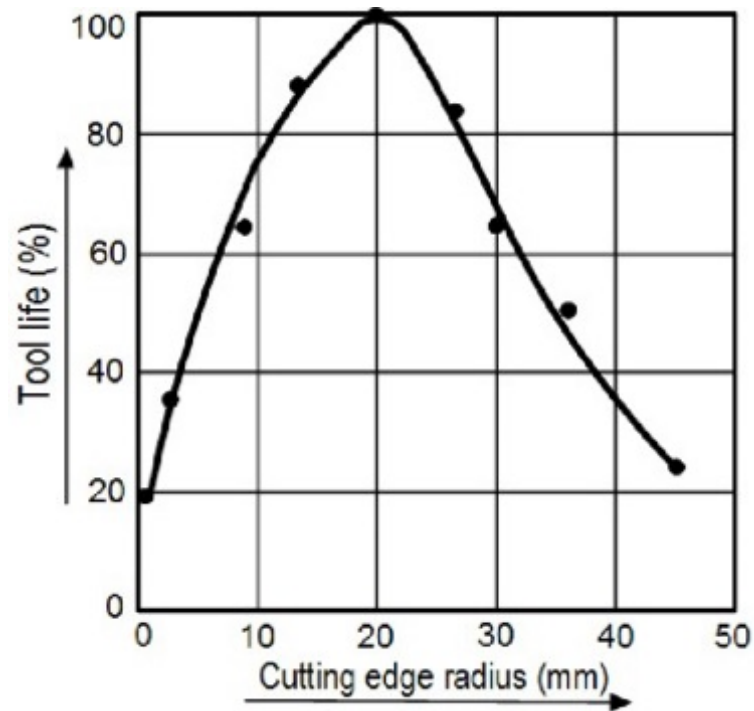


Imagen 10. Efecto del afilado sobre la vida útil de la herramienta para fresas de acabado según Platit Advanced Coating Systems co (Tool life: Vida de la herramienta, Cutting Edge Radius: Radio del filo). Tomado de (Ashtakov, 2010)

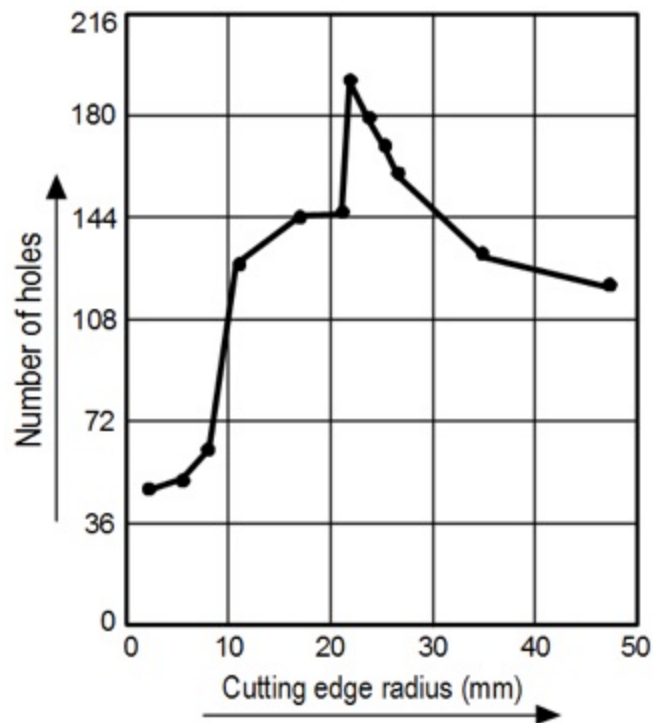


Imagen 11. Influencia de el radio de el filo en una broca (Number of holes: Número de agujeros realizados, Cutting edge radius: Radio del filo). Tomado de (Ashtakov, 2010)

Se observa en estas imágenes que hay un máximo de desempeño en durabilidad de la herramienta y no es precisamente cuando el radio del filo es el más bajo. Por esta razón, es importante tener en cuenta este detalle para el proceso de afilado, si es posible controlar este proceso y realizar experimentos para encontrar una geometría ideal en el filo, se incrementaría mucho el desempeño de la herramienta en cuanto a su vida útil (Ashtakov, 2010).

3.4. Mecanismo de desgaste

Cuando se habla del desgaste de la herramienta es muy importante saber qué tipo de mecanismo de desgaste está sufriendo la herramienta para poderlo prevenir mejorando aspectos, ya sea de material, o uso o geometría de la herramienta.

Los mecanismos de desgaste más importantes son (Gorczyca, 1978):

- **Abrasión**

Partículas del material removido u otro material se deslizan a través de la herramienta removiendo material de esta.

- **Adhesión**

Se adhieren pedazos del material removido al filo de la herramienta previniendo que esta pueda cortar debidamente.

- **Difusión**

Se somete la herramienta a temperatura y esfuerzos que causan un debilitamiento de los enlaces de los átomos en la herramienta debilitando sus propiedades o composición.

- **Deformación plástica**

De manera similar al mecanismo anterior, se somete la herramienta a altas temperaturas y esfuerzos pero con el resultado de una deformación en la herramienta ocasionando un trabajo incorrecto de esta.

3.5. Material a cortar

El casco equino es un tema ampliamente investigado y publicado en las revistas y libros de veterinaria, muchas veces se hacen estudios sobre el casco de burros, vacas y en muchos casos del material de los cachos de los animales, que resulta siendo el mismo material con algunas diferencias en propiedades. El material que compone el casco equino es un compuesto biológico producido naturalmente llamado queratina (J. MC KITTRICK, 2012). El problema con este material es que nunca va a ser igual el casco de un caballo con otro, demasiados factores influyen sus propiedades, tales como genética, alimentación, humedad del ambiente, lugar de residencia del equino, entre otros. Se puede observar el comportamiento descrito en un artículo (S. N. COLLINS, 1998) que el módulo de elasticidad varía demasiado según el porcentaje de humedad de la muestra.

En la siguiente imagen se puede observar los resultados que se presentan en este artículo, se tiene el módulo de elasticidad en el eje “y” y las muestras en el eje “x”. Hyd'd significa hidratada, Fresh significa fresca, 75% RH es 75 de humedad relativa y Dry es deshidratada.

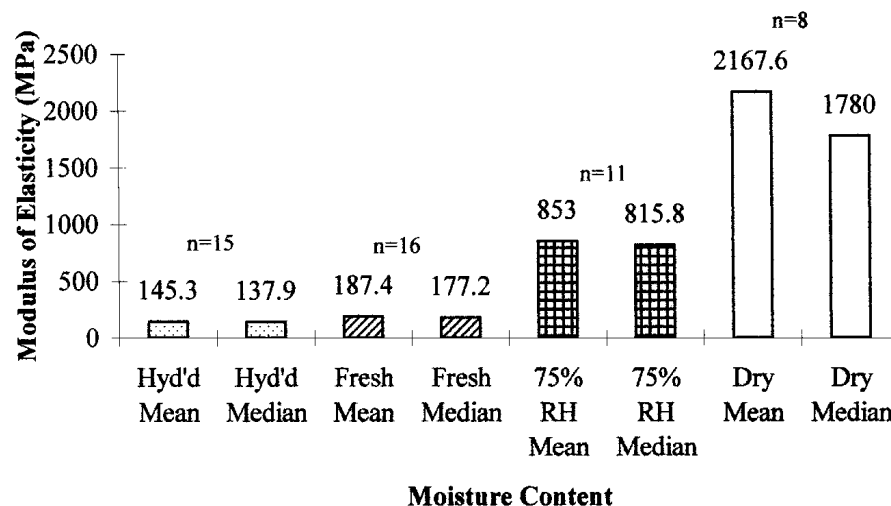


Imagen 12. Módulo elástico según la humedad de la muestra (Modulus of elasticity: Módulo de elasticidad, Moisture Content: Contenido de humedad, Mean: promedio, Median: mediana). (S. N. COLLINS, 1998)

Se puede observar como el módulo de un casco equino puede variar entre 145.3 MPa promedio y 2167.6 MPa promedio. Esto es un incremento de 1391% en el módulo de una muestra hidratada a una muestra deshidratada.

4. Propuesta de trabajo

La propuesta de trabajo es decidida de manera conjunta por el grupo de trabajo. A continuación se presenta de manera detallada la manera en la que se trabaja.

4.1. Metodología

Referirse a la página 13.

4.2. Cronograma y plan de trabajo

Con el fin de llevar un plan de trabajo ordenado e ir cumpliendo con los objetivos y tareas establecidas en la formulación del proyecto, se establece el cronograma que se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Cronograma de actividades.

Nombre de tarea	Comienzo	Fin
Conformación grupo de trabajo Heller	Semana 0	Semana 0
Revisión del estado del arte	Semana 0	Semana 8
Análisis/Estudio del proceso	Semana 0	Semana 8
Análisis del efecto del afilado	Semana 9	Semana 14
Búsqueda de material sustituto para simular el corte	Semana 12	Semana 20
Análisis geométrico dimensional	Semana 12	Semana 24
Análisis de las condiciones de corte (forma, ángulos, radios, filo, fuerzas de corte)	Semana 12	Semana 24
Reunión/Entrega informes/avances	Semana 14	Semana 14
Análisis del proceso de formado	Semana 14	Semana 24
Búsqueda de la geometría de diente óptima y sus condiciones de producción	Semana 14	Semana 34
Redacción documento final tesis de maestría	Semana 28	Semana 34

4.3. Descripción de cada tarea del cronograma

A continuación se presenta una descripción resumida de cada tarea del cronograma

1. **Conformación grupo de trabajo Heller-EAFIT:** socializar el grupo de trabajo y los involucrados de ambas partes en el proyecto para así poder empezar a tener contacto y dar comienzo al proyecto. Por parte de Heller se incluyó en el grupo de trabajo al departamento de proyectos, el departamento de calidad y el departamento de producción.
2. **Revisión del estado del arte:** verificación en bases de datos y de proyectos anteriores de información relevante y de ayuda para este nuevo proyecto. Búsqueda en libros sobre teoría de corte y variables más importantes en el proceso de corte.
3. **Análisis/Estudio del proceso:** aprendizaje sobre la fabricación de las escofinas y sus procesos. Estudio sobre material y transformación de este en cada proceso. Salidas de campo a ver la herramienta en su uso normal (herrado de caballos)
4. **Análisis del efecto del afilado:** se realiza estudio sobre las herramientas después del proceso de afilado. Búsqueda en bases de datos acerca de información de afilado y su influencia en el desempeño de las herramientas.
5. **Búsqueda de material sustituto para simular el corte:** Actualmente se utiliza un mortero (concreto y arena) para realizar pruebas de desgaste, la idea es substituir este material por uno que simule las condiciones del casco equino. Se busca este material según estudios anteriores realizados por Heller y EAFIT, búsqueda en las bases de datos y ensayos realizados, para poder así realizar pruebas de laboratorio reproducibles.
6. **Análisis geométrico dimensional:** según lo encontrado en la literatura se determinan los parámetros más importantes en la geometría de la herramienta y su influencia sobre el proceso de corte. Para estos

parámetros se busca la forma de medirlos y controlarlos e incorporar estas mediciones en el proceso de control de calidad.

- 7. Análisis de las condiciones de corte (forma, ángulos, radios, filo, fuerzas de corte).**
- 8. Reunión/Entrega informes/avances:** reunión para socializar los avances y estado actual del proyecto.
- 9. Análisis del proceso de formado:** revisión del proceso de formado, estudio sobre la forma de realizar modificaciones en la máquina y punzón para así lograr los cambios deseados sobre los parámetros más importantes en la geometría final del diente.
- 10. Búsqueda de la geometría de diente óptima y sus condiciones de producción:** se realiza un diseño de experimentos modificando los parámetros relevantes en las máquinas para lograr obtener las modificaciones deseadas sobre el diente y luego de realizar ensayos de desempeño tomar la determinación acerca de cuál es la geometría óptima.
- 11. Redacción documento final tesis de maestría.**

5. Desarrollo e implementación

A continuación se presentan los resultados y hallazgos de cada una de las etapas del proyecto.

5.1. Análisis/Estudio del proceso

En esta etapa del proyecto se toma la decisión de caracterizar y conocer a fondo la escofina y los cambios que en esta ocurren mediante el proceso de fabricación.

El proceso de fabricación de la escofina es un proceso poco convencional con maquinaria poco convencional. El proceso se realiza a grandes rasgos (los que son relevantes para el proyecto) de la siguiente manera:

1. La materia prima para las escofinas proviene de un fleje que es enderezado debido a que viene enrollado, y luego se troquela para darle la forma final.
2. Primero se realiza el formado del lado lima para luego montar la escofina para el proceso de conformado del diente, este proceso se realiza con máquinas que tienen diseños que datan de 1930 y 1940. Son máquinas muy rígidas pero con muchos años de trabajo, esto causa una variabilidad en el conformado del diente entre una máquina y otra.
3. Se realiza un tratamiento térmico con un horno de baño de bismuto fundido.
4. Se realiza un afilado mediante un proceso de sand blasting (chorro de arena, agua y vapor de agua a alta presión)

Se realizan metalografías después de conformado el diente y antes del tratamiento térmico, después del tratamiento térmico y después del afilado para analizar los cambios en el interior de la herramienta. Se realizan análisis de espectrometría de emisión óptica para determinar la composición química y las posibles variaciones de esta durante los procesos de tratamiento térmico y otros procesos de horno a los que es sometida la escofina.

Se realizan análisis de microdureza que sirven para verificar las propiedades y determinar si el proceso de templado está cumpliendo con su objetivo.

Y por último se llevan varias muestras para analizar en el microscopio de barrido electrónico (SEM – Scanning Electron Microscope) para poder observar

con mayor magnificación el filo de la herramienta y determinar cómo se está desgastando.

A continuación se exponen los resultados y las imágenes tomadas de estos análisis:

5.1.1 Metalografías

Para los análisis metalográficos se toman secciones transversales (Imagen 14) y longitudinales (Imagen 13) de los dientes para analizar la posible orientación de granos de una fase u otra y de propiedades del material. En los cortes longitudinales se ve el diente de perfil, y los cortes transversales se ve el diente en el sentido de corte de la herramienta.

Se toman muestras de ambos tipos de aceros utilizados para fabricar escofinas (Acero 1050 y acero 1070).

Las muestras se numeran de la siguiente manera:

- A1-1: Acero 1070 como viene del fleje y con formado del diente
- A1-2: Acero 1070 después de temple sin afilado
- A1-3: Acero 1070 después de temple y afilado
- A1-4: Acero 1050 como viene del fleje y con formado del diente
- A1-5: Acero 1050 después del temple sin afilado
- A1-6: Acero 1050 después del temple y afilado
- A1-7: Acero desconocido (Pavonado) desgastado natural
- A1-8: Acero desconocido desgastado por tribómetro (Arena y cemento)

Los cortes se realizan en una cortadora refrigerada por agua y con disco de diamante (debido a la dureza de varias muestras que están templadas) para evitar al máximo cualquier recalentamiento en la muestra y posibles cambios en la microestructura. Para esto se hizo el corte con la refrigeración encendida y a una baja velocidad de avance del corte.

A continuación las imágenes 13 y 14 para expresar mejor la idea de los cortes.



Imagen 13. Fotografía de la probeta cortada de manera longitudinal para análisis metalográfico y de microdureza.



Imagen 14. Fotografía de la probeta cortada de manera transversal para análisis metalográfico y de microdureza.

El proceso de pulido se realiza en los laboratorios de materiales de la universidad EAFIT ubicados en el bloque 19, piso 3.

Una vez se realizan los cortes, se preparan las muestras respectivas para cada proceso de análisis. Para la metalografía y microdureza se deben sumergir los cortes o muestras en baquelita, esta es curada a 150° por tres minutos. Se pule la muestra con lijas de agua de grano 100 hasta 600 incrementando de a 100 cada vez. Luego se emplean paños con suspensión de 5 micras y de 0.3 micras de alúmina para dar el pulido final. Por último se realiza un ataque de nital al 2% por varios segundos hasta observar que cambia la superficie para así revelar la microestructura.

La Imagen 15 es la metalografía realizada a la muestra A1-1. Se observa en esta muestra una matriz de ferrita con carburos esferoidizados. Esta es la forma más blanda posible de encontrar en los aceros, se logra mediante proceso de revenido durante largo tiempo y enfriado muy lentamente para que las estructuras moleculares se acomoden de la manera más “relajada” posible.

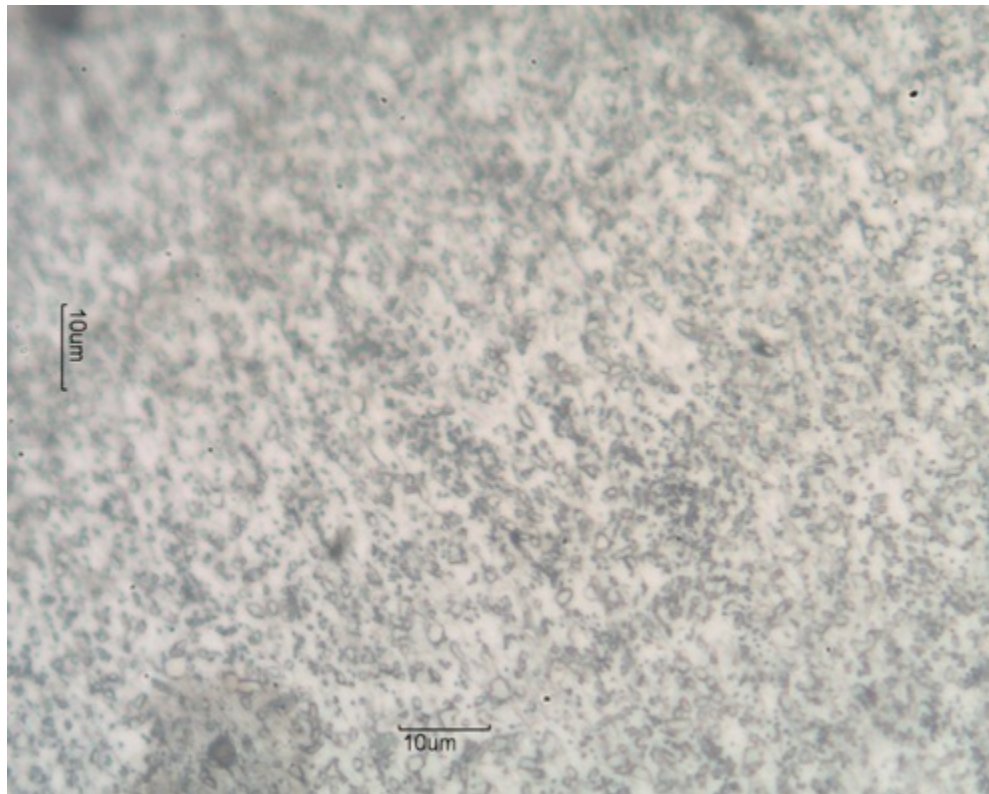


Imagen 15. Fotografía de la metalografía realizada a la muestra A1-1. Corte transversal. 500x

Esta microestructura de carburos esferoidizados en matriz de ferrita concuerda con la información suministrada por el proveedor, y por la orden de servicio de Heller que pide su material en esta presentación para facilitar el conformado de los dientes.

La muestra A1-4 presenta exactamente el mismo comportamiento que la muestra A1-1 y las muestras A1-3 y A1-6 tiene el mismo comportamiento que la A1-2.

A continuación, en la Imagen 16, se observa una metalografía de la muestra A1-2, del corte manera transversal (se toma esta imagen porque después en el proceso de afilado se pierde la capa blanca del exterior de la muestra que se forma en el proceso de endurecido, más adelante se explicará este fenómeno en los efectos del afilado).

En las imágenes 16 y 17 se puede observar la microestructura de la herramienta hacia la superficie que es la parte de interés para analizar y se observa que existe una capa blanca de aproximadamente 30 a 40 micras de espesor que cubre la superficie en ambos sentidos. También se observa que no existe ningún tipo de orientación de los granos al interior de la herramienta (después de la capa blanca) tanto tamaño y orientación de los granos no tienen orden específico. Se puede concluir que no existe una orientación de los granos en la herramienta. Más adelante se confirman los datos mediante análisis de microdurezas.

En estas mismas imágenes se puede observar que hay 3 fases. Una es martensita muy fina, la otra son granos de ferrita y los carburos. La matriz vendría siendo la martensita fina.

En la Imagen 18 se observa una fotografía a alta magnificación (1000x) de la martensita fina.

Estudios previos realizados por la Universidad Nacional para Heller confirman lo encontrado.

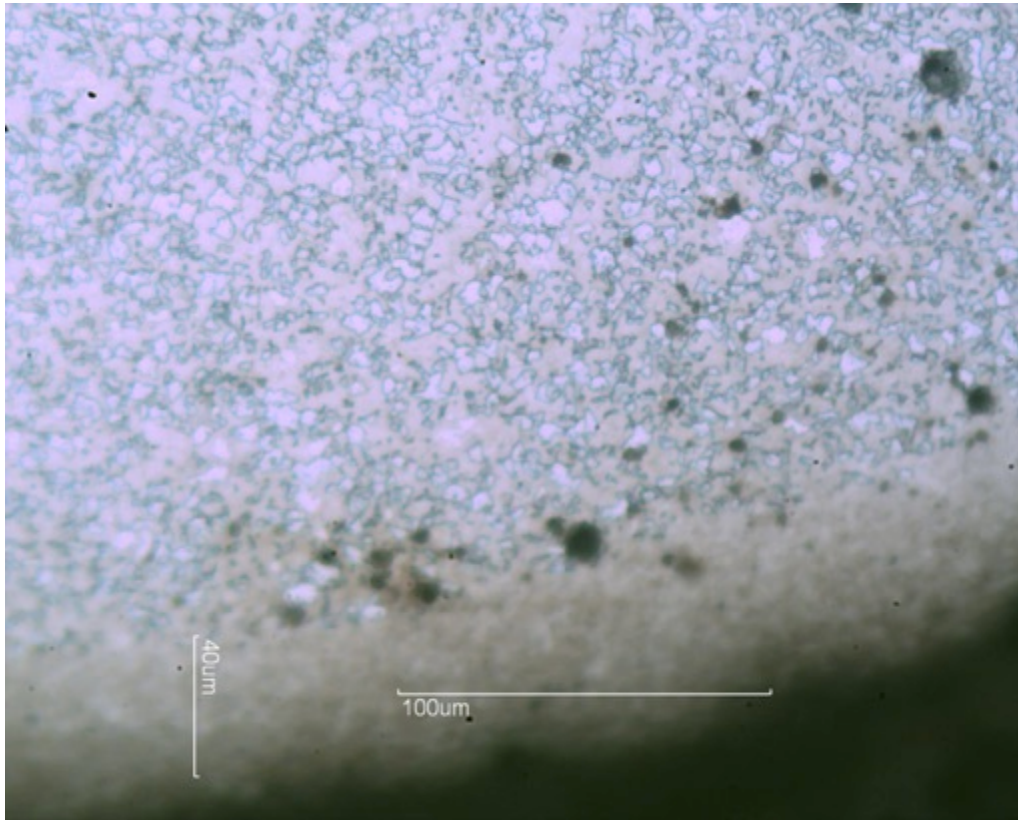


Imagen 16. Fotografía de la metalografía realizada a la muestra A1-2. Corte transversal. 200x

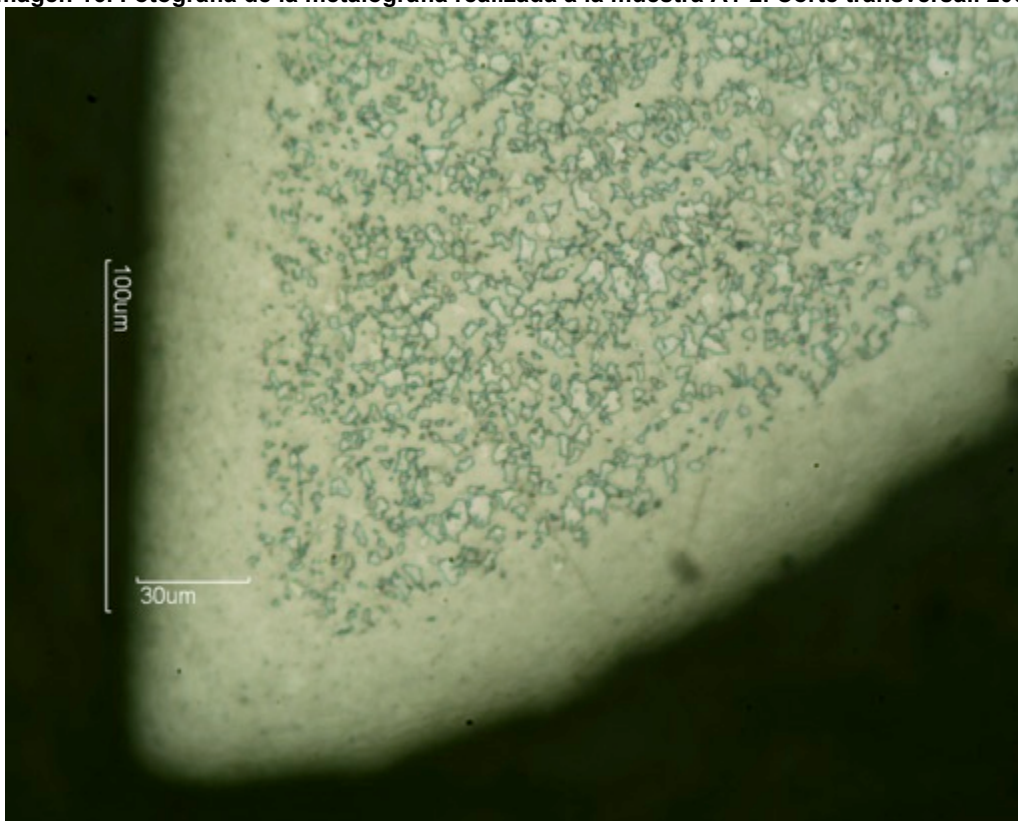


Imagen 17. Fotografía de la metalografía realizada a la muestra A1-2. Corte longitudinal. 200x

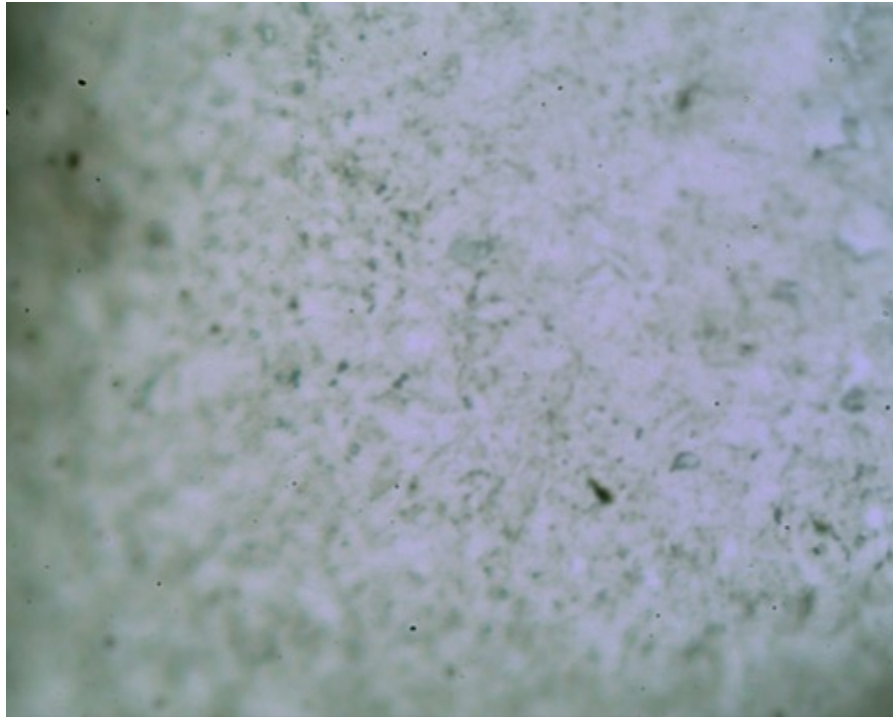


Imagen 18. Fotografía de la metalografía realizada a la muestra A1-2. Corte longitudinal. Zona cercana a la superficie, martensita muy fina. 1000x

5.1.2 Composición química

Se realizan ensayos de composición química en el laboratorio de espectrometría en la Universidad de Antioquia.

A continuación los análisis de composición química realizados sobre las muestras antes y después del tratamiento térmico.

En la Tabla 2 se tienen los resultados para las muestras A1-1 y A1-3. La muestra A1-3 no tiene el porcentaje de carbono necesario para un acero 1070, parece ser un 1050. Se repite el ensayo sobre otro pedazo de la herramienta de muestra A1-3 para verificar y se obtiene el mismo resultado. Se realiza la averiguación, y debido a una confusión en la entrega de muestras por parte de Heller, la muestra A1-3 es de acero 1050 y no de 1070 como se había creído.

En la Tabla 3 están los resultados de la composición química realizada a las muestras A1-4 y A1-6, muestras de acero 1050, antes y después del tratamiento térmico. Se observa que no existe ningún cambio apreciable en la

composición química del material. Los resultados obtenidos en este ensayo concuerdan con la ficha técnica entregada por el proveedor de los aceros.

Tabla 2. Tabla de resultados para el análisis de composición química de las muestras A1-1 y A1-3.

Consecutivo No. 231013 – 69			Muestra: A1 1						
Elemento	Carbono (C)	Silicio (Si)	Manganeso (Mn)	Azufre (S)	Fósforo (P)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdeno (Mo)	Aluminio (Al)
%p/p	0.670	0.230	0.675	0.002	0.010	0.022	0.183	0.003	0.041
Elemento	Cobre (Cu)	Plomo (Pb)	Estaño (Sn)	Titanio (Ti)	Vanadio (V)	Antimonio (Sb)	Zirconio (Zr)	Calcio (Ca)
%p/p	0.023	0.000	0.001	0.004	0.004	0.000	0.000	0.001

Consecutivo No. 231013 – 70			Muestra: A1 3						
Elemento	Carbono (C)	Silicio (Si)	Manganeso (Mn)	Azufre (S)	Fósforo (P)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdeno (Mo)	Aluminio (Al)
%p/p	0.494	0.178	0.596	0.003	0.007	0.057	0.087	0.021	0.018
Elemento	Cobre (Cu)	Plomo (Pb)	Estaño (Sn)	Titanio (Ti)	Vanadio (V)	Antimonio (Sb)	Zirconio (Zr)	Calcio (Ca)
%p/p	0.137	0.000	0.009	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000

Tabla 3. Tabla de resultados para el análisis de composición química de las muestras A1-4 y A1-6.

Consecutivo No. 231013 – 71			Muestra: A1 4						
Elemento	Carbono (C)	Silicio (Si)	Manganeso (Mn)	Azufre (S)	Fósforo (P)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdeno (Mo)	Aluminio (Al)
%p/p	0.471	0.197	0.683	0.004	0.012	0.019	0.026	0.005	0.032
Elemento	Cobre (Cu)	Plomo (Pb)	Estaño (Sn)	Titanio (Ti)	Vanadio (V)	Antimonio (Sb)	Zirconio (Zr)	Calcio (Ca)
%p/p	0.019	0.000	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000

Consecutivo No. 231013 – 72			Muestra: A1 6						
Elemento	Carbono (C)	Silicio (Si)	Manganeso (Mn)	Azufre (S)	Fósforo (P)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdeno (Mo)	Aluminio (Al)
%p/p	0.465	0.201	0.689	0.004	0.012	0.019	0.030	0.006	0.033
Elemento	Cobre (Cu)	Plomo (Pb)	Estaño (Sn)	Titanio (Ti)	Vanadio (V)	Antimonio (Sb)	Zirconio (Zr)	Calcio (Ca)
%p/p	0.019	0.001	0.001	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000

5.1.3 Ensayos de microdureza

Teniendo ya verificados los resultados de composición química y de metalografías se procede a realizar ensayos de microdurezas para verificar las propiedades de las fases presentes en la escofina, antes y después del tratamiento térmico y afilado.

Los ensayos de microdureza se realizan en el microdurómetro de la universidad EAFIT, perteneciente a el laboratorio de materiales. Los ensayos se realizan a una carga de 200 gramos constante para todos los ensayos con el fin de poder comparar los resultados debido a que las pruebas de calidad en Heller se realizan con esta misma carga, las unidades se dan en HV0.2

Se realizan ensayos en ambas muestras (longitudinal y transversal) de los cortes realizados para las metalografías (las probetas para microdureza son las mismas usadas para metalografía), esto con la finalidad de verificar que no exista una orientación en las propiedades mecánicas del material y para verificar las microestructuras presentes en la escofina. En las imágenes 19 y 20 se presentan imágenes de los cortes longitudinales y transversales para las

muestras de microdureza. Y con la marcación de las respectivas mediciones realizadas.

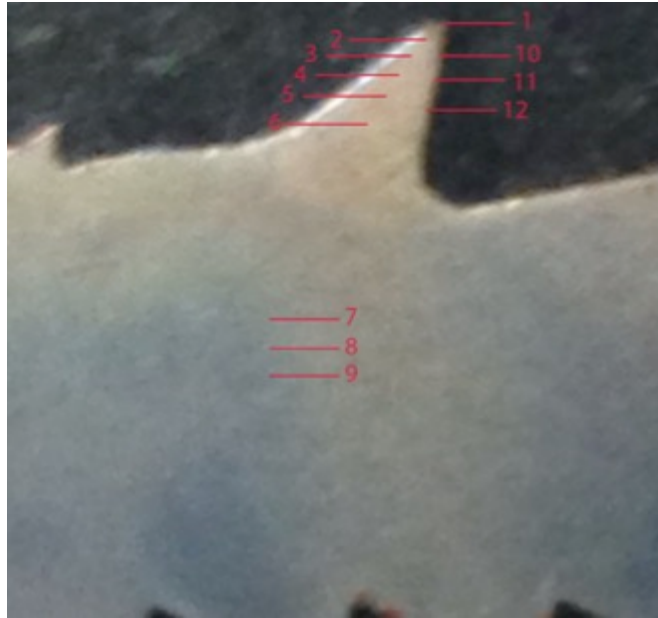


Imagen 19. Corte longitudinal para metalografía y para microdureza, con las respectivas mediciones luego enunciadas en la tabla de resultados.

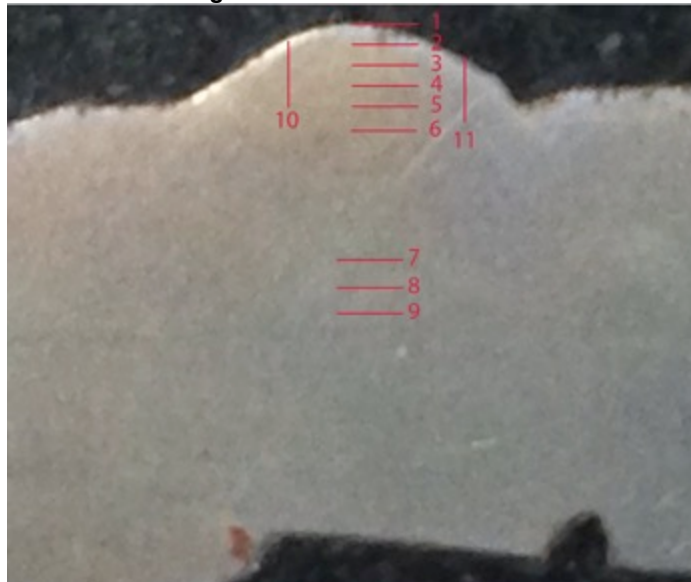


Imagen 20. Corte transversal para metalografía y para microdureza, con las respectivas mediciones luego enunciadas en la tabla de resultados.

Se determina que las mediciones se distribuyen de la siguiente manera:

Superficie: Mediciones realizadas en la parte externa de la muestra, donde existe una sola fase de martensita muy fina.

Diente: estas mediciones fueron realizadas al interior del diente.

Interior: el medio de la escofina.

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos de las mediciones de microdureza, estas están dadas en HV0.2.

Tabla 4. Resultados de ensayos de microdureza para todas las muestras en ambas direcciones.

Punto	Valor de dureza (HV0.2)											Ubicación
	A1-1		A1-2		A1-3		A1-4	A1-5		A1-6		
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	
1	275.5	255.8	739.5	771.9	747.8	412.9	259.6	781.5	757.6	874.4	552.7	Superficie
2	255.8	257.7	476.8	429.15	422	462.9	262.8	634.3	584.5	676.5	563.7	Interior Diente
3	248	257	437.4	504.1	515.4	450.6	286.7	612.9	572.4	656.4	702.6	Interior Diente
4	227.3	274.2	410.6	495.8	475.1	455.5	269.9	612.4	563.3	675	567.7	Interior Diente
5			443	482.8	436.3	427.9	252	547.2	741.1	680.8	492	Interior Diente
6			433.2		420.7	422.6		626.8	775.1	600.8		Interior Diente
7			294	383.2	323.2		198.1	303.2		367.5		Interior
8			317.1	374.4	295.7		192.4	300.4		311.9		Interior
9			373.5	359.7	299.1		182.1	303.1		317.6		Interior
10			812.5	871.9	735.2							Superficie
11				807.6	748.8							Superficie
12					725.2							Superficie

Se realizan mediciones en la superficie de la muestra (capa mencionada de martensita muy fina) y luego se realizan mediciones avanzando hacia el interior del diente para determinar si existe una caída en la dureza hacia el interior. También se realizan mediciones en el medio de la escofina para observar si el tratamiento térmico penetra hasta el centro de la herramienta.

Las mediciones cerca de la superficie dependen de las condiciones de calidad en el pulido de la muestra. Suele suceder, que los bordes de la muestra, quedan redondeados donde hace contacto la muestra con la baquelita quedando inclinada. También, las muestras deben conservar una distancia de la superficie para que la medición se pueda realizar correctamente, y en varios casos, la capa superficial no era lo suficientemente gruesa para que la medición fuera correcta. En la Imagen 21, se observa un par de intentos de medición sobre una de las muestras, se observa como la marca del indentador está deslizada debido a la inclinación o a la proximidad a la superficie. Debido a esto no se pudieron realizar todas las mediciones cerca de la superficie para las muestras que presentaban la capa endurecida. Para las muestras A1-1 y A1-4, como no han sido tratadas térmicamente para el endurecido, no presentan la capa endurecida y no se les realiza mediciones cerca a la superficie, y para las muestras transversales después de ser afiladas (A1-3 y A1-6), la capa

superficial endurecida desaparece debido al afilado, haciendo innecesario realizar mediciones superficiales.

No se realizan todas las mediciones al interior de la herramienta debido a que esta zona no afecta el desempeño de la escofina y de las mediciones que se realizaron, los resultados concuerdan con los obtenidos por el departamento de calidad en Heller. En la Imagen 22 se puede observar los estándares de dureza que maneja Heller para escofinas endurecidas.

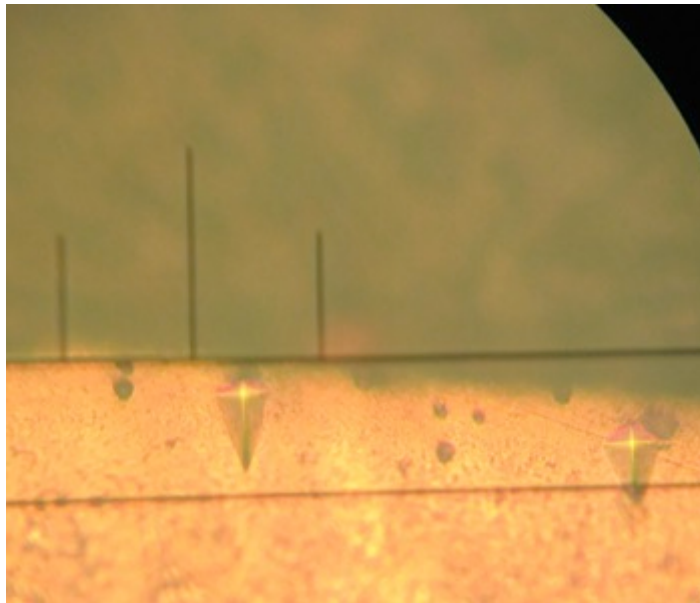


Imagen 21. Imagen de un intento de medición cerca de la superficie.

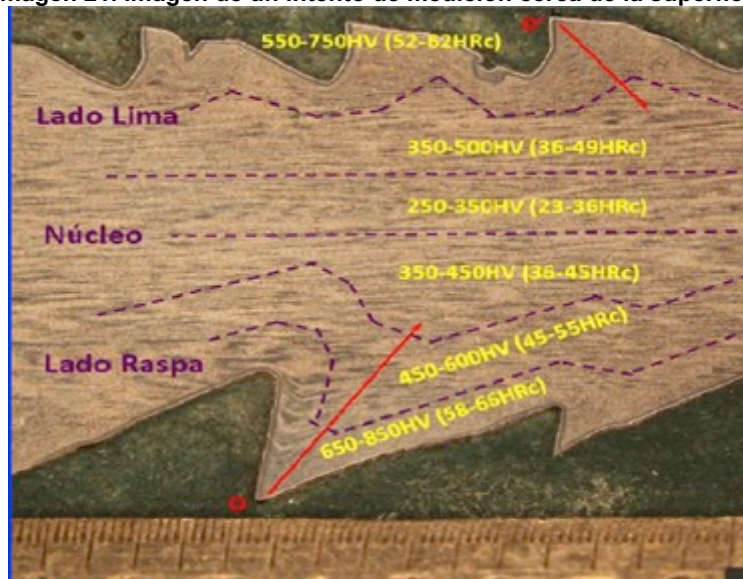


Imagen 22. Imagen con las especificaciones utilizadas en Heller para valores de dureza HV.

Para describir mejor el comportamiento de la dureza se grafican los resultados obtenidos para observar algún tipo de tendencia. Las gráficas se presentan en la Imagen 23.

Se puede observar en las gráficas, para las muestras A1-2, A1-3, A1-5 y A1-6, que los perfiles de dureza no caen, se mantienen constantes a través de la altura del diente, caen cuando ya se aleja mucho de la superficie y se mide el interior de la herramienta. Las muestras A1-1 y A1-4 son solo como comparativo para observar el cambio en la dureza luego del tratamiento térmico.

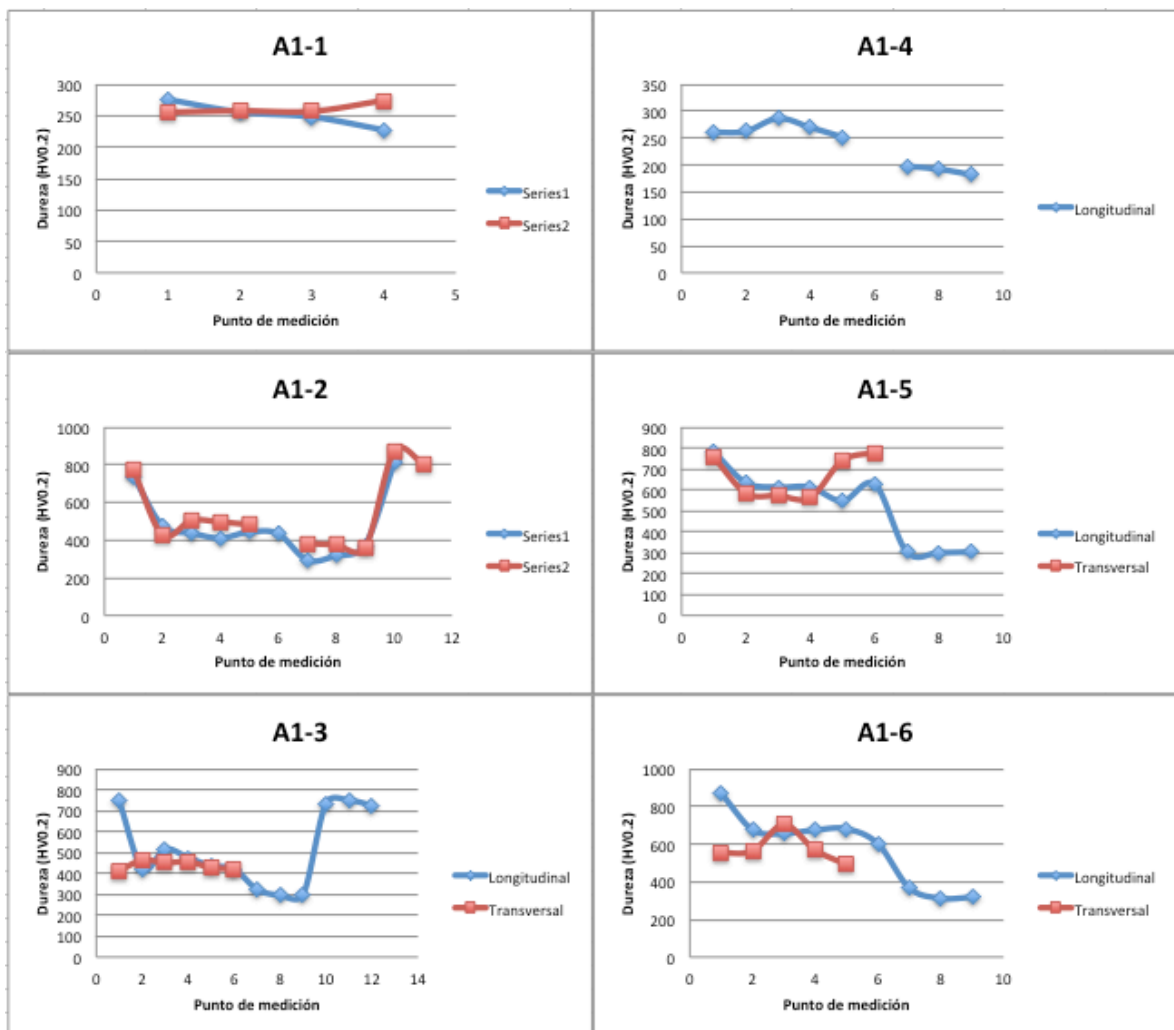


Imagen 23. Gráficas de los resultados de los ensayos de microdureza realizados.

También se observa como en las muestras de corte transversal A1-3 y A1-6, la primera medición que se realiza, cerca de la superficie, no presenta una medición de alta dureza, esto debido a que la capa de martensita desaparece por el afilado, fenómeno que se explica en mayor detalle más adelante.

Cabe mencionar que las variaciones en las mediciones, donde se observa un aumento en la dureza hacia el interior del diente, se ocasionan debido a que la medición fue realizada en un sector más rico en martensita.

Como se observa en la Imagen 24 existen zonas dentro de la herramienta más ricas en una fase que en otra. Se observan 3 mediciones al interior de la escofina donde la dureza promedio es cercana a 500HV. Se observa cómo hay dos mediciones por encima de los 700HV, esto es causado por que la mediciones fueron realizadas en zonas donde hay menor presencia de granos de ferrita y es casi en su totalidad martensita.

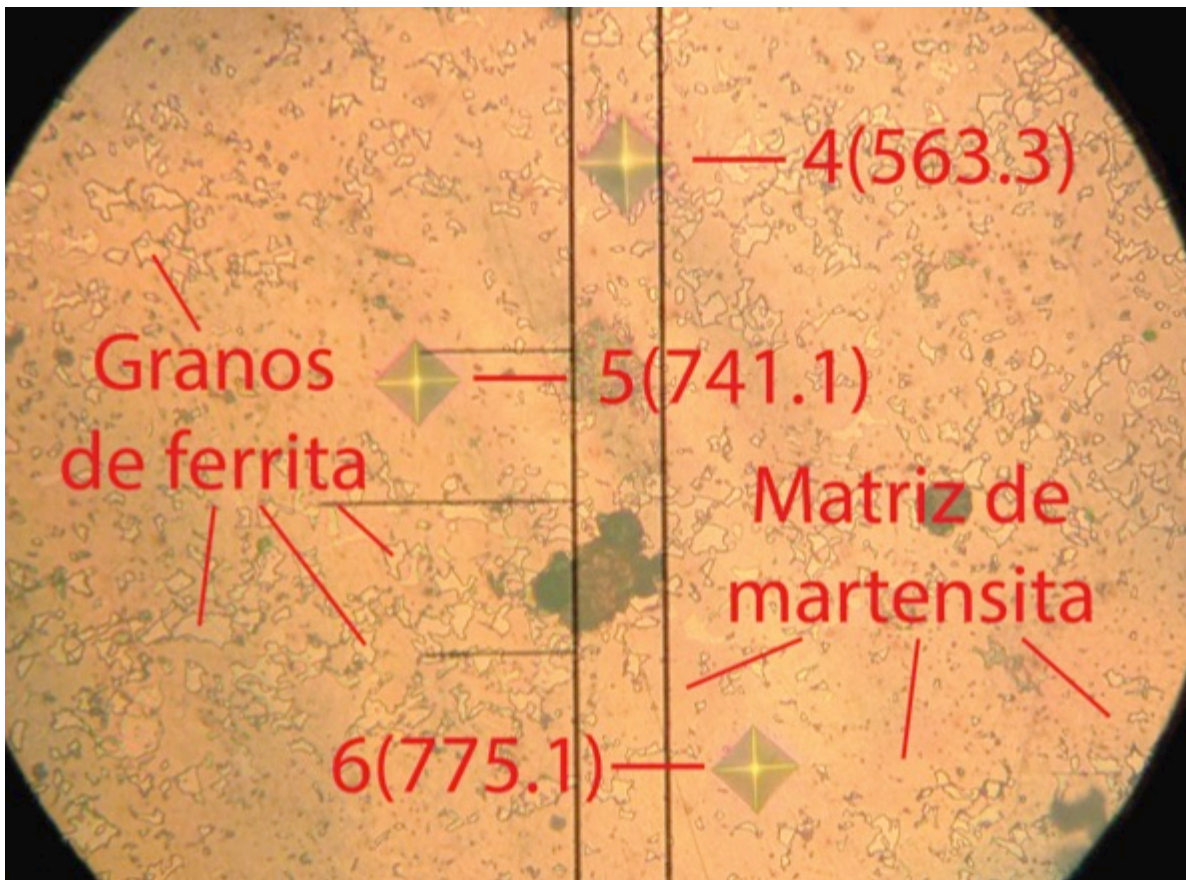


Imagen 24. Fotografía de la medición de microdureza de la muestra A1-5.

En la Tabla 5 se presentan los resultados promedio de cada una de las zonas en cada muestra.

Tabla 5. Promedio de microdureza en HV0.2 para cada zona de cada muestra.

Muestra	Ubicación	Promedio de dureza
A1-1	Superficie	-
	Diente	256.4
	Interior	-
A1-2	Superficie	800.7
	Diente	457.0
	Interior	350.3
A1-3	Superficie	739.3
	Diente	445.6
	Interior	306
A1-4	Superficie	-
	Diente	266.2
	Interior	190.9
A1-5	Superficie	769.6
	Diente	627
	Interior	302.2
A1-6	Superficie	874.4
	Diente	616.8
	Interior	332.3

Por los resultados que se presentan podemos concluir que las zonas son muy similares entre sí a pesar de cambiar el material y de dirección de la toma de muestras. Esto, y las metalografías, permiten concluir que no existe ningún tipo de orientación en las propiedades de las muestras.

Los valores de superficie para la muestra A1-1 y A1-4 no se presentan debido a que el material no ha sido endurecido como se explica previamente. La muestra A1-4, la cual posee la menor dureza en su interior es debido a que no se le realiza tratamiento térmico para endurecido.

Todos los valores están dentro del rango de especificaciones que utiliza Heller.

5.1.4 Análisis del mecanismo de desgaste

Para determinar el mecanismo de desgaste se toman dos escofinas más adicionales a las que ya se tienen de muestra. Se denominan A1-7 para una escofina desgastada en su uso normal, herrando caballos y A1-8 para una

escofina desgastada mediante una prueba de tribómetro convencional, prueba que será reemplazada por una prueba en un tribómetro digital.

Esta prueba con el tribómetro convencional que posee la empresa se realiza con una probeta hecha de un tubo de PVC, relleno de arena y concreto. Se incluyó esta muestra para comparar los resultados en las imágenes y determinar si esta prueba sí es representativa debido a la naturaleza abrasiva del concreto y la arena, en comparación con el casco de los caballos.

Se toman fotografías de las muestras A1-1, A1-2 y A1-3 para observar la evolución del filo y los cambios que puede ir sufriendo el diente mediante el proceso de desgaste.

En la Imagen 25 se tiene la muestra A1-2 a la izquierda y A1-3 a la derecha. Como se menciona anteriormente la A1-2 es sin afilar y la A1-3 es afilada. Se puede observar el cambio que hay en el filo, donde este se hace más parejo y da la apariencia de volverse más agudo, es decir, se pierde el redondeo del filo, lo que significa que queda más afilada.

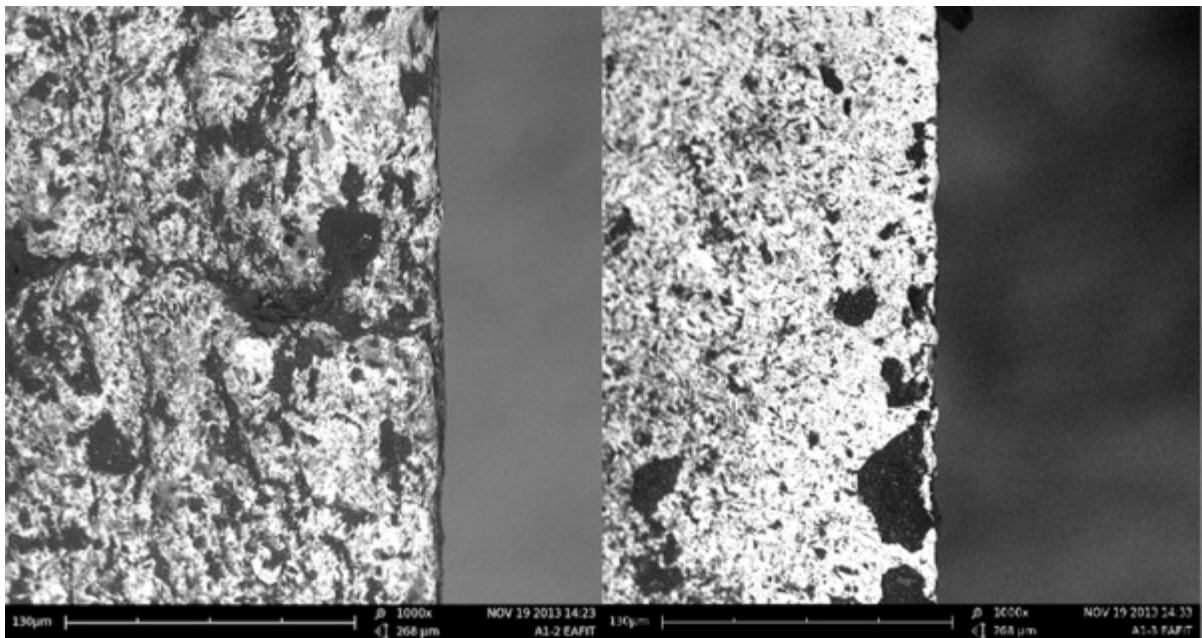


Imagen 25. Muestras A1-2 (izquierda) y A1-3 (derecha), antes y después del afilado.

En la Imagen 26 e Imagen 27, se observan las muestras A1-7 y A1-8, respectivamente. Para la A1-7 se observa una muestra que ha sido trabajada en condiciones normales (herrado de caballos por un usuario común), se

observa cómo se producen imperfecciones en el filo, se ven desprendimientos de material debido a la naturaleza abrasiva del proceso que afectan el desempeño de la escofina. Para la muestra A1-8 se observa el mismo comportamiento que para la muestra A1-7, se pueden observar que las fracturas y desprendimientos en el filo son más grandes pero similares.

Analizando más al detalle el proceso de herrado, se observa que existen remanentes de arena, clavos y otros componentes en el casco del caballo, estos afectan el filo de la herramienta puesto a que la arena es un material particulado de alta dureza y pueden haber remanentes de clavos, causando así daños y desprendimientos en el filo de los dientes de la escofina.

Se concluye que el mecanismo de desgaste para ambos casos es de desgaste por abrasión, el cual es cuando se presentan microcortes, fatiga o fracturas en el material de la herramienta debido a las asperezas o dureza del material que está siendo cortado. Esto es contrario a los planteamientos iniciales en los que se creía que era un posible desgaste por adhesión debido a que el material del casco equino no es abrasivo.

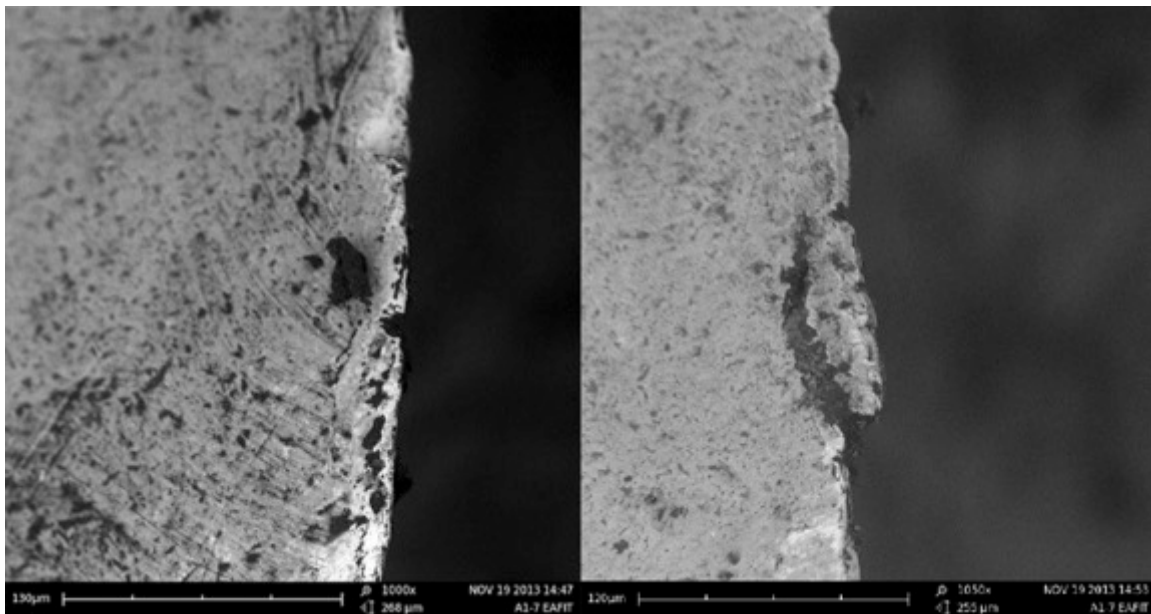


Imagen 26. Imágenes de la muestra A1-7.

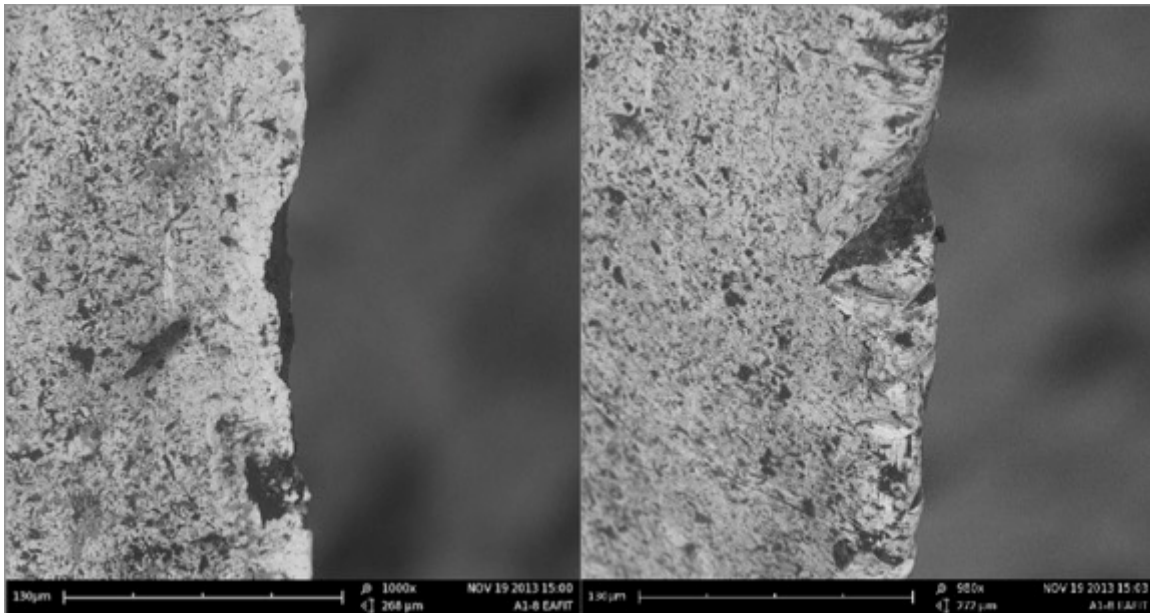


Imagen 27. Imágenes de la muestra A1-8.

5.2. Análisis del efecto del afilado

El filo se entiende como la facilidad de corte de la herramienta, entre más afilado más fácil corta y entre menos afilado, más difícil será el corte. También se menciona que, en términos cuantificables y más técnicos, el filo se puede traducir como el radio que posee la herramienta en el “filo” o en el borde que entra en contacto con el material a cortar.

El proceso de afilado de las escofinas se hace mediante un “sandblasting”. Un chorro de arena con vapor a presión que, mediante un proceso abrasivo, se remueve material para darle menor radio al diente.

A continuación se presentan las Imagen 28 e Imagen 29, en donde se observa un diente antes de afilar y después de afilar respectivamente para observar el cambio.

Se mide el radio en el filo y como se puede observar, el radio del diente afilado es mucho menor que el diente sin afilar. El radio se reduce casi a la sexta parte, quedando de 5.3 micras versus 31.5 antes de afilar.

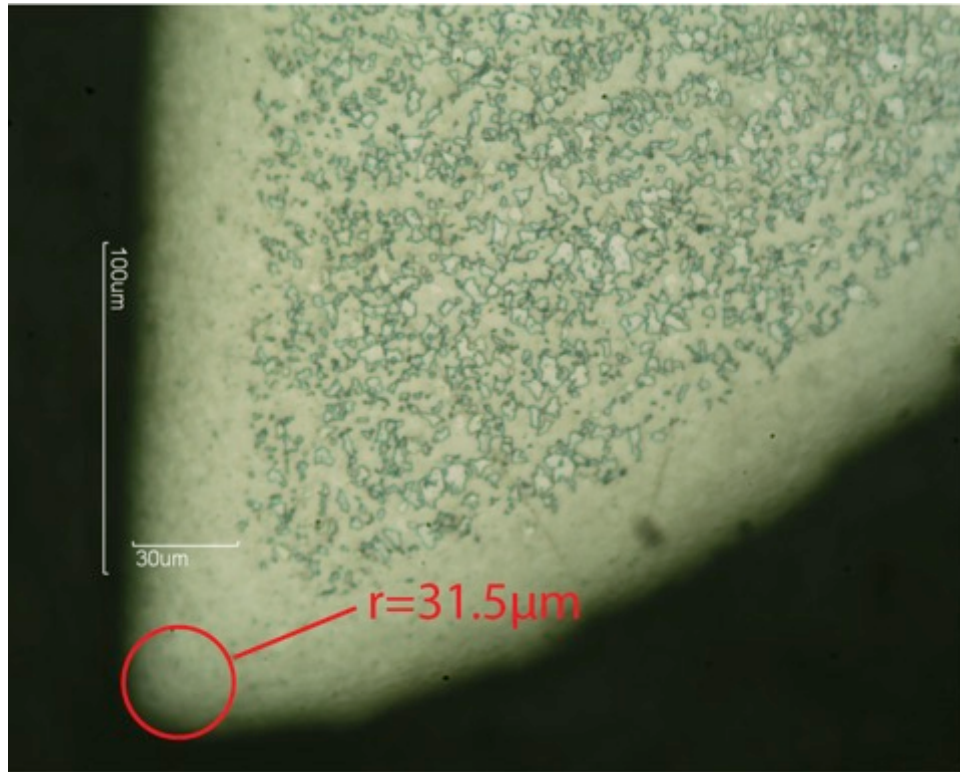


Imagen 28. Imagen de un diente sin afilar a 200x de magnificación.

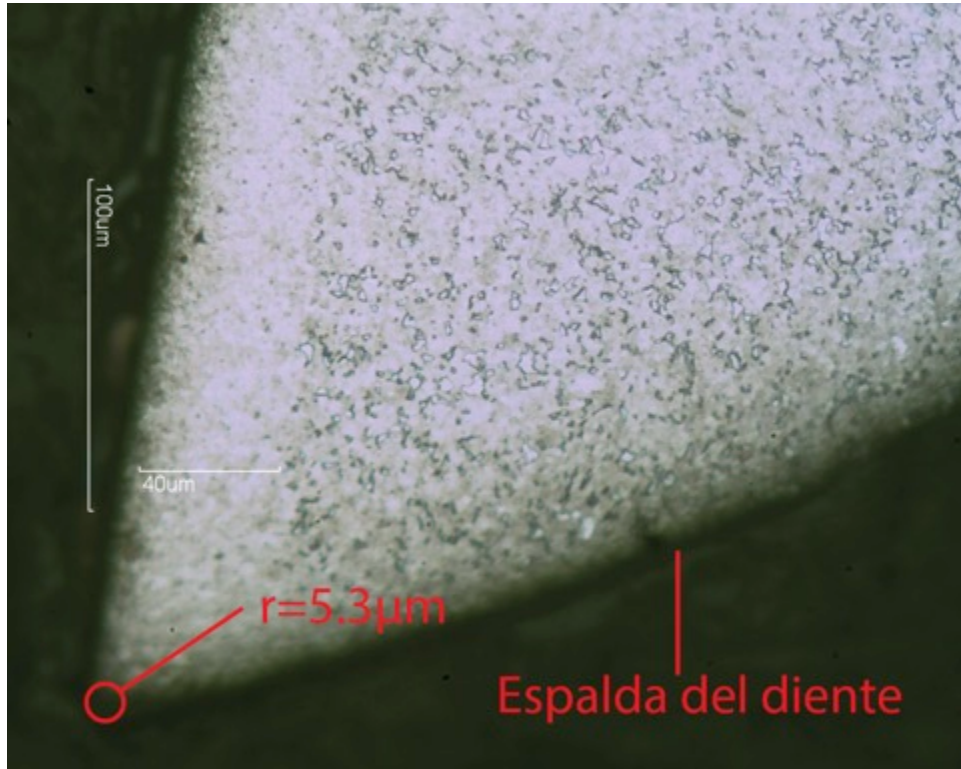


Imagen 29. Imagen de un diente después de afilar a 200x de magnificación.

Lo primero que se percibe es que la capa exterior del diente, que se definió en los análisis de metalografía que era una martensita muy fina y tiene alta dureza, desaparece luego del afilado. Esto se debe a la naturaleza abrasiva del proceso. El chorro de vapor y arena golpea el diente en la “espalda” y remueve materia. En la Imagen 30 las flechas amarillas representan la dirección en la cual golpea el chorro de vapor de agua y arena al diente de la escofina durante el proceso de afilado.

Lo segundo que se puede observar es que en la punta del diente hay una reducción significativa del radio. Se mide el radio en el filo y como se puede observar, el radio del diente afilado es mucho menor que el diente sin afilar. El radio se reduce casi a la sexta parte, quedando de 5.3 micras versus 31.5 antes de afilar. Esto demuestra que el proceso de afilado es efectivo.

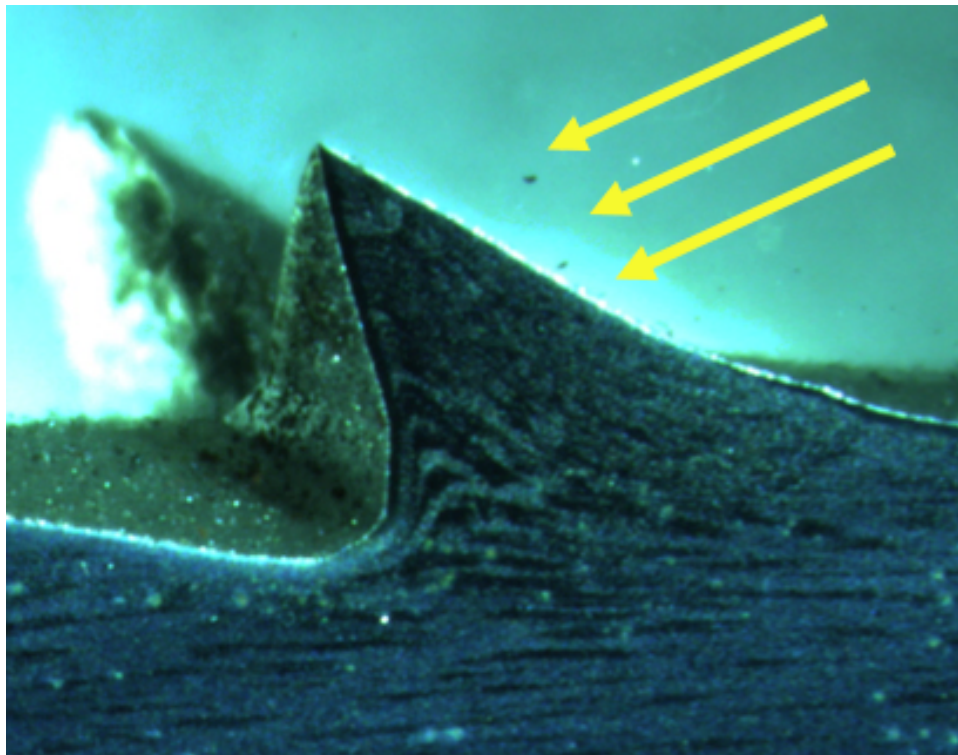


Imagen 30. Imagen del diente y la dirección en la cual golpea el chorro de arena y vapor de agua en el proceso de afilado.

Como se puede observar en la Imagen 29 la herramienta, después de ser afilada, no se afecta la capa de martensita al interior del diente. Esta es la zona que entra en contacto durante el corte por lo tanto no importa que esta capa en la espalda del diente desaparezca.

Como se expone en el capítulo 3 (estado del arte) existe, según la literatura, un afilado óptimo, es decir un radio en el filo que prolonga la vida de la herramienta. Esto se debe a que una herramienta muy afilada poseerá un radio muy pequeño y esto ocasionaría que la herramienta pueda partirse en el filo con mayor facilidad afectando su desempeño. Y un bajo afilado crearía fuerzas de corte muy altas y esfuerzos muy grandes sobre el filo de la herramienta comprometiendo también su integridad y su desempeño. La única manera según la literatura (Ashtakov, 2010) para determinar este radio óptimo para el filo es de manera experimental.

5.3. Búsqueda de material sustituto

Como fue descrito en el capítulo 3, en el estado del arte acerca del material a cortar, este es un material difícil de caracterizar debido a la variabilidad en propiedades según el entorno.

Este comportamiento hace difícil definir un valor de comparación para escoger un material que se asemeje al casco equino.

La compañía “hermana” de Heller International, Emcoclavos S.A. que se dedica a fabricar clavos para el herrado, realizó un estudio particular asociándose con una universidad en Bogotá para definir un material sobre el cual pudieran realizar pruebas. Determinaron que el material que debían usar es un termoelastómero producido por la compañía Dupont ® llamado Hytrel ® 5556.

Con el fin de verificar, se realizan pruebas sobre este material y se contrasta con la ficha técnica y los valores de la literatura acerca de las propiedades del casco equino. A continuación se encuentran las siguientes tablas con los valores encontrados en esta verificación.

Se realizan pruebas al material Hytrel 556 de densidad tomando medidas de las dimensiones y dividiendo por el peso. Se puede observar en la Tabla 6 los resultados de la densidad y dureza en 3 direcciones diferentes en la Tabla 7. Esto con el fin de verificar la consistencia de las propiedades del material sin importar su dirección.

Por último se contrastaron estos valores para dar validez al uso de este material como material sustituto para ensayos de laboratorio.

Tabla 6. Valores de volumen, peso y densidad de las muestras de Hytrel 5556 en escala de dureza: Shore D

Densidad\ Propiedad	Volumen[cm ³]	Peso [gr]	Densidad[gr/cm ³]
1	173.25	210.70	1.22
2	183.52	217.30	1.18
3	171.61	204.61	1.19
		Promedio	1.20

En la Imagen 31, Imagen 32 e Imagen 33, se observan fotografías un bloque de Hytrel 5556 como es recibido por Heller con una regla de medición para tener referencia de su tamaño.

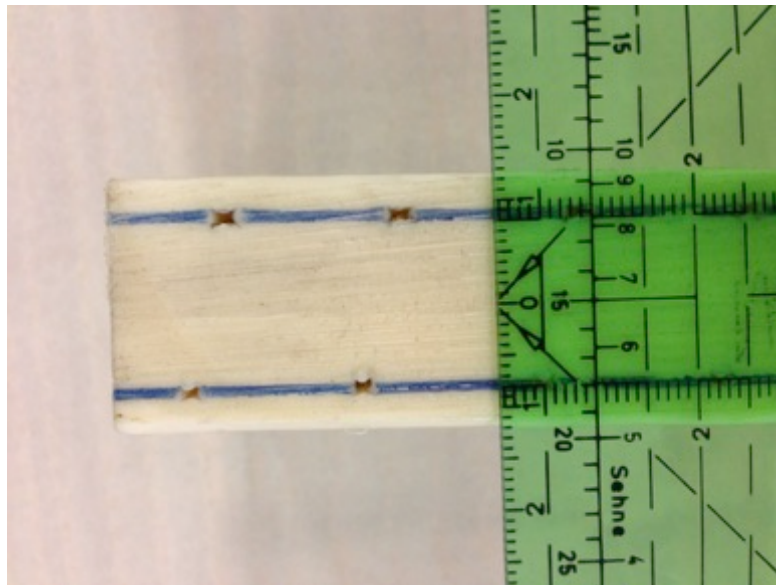


Imagen 31. Bloque de Hytrel 5556 visto con una escala de medición para aproximar la medida de espesor (1 pulgada)

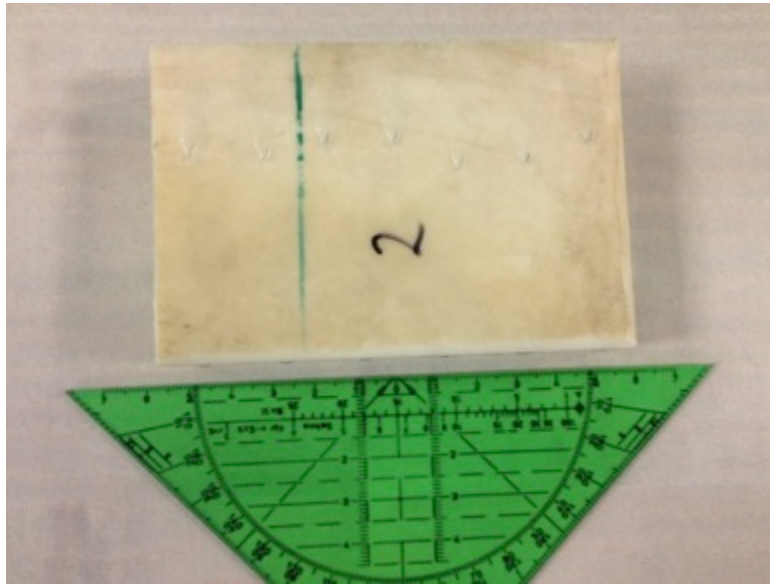


Imagen 32. Bloque de Hytrel 5556 con una escala de medición para darse una idea de la dimensión de la materia prima suministrada.

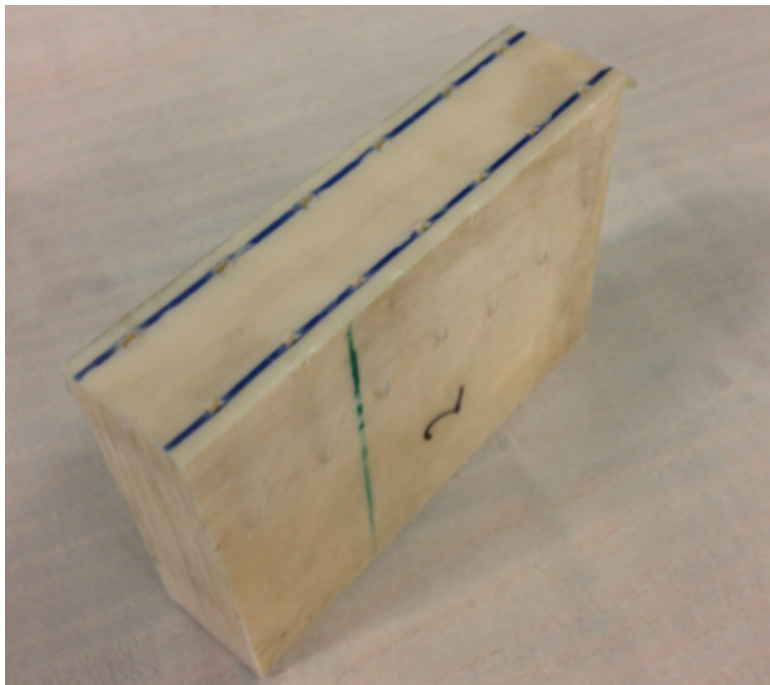


Imagen 33. Bloque de Hytrel 5556 proveído por Emcoclavos después de ellos realizar sus pruebas.

Emcoclavos realiza unas pruebas de calidad de los clavos que produce sobre este material,. Se hacen unas inserciones de clavos para verificar la calidad. Estos agujeros que quedan en el material no presentan ningún inconveniente

para las pruebas de densidad debido a que los clavos no remueven material y no modifican las dimensiones del bloque de manera que afecte la medición del volumen. Tampoco afectan las pruebas de trigología debido a el tamaño que tienen los agujeros y son constantes a través de todos los bloques lo que permite que los experimentos sean comparables unos con otros.

Tabla 7. Valores de dureza según la dirección de prueba para verificar la anisotropía del Hytrel 5556 en escala de dureza Shore D.

Dirección\ Medición	1	2	3	4	5	Promedio
1	58	58	57.5	57	57.5	57.6
2	57	56	56	56.5	56.5	56.4
3	56	58	57	56.5	57	56.9
Desviación estándar						0.60

No existe mayor diferencia entre una dirección y otra como para ser estadísticamente considerable, ni para afirmar que el material tiene mejores propiedades en un determinado sentido. Debido a esto no importa el sentido en el que se hagan las pruebas de desbaste.

Se realizan pruebas en diferentes muestras para verificar la reproducibilidad de las propiedades del material en diferentes lotes para tener la certeza de que siempre que se hagan pruebas con este material se van a tener las mismas propiedades, los resultados obtenidos en la tabla Tabla 8.

Tabla 8. Valores de dureza entre las 3 muestras escogidas aleatoriamente para verificar la reproducibilidad de sus propiedades en la dirección de remoción en escala de dureza Shore D

Muestra\ Medición	1	2	3	4	5	Promedio
1	56.5	57	57	56.5	56.5	56.7
2	57	57.5	57.5	57	57.5	57.3
3	57	58	57	57	57.5	57.3
Desviación estándar						0.35

Se encuentra poca diferencia, no es significativa estadísticamente para afirmar que sean diferentes las muestras unas de otras.

Por último, en la Tabla 9 se observan las propiedades de la ficha técnica del Hytrel 5556, de los ensayos realizados para comprobar estos valores y de los datos arrojados por la literatura (J. MC KITTRICK, 2012) (S. N. COLLINS, 1998) y por ensayos realizados en un estudio anterior por el profesor Carlos Rodríguez.

Tabla 9. Valores de la ficha técnica del Hytrel 5556, de los ensayos realizados sobre el Hytrel 5556 y sobre los valores de la literatura y ensayos hechos sobre el casco equino.

Propiedad\ Material	Ficha técnica Hytrel 5556	Ensayos Hytrel 5556	Literatura y estudios previos casco equino	Unidades
Densidad	1.19	1.2	1.22	gr/cm ³
Dureza mínima		56.5	50	Shore D
Dureza máxima		58	60	Shore D
Dureza Promedio	55	57.1	55	Shore D
Módulo Elástico	180		180-2000	MPa

En los valores se observa una consistencia entre los valores de la ficha técnica y los valores encontrados mediante ensayos, siendo un poco superiores los de los ensayos, pero sin ser una diferencia significativa. Se tiene una baja desviación (0.35) entre todos los datos de dureza tomados mediante ensayos, lo que confirma una confiabilidad en la consistencia de las propiedades del

material. Como se expresó anteriormente, las propiedades del casco varían de acuerdo al entorno al que estén sometidas. Valores normales para muestras frescas en los artículos encontrados dan aproximadamente 180 MPa en cuanto a módulo de elasticidad, pero bajo efectos de deshidratación se puede lograr hasta 2000 MPa.

Se contrasta el módulo elástico en la ficha técnica con los encontrados en varios artículos para muestras frescas y se encuentra el mismo valor de 180 MPa.

Como última prueba, el material se llevó a varios herradores para pedirles un concepto acerca de las sensaciones al cortarlo e insertarle clavos para simular el comportamiento del casco, y todos coincidieron en la similitud del material con el casco equino.

Se determina que este material cumple los requisitos para ser utilizado como un material sustituto para el casco equino en pruebas de laboratorio.

5.4. Análisis geométrico dimensional

Para realizar un análisis de la geometría actual del diente se tuvieron en cuenta varias metodologías, entre digitalización, microscopía óptica y medición a través de un dispositivo de contorno por contacto (ContouReader). El objetivo es poder determinar y llevar un control de la manera más sencilla y acertada posible.

Cada sistema y forma de medición tienen sus ventajas, desventajas y nivel de complejidad. Lo ideal es encontrar el más sencillo debido a que esta medición pasará a manos del departamento de calidad y a los operarios de la planta y se requiere que sea de la manera más sencilla y a prueba de errores.

Las pruebas iniciales con el estereoscopio que posee Heller en su departamento de calidad se ven prometedoras debido a la facilidad de operación, facilidad de montaje de la muestra para el análisis (Imagen 34), no se necesita destruir la escofina para tomar una muestra y la posibilidad de obtener el archivo de manera digital para facilidad en mediciones con mayor exactitud.

Este dispositivo funciona tomando una serie de imágenes a diferentes enfoques, y tomando el área enfocada de cada imagen para reconstruir la superficie y producir una malla poligonal (Imagen 36) y proveer una imagen completamente enfocada (Imagen 35) así haya una gran profundidad y diferencia en la altura de la muestra.

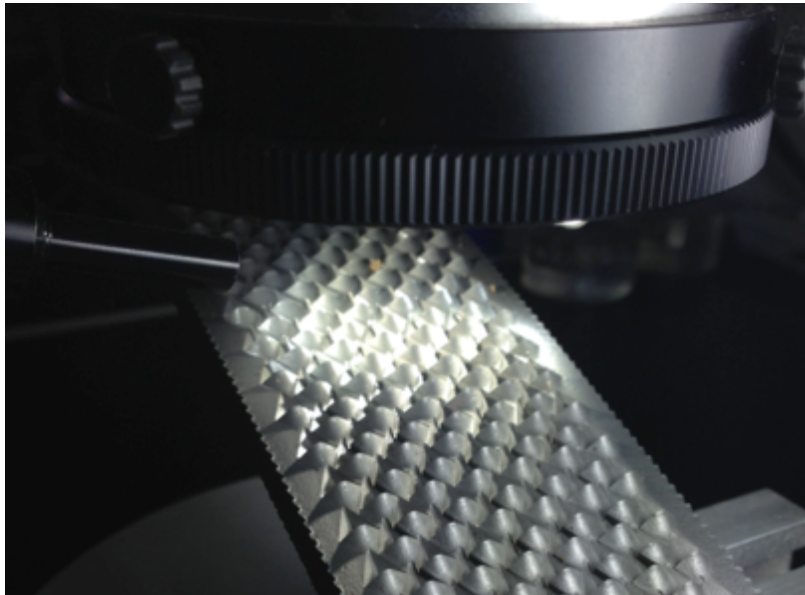


Imagen 34. Escofina montada en el estereoscopio para análisis de imágenes y digitalización.

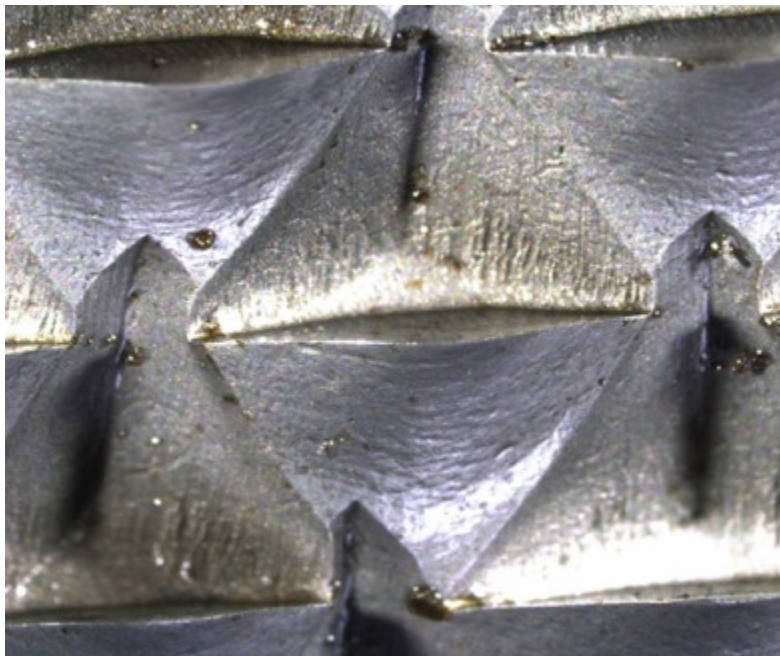


Imagen 35. Fotografía producida por el estereoscopio después del análisis de imágenes a diferentes enfoques.

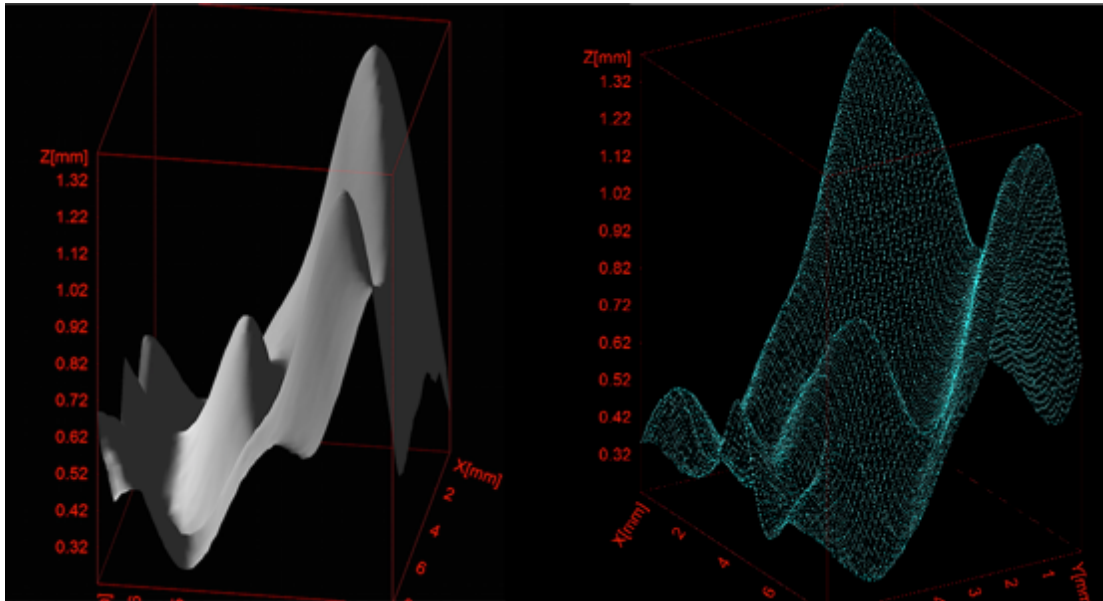


Imagen 36. Reconstrucción de superficie y malla poligonal producido por el software del estereoscopio luego del análisis de imágenes a diferentes enfoques.

Luego de mayor análisis y manipulación del software surgen dudas acerca de la precisión, facilidad de medición y posibilidades de exportación de la malla poligonal para hacer trabajos en otros programas.

Se contacta al proveedor para solucionar estas dudas y fue decepcionante la respuesta. La precisión en la medición es muy variable debido a la naturaleza del software y puede tener una variación de hasta 10.000%, el programa no permite hacer mediciones sobre las reconstrucciones de superficie ni sobre las mallas poligonales y, por último, la exportación de esta malla no es amigable y requiere de mucho esfuerzo y complejidad para hacer de esto algo práctico y más aún cuando serán los operarios y los jefes de calidad los que más usarán este dispositivo. Por tal motivo se decidió descartar este tipo de digitalización.

El CountouReader es una herramienta que hace trazados sobre un papel (milimetrado para facilitar la medición) imitando el movimiento de una aguja que va haciendo contacto con determinada superficie. Esta es una herramienta muy práctica y sencilla para utilizar, y es actualmente uno de los controles de calidad que se realizan. El limitante que posee esta herramienta es que su resolución es sólo tan buena como lo permita la punta de la misma, es decir, cuando la

punta de la aguja de la herramienta hace contacto, esta solo puede detectar ángulos mayores a aquellos que tenga la aguja y se tienen que hacer ciertas correcciones en las mediciones, que para efectos micro como los que se necesitan, complicarían las mediciones y no darían la precisión requerida.

Debido a estos inconvenientes con estas dos metodologías, se decide utilizar la microscopía óptica para poder realizar las mediciones requeridas.

Con el estereoscopio, debido a su baja magnificación, se pueden obtener imágenes de toda la muestra (misma muestra utilizada para metalografías y microdurezas dentro del control de calidad) para así tener puntos de referencia y poder medir el ángulo de ataque del diente (la importancia de este ángulo está descrita en el estado del arte). La facilidad para realizar esta medición permite que sea incorporada en el proceso de control de calidad por los operarios. En la Imagen 37 se observa una de las imágenes tomadas por el equipo de control de calidad.

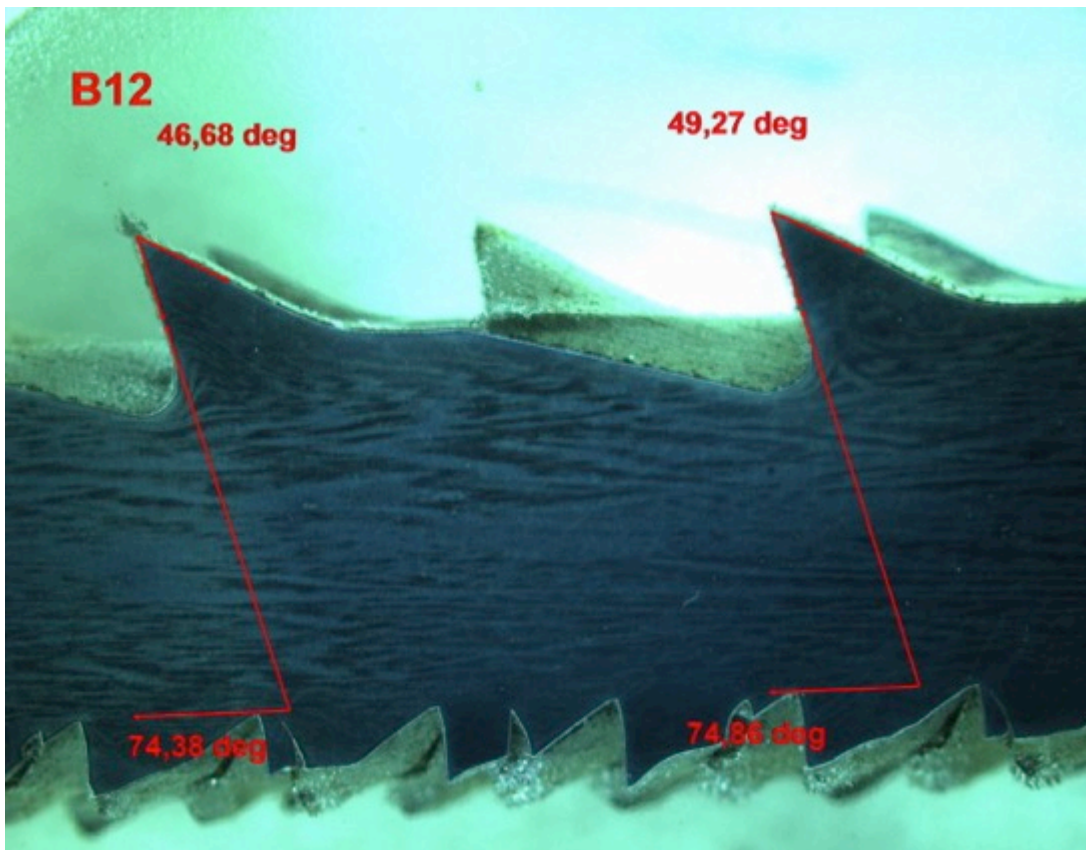


Imagen 37. Imagen tomada para medición de ángulos del diente con el estereoscopio por el equipo de control de calidad de Heller

Se puede observar la medición de los ángulos de ataque de dos dientes, según los valores observados durante los controles de calidad, puede oscilar entre 74.38° y 74.86° . Esto, a pesar de tener cierta variación, son mediciones confiables que permiten utilizarlas para los propósitos del proyecto.

Para la medición del filo también se recomienda utilizar microscopia óptica, esta vez a altas magnificaciones, para poder, mediante un software, medir el radio que posee el filo del diente realizando un arco a 3 puntos que permita encontrar el radio.

5.5. Análisis del proceso de formado

El proceso de formado es un proceso que se realiza por impacto de un buril sobre el fleje de acero para así deformar el fleje y darle la forma al diente. La maquinaria con la que se realiza este proceso, tiene ya muchos años de operación. Sus diseños datan de la década de los años 30, esto, combinado con los años de uso que tienen las máquinas, hace que el producto entre una máquina y otra tengan una mucha variabilidad. Heller se ha esforzado por estandarizar esta parte del proceso, tanto que se desarrolló y fabricó una máquina para que los buriles siempre tuvieran la misma geometría.

La geometría del diente puede ser controlada mediante la modificación de parámetros en la máquina punzonadora y en la geometría del buril que punzona y forma el diente. Se realiza un estudio sobre los parámetros y cambios en la geometría que se pueden controlar y modificar para obtener geometrías diferentes a la actual.

Los cambios que se realizan en los parámetros de la máquina son los siguientes:

- Ángulo en el que incide el buril sobre el fleje
- Altura inicial del buril antes de incidir sobre el fleje

Para modificar el ángulo sobre el cual incide el buril sobre el fleje se debe modificar la cuña mostrada en la Imagen 38, más específicamente el ángulo de ésta para poder así levantar o acostar más el portaburil que, como su nombre lo dice, porta el buril.

Por otro lado es importante controlar la altura inicial del buril sobre el fleje. Actualmente se realiza mediante un proceso manual sin ningún tipo de control diferente a la opinión del operario. La propuesta para controlar esta altura es fabricar bloques patrón, o galgas, para así asegurar que la medida de la altura siempre sea la misma. Esta altura últimamente afecta la altura final del diente.

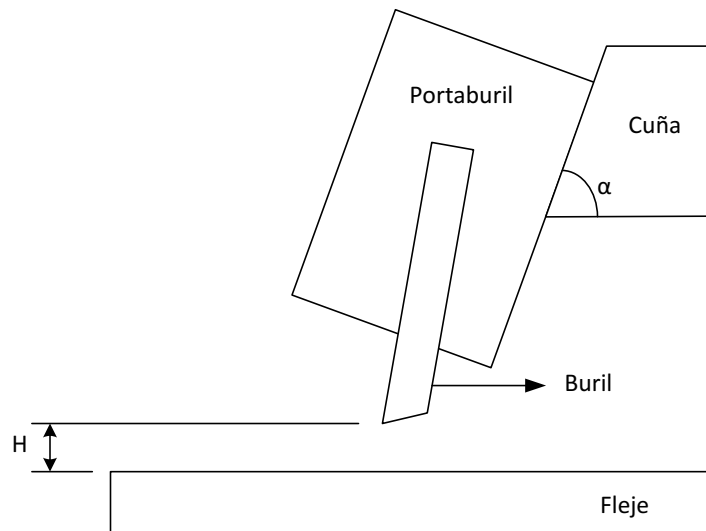


Imagen 38. Bosquejo de los componentes que sujetan el buril en la máquina punzonadora

Para modificar el ángulo sobre el cual incide el buril sobre el fleje se debe modificar la cuña mostrada en la Imagen 38, más específicamente el ángulo de ésta para poder así levantar o acostar más el portaburil que, como su nombre lo dice, porta el buril.

Por otro lado es importante controlar la altura inicial del buril sobre el fleje. Actualmente se realiza mediante un proceso manual sin ningún tipo de control diferente a la opinión del operario. La propuesta para controlar esta altura es fabricar bloques patrón, o galgas, para así asegurar que la medida de la altura siempre sea la misma. Esta altura últimamente afecta la altura final del diente.

El buril lleva varios procesos para darle su forma para que esta se refleje en el fleje una vez se realice el punzonado. Estos procesos se han tratado de estandarizar lo máximo posible para evitar variaciones entre un diente y otro.

Los procesos que se realizan sobre el buril son, principalmente, un rectificado para darle el ángulo principal que se puede observar en la Imagen 39, y un

“rubbing” que le suaviza la punta al buril. Ambos procesos están estandarizados y son relativamente fáciles de controlar para un diseño de experimentos.

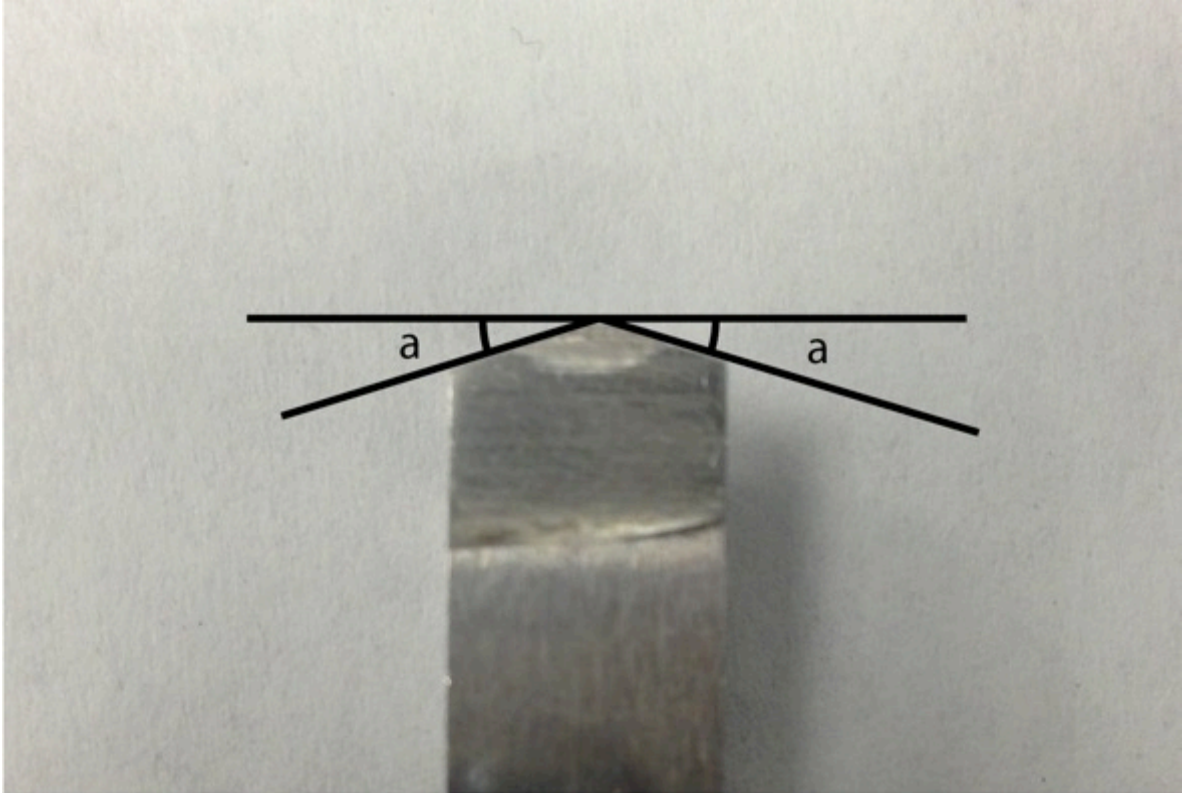


Imagen 39. Imagen del buril desde la vista superior marcando los ángulos formados mediante el rectificado.

Con estas variables encontradas (Ángulo de incidencia del buril, altura inicial del buril y ángulos del rectificado) se modificará la geometría del diente de la escofina.

5.6. Búsqueda de la geometría de diente óptima y sus condiciones de producción

Para buscar una geometría que conlleve a un mejor desempeño en las escofinas se realizó un diseño de experimentos, modificando las variables mencionadas anteriormente como variables relevantes para el proceso de corte en este tipo de situaciones.

Se trabajó sobre dos referencias que tiene la empresa, estas son Legend (Imagen 1) y Red Tang (Imagen 2)

La metodología se aplica como se puede observar en la Imagen 40.

Es importante resaltar que uno de los aportes mas útiles que le dejó el proyecto a la compañía fue la metodología para el uso de diseño de experimentos. Esta metodología servirá también para analizar el lado contrario de la escofina (lado lima) y poderlo mejorar, también para lograr un mejor afilado y mejoras en todos los procesos en general.

Para el diseño de experimentos se hizo un factorial completo de 3 factores y 2 niveles. En la Tabla 10 están los diferentes niveles y factores que se modificarán en el experimento.

Estos son los respectivos factores:

- a = Ángulo de la cabeza de el buril (Imagen 39)
- b = Ángulo de la calza/cuña de la máquina punzonadora
- c = Altura de el diente

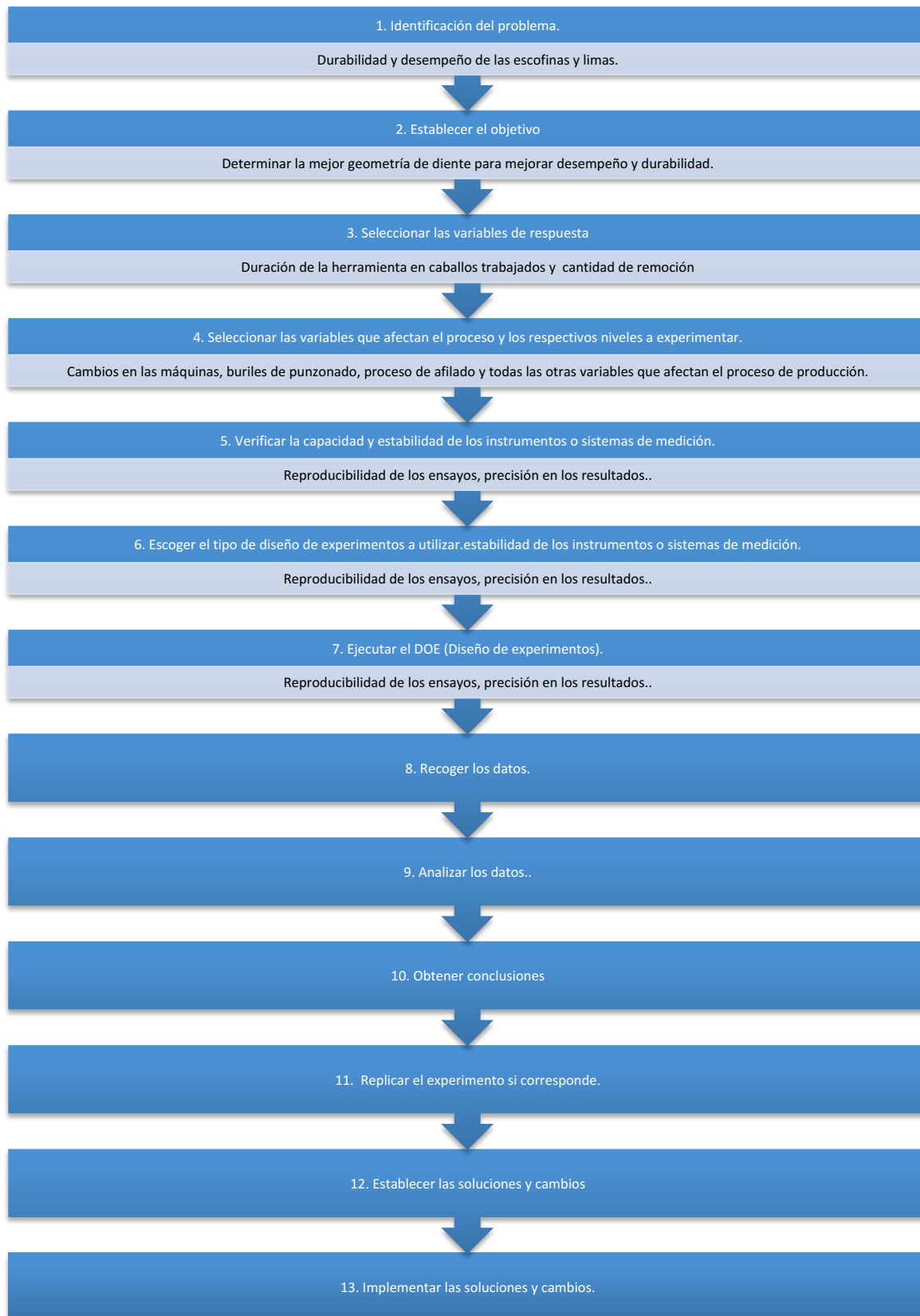


Imagen 40. Diagrama de flujo del proceso para llevar a cabo un diseño de experimentos.

Los valores normales que se usan en Heller son (estos fueron transmitidos cuando se movió la empresa de USA hacia Colombia, pero sin ninguna fundamentación, simplemente se hacían así y así se debían hacer por tradición):

- a = 27 grados
- b = 17 grados
- c = 50 milésimas de pulgada

Tabla 10. Factores y niveles para el diseño de experimentos.

Variable	Nivel		Unidades
	-	+	
a	24	30	Grados
b	15	19	Grados
c	45	55	Milésimas de pulgada

En la Tabla 11 se puede observar la totalidad de muestras realizadas, su nomenclatura y qué nivel de cada factor tienen.

Tabla 11. Muestras y nivel de factor que contienen.

Muestra	Factor		
	a	b	c
-1	-	-	-
a	+	-	-
b	-	+	-
ab	+	+	-
c	-	-	+
ac	+	-	+
bc	-	+	+
abc	+	+	+

Se realizan varias pruebas sobre cada muestra. Inicialmente se determina que es mejor llevar las escofinas donde los herradores y pedirles su opinión acerca del desempeño de estas. Y luego realizar las pruebas sobre un tribómetro desarrollado para este tipo de ensayos.

Se fabrican 18 escofinas de cada referencia y se nombran como esta en la Tabla 11 con un guión (-) y un número de 1 a 18 para identificarlas.

Los comentarios que se obtuvieron de las escofinas fueron los siguientes:

Legend:

- -1:

Muy buena, se siente potencia, si no es alguien que conoce cómo herrar puede hacerle un daño al casco por alta remoción. Se amarra. La viruta es larga y pulida.

Muy buen acabado, pareciera que no fuera lado raspa.

A veces se amarra, rinde mucho, remueve muy bien.

Calificación de 8.5

- b:

Muy similar a la “-1”, muy buena, no se siente la diferencia. Mucho mejor que la escofina actual.

Calificación de 8.5

- ab:

Se siente más suave. Come mucho sin esfuerzo.

No se pega, fue mas pareja con el corte.

Viruta mas larga.

Muy buena, mejor que las otras. Muy parejo el acabado, muy bueno. Parecía trabajando con el lado lima en suavidad y acabado.

La mejor escofina que haya usado.

Calificación de 10.

- c:

Mal acabado, buena remoción, se amarra mucho. No es mala lima, pero

comparada con la anterior sí se considera mala.
Calificación de 7.

- ac:

Viruta más cortica, se siente igual a la ab pero con más amarre. Muy buena, excelente acabado, aunque no mejor que la de ab (la ab fue más eficiente y más suave). Calificación de 9

- abc:

Muy suave y muy buen corte. Casi igual a la ab. Viruta mas corta, buen acabado pero no igual a la ab. Calificación de 9. Más suave que la ab.

Red Tang:

- -1:

Mucho más menuda la viruta (cortica y delgada). Remueve muy bien. Más fácil de manejar, no se pega. No es tan bueno el acabado. Muy suave, se siente como si se estuviera trabajando el lado lima, pero con un acabado no tan bueno

- c:

Viruta mucho más pequeña (come menos). Corte muy parejo, come más pulido. Excelente acabado. Calificación de 10.

Después de pedirle el concepto a los herradores, se llevan las escofinas a un tribómetro desarrollado especialmente para esta prueba que mide fuerza y distancia removida sobre una probeta, y se realizan las pruebas sobre el tribómetro convencional que usa la empresa para verificar la calidad de las escofinas.

Los ensayos sobre la serie "Red Tang" se descartan debido a problemas con las mediciones en el tribómetro, la ubicación de los dientes (completamente alineados) generan unos canales en la probeta causando que se deje de remover material una vez formados los canales. Este fenómeno ocurre debido a que la fuerza que se ejerce sobre la probeta para que sea desbastada por la escofina es constante, pero una vez se forma el canal, el área de contacto de

los dientes se vuelve mayor, disminuyendo la presión que ejerce cada diente individualmente sobre la probeta. Además de este inconveniente, no siempre se forman los “canales” o “zurcos”, debido a la naturaleza misma de producción, unas veces se observa que los dientes no quedan tan organizados y así no se forman estos canales. Este fenómeno no se presenta en el uso común de la escofina debido a que el herrador nunca pasa la escofina exactamente por encima de donde la pasó en el ciclo de remoción anterior.

El buril que se utiliza para conformar los dientes en una y otra referencia es exactamente igual, lo que cambia es la distribución de los dientes, pero en principio el comportamiento es igual por lo cual se realiza sólo la serie “Legend” y la geometría del diente se aplica para ambas referencias.

Las pruebas en el tribómetro convencional se realizan con unos tubos de PVC, rellenos con mortero (arena y concreto) para así realizar una prueba de desgaste acelerado (esta prueba en un comienzo se descartó debido a su naturaleza agresiva y a que no necesariamente representa el verdadero desempeño de una escofina). La prueba se realiza tomando los tiempos que se demora en remover 5 milímetros de probeta hasta que haya removido 35 milímetros y en el momento que se exceda más de 50 segundos para remover los 5 milímetros se detiene la prueba. Y según la cantidad de milímetros que haya removido hasta antes de llegar a este límite se le da una calificación de 0 a 5.

Esta prueba se realiza debido a que son los controles actuales de calidad y no toma mucho tiempo ni recursos realizarla.

Se realiza la prueba para toda la serie de muestras del diseño de experimentos de Red Tang y de Legend (como se menciona previamente, la serie Red Tang presentó problemas y por este motivo se descarta), además se toma un patrón (escofina sacada del proceso de producción con las condiciones actuales) de cada una, más una escofina de la competencia más significativa que es Save Edge.

Para la legend se observa la gráfica de los resultados en la Imagen 41.

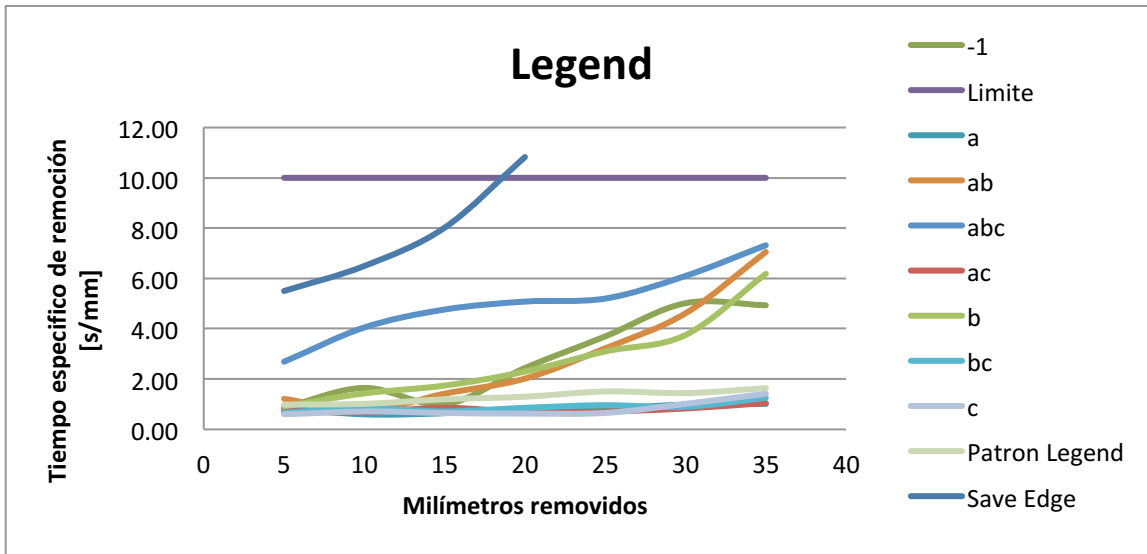


Imagen 41. Resultados tribómetro convencional sobre las muestras del diseño de experimentos para la referencia Legend.

Como se puede observar todas las escofinas cumplieron y obtuvieron la máxima calificación para este sistema de pruebas. Hubo unas escofinas que se desempeñaron mejor que otras, pero esto siempre ocurre incluso entre escofinas de un mismo lote, estas no necesariamente (y generalmente) no se comportan igual.

Las siguientes pruebas, se realizan en un tribómetro que la empresa mandó a fabricar especialmente para esta finalidad. El tribómetro posee varios sensores tanto de desplazamiento como de fuerza para poder recopilar los datos y medir qué tanto material va removiendo y qué fuerza necesita para hacer esto. La escofina se mueve de manera horizontal (eje "x") y la probeta de Hytrel 5556 (material que simula el casco equino) se mueve de manera vertical (eje "y") y cuando se apoya sobre la herramienta tiene una carga de 2 kilogramos.

Entre un ciclo de remoción y otro se alcanzan a registrar aproximadamente 80 datos. Esto es un inconveniente debido a la masiva cantidad de datos registrada, por lo cual se determina que el registro de datos, debe ser cada 3 ciclos cada 27 ciclos, para que, entre un paquete de 3 ciclos registrados y otro, hayan 30 ciclos.

Esto con la finalidad de poder realizar pruebas largas y medir el comportamiento a medida que se vaya desgastando la escofina y vaya perdiendo su filo.

Aun así, reduciendo a una décima parte la cantidad de datos obtenidos, el análisis de una probeta (probetas cortadas a partir de el bloque de material mencionado y mostrado anteriormente en el capítulo 5.3) puede arrojar entre 1.000 y 2.000 datos.

Un ciclo consta de 4 movimientos diferentes los cuales se describen a continuación:

1. Movimiento de la escofina para ubicar la probeta en el comienzo de la zona de corte.
2. Ubicación de la probeta sobre al escofina (se deja caer la probeta con la carga determinada para el ensayo).
3. Remoción.
4. Movimiento de la probeta hacia arriba.

Los datos útiles para los análisis son los datos tomados durante la remoción, pero por la manera cómo se construyó y se programó el dispositivo, este registra los datos en la totalidad de los ciclos, y, debido a las velocidades variables de los pistones neumáticos que realizan el movimiento, no siempre la cantidad de datos en un ciclo es igual.

Debido a esto se desarrollaron unas macros en Excel que permiten realizar los análisis e identificar las partes necesarias de datos obtenidos que son útiles para el análisis.

En la Imagen 42, se observan los datos de fuerza registrada durante la totalidad de un ciclo, en el eje “y” está la fuerza; y en el eje “x”, el número de datos registrados.

Los datos que están en cero o cercanos a cero, son datos que se registran durante los movimientos 1, 2 y 4 del ciclo explicados anteriormente. Los datos que interesan, van aproximadamente, en la escala “x” de la gráfica, desde 19 a

40, estos son los datos de la remoción, en donde tenemos posición de la probeta y fuerza (en Newtons) a la cual es sometida la herramienta para poder avanzar. Se observa como existe un pico en el primer dato. Esto ocurre debido a que siempre hay que vencer cierta inercia y la fuerza para arrancar a remover material siempre será mas alta que cuando esté una vez cortando. Este pico es un poco inestable y varía mucho entre un ciclo y otro por lo cual se decide tomar una serie de datos después del pico y promediarlos para determinar la fuerza requerida para la remoción.

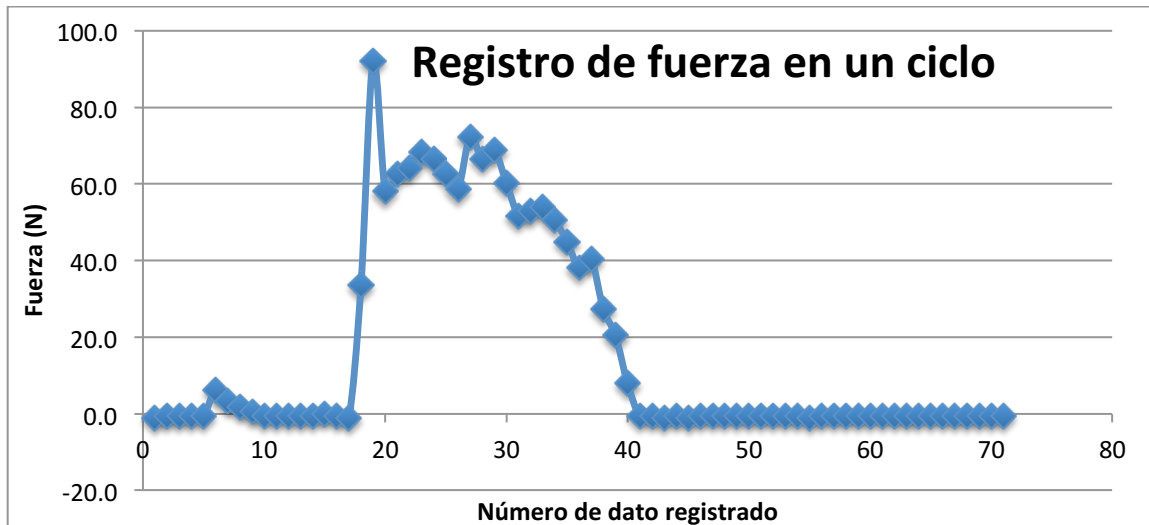


Imagen 42. Fuerza vs número de dato registrado en el ciclo, gráfica común de un ciclo del tribómetro,

Además de la fuerza, se registra la posición de la probeta en milímetros durante todo el ciclo, se promedia para tener la posición media durante cada ciclo. Esto para poder determinar cuánto va removiendo y poder encontrar la rata de remoción por ciclo.

En la Imagen 43 se puede observar la gráfica de la totalidad de los datos tomados por el tribómetro en cuanto a distancia de la probeta. Cabe resaltar que la máxima distancia es 60 milímetros y por eso la gráfica solo llega hasta ese punto.

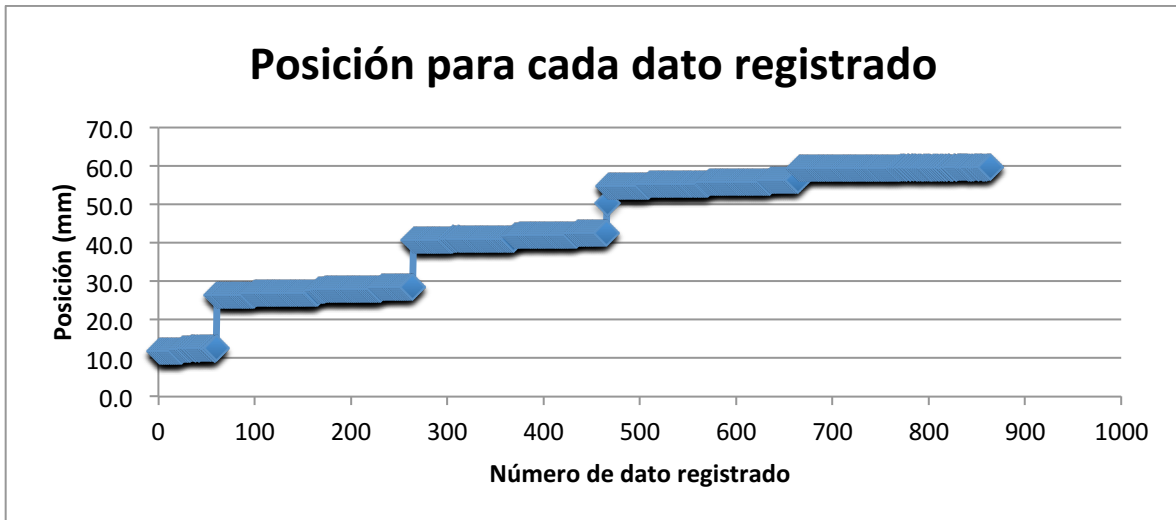


Imagen 43. (Posición vs dato registrado) Gráfica de la totalidad de los datos de la distancia recorrida por la probeta durante un ensayo.

Una vez promediados se obtiene la siguiente gráfica en la Imagen 44. Se puede observar cada ciclo registrado y como cada tres ciclos hay un incremento significativo, esto es causado por la toma de datos, hay 27 ciclos no registrados entre un paquete de datos y el siguiente. Por paquete de datos, se entienden los tres ciclos registrados.

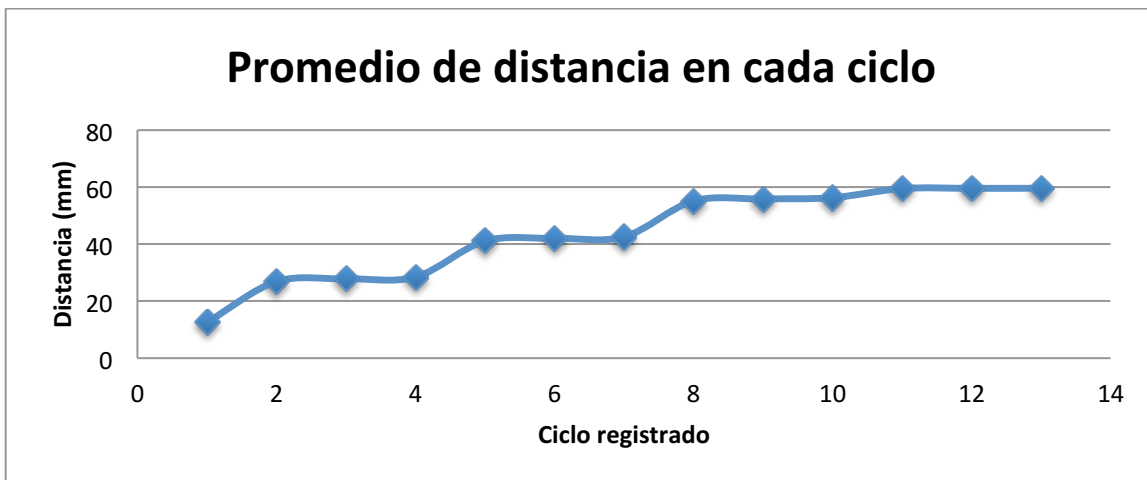


Imagen 44. Promedio de distancia en cada ciclo registrado.

El último paquete de datos registrado se puede descartar debido a que en este momento ya la probeta se había acabado (estos datos también los omite la macro creada para el propósito del análisis).

El primer paquete de datos sólo cuenta con 1 dato, esto se debe a la forma como esta programado el tribómetro digital, la toma de datos, solo toma los 2 datos iniciales y no los primeros 3. Y el primer dato se debe descartar debido a que las alturas apenas se están ajustando y la fuerza es excesiva para poder remover la primera capa de material, esto causaría que los datos fueran atípicos y complicarían el análisis.

Una vez reducidos y agrupados los datos se puede analizar el promedio de remoción para cada probeta e ir comparando entre probetas para poder observar la caída en la rata de remoción.

En la Imagen 45 se observa el comportamiento descrito anteriormente, y lo que debería ser típico para cada escofina. Se observa cómo la línea azul va tendiendo a caer, esto demuestra un desgaste sobre la escofina ya que cada vez remueve menos cantidad de material por ciclo, lo cual se entiende como remoción específica (milímetros removidos de la probeta por 1 ciclo de remoción). Comienza por los lados de 0.32 milímetros por ciclo y acaba cerca de 0.19 milímetros por ciclo.

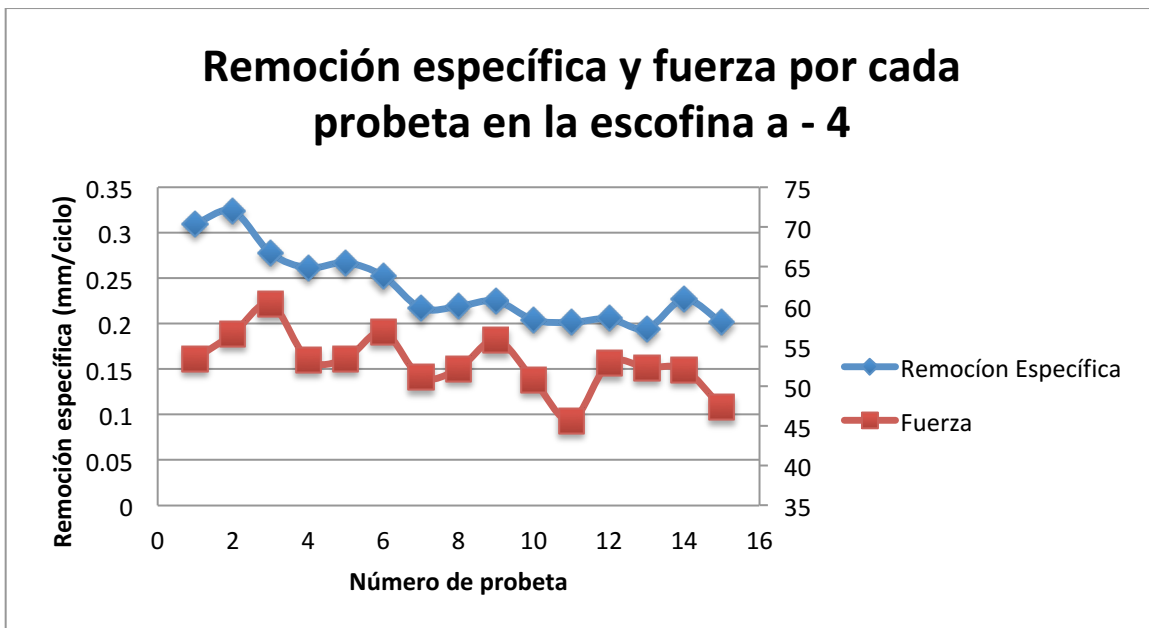


Imagen 45. Remoción específica y fuerza por cada probeta en la escofina a-4.

Se observa en la remoción específica de la probeta 14, que hay un valor atípico, no sigue la tendencia y esto es un problema que se presenta en muchos de los

ensayos que se realizan y que más adelante se muestran. A pesar de este valor en la probeta 14, esta escofina fue de las que presentó mayor estabilidad y mejor comportamiento en cuanto a tendencias, mas no a desempeño.

En cuanto a la fuerza (línea roja) no se observa ningún comportamiento, solo que se mantiene relativamente constante y va cayendo poco a poco, aunque tiene datos atípicos (la medición de la fuerza es mas complicada debido a que los valores nunca son constantes y toca tomar un promedio, este promedio puede también estar afectado por el diseño mismo de el tribómetro, y por la naturaleza de el proceso de remoción).

Este es el comportamiento "ideal" que deben tener las escofinas, pero este comportamiento no siempre se manifiesta.

En la Imagen 46 se puede observar el consolidado de todos los resultados del primer diseño de experimentos completo que se ejecutó. En el primer ensayo, se realizan pruebas sobre 5 escofinas que arrojan resultados muy prometedores (se realizó solo sobre 5 escofinas debido a que las otras 3 referencias no habían sido fabricadas, y se repitió el ensayo entero para asegurar que todas hubieran salido del mismo lote).

Es difícil notar tendencias debido a la cantidad de muestras que hay presentes. Sobresale la línea roja que es la que tiene un comportamiento más estable en cuanto a tendencias que es la escofina "a-4" que se ve en la Imagen 46. Se hace notorio el comportamiento mencionado anteriormente de valores que son atípicos y no siguen la tendencia a la baja de la remoción específica, como se puede observar claramente en la línea azul, que posee el pico más alto de todas las muestras, esta muestra es una escofina "abc" y pasó de remover por debajo de 0.15 milímetros por ciclo, a remover 0.4 milímetros por ciclo. Esto representa un aumento de 167% en remoción específica sin cambio alguno en el ensayo distinto a la probeta, y luego volvió a caer a 0.2 milímetros por ciclo. Se guardaron y marcaron las probetas en las que se observaron estos cambios tan drásticos y se les realiza pruebas de dureza. La dureza es constante en todas las probetas que se estudian, y la naturaleza misma de este material y el fabricante permiten concluir que no hay variación suficiente en el material para

causar cambios tan drásticos en el desempeño de una escofina, y durante el cambio de probeta no se realiza ningún cambio en los parámetros ni en el montaje de la máquina.

Otro ejemplo de este comportamiento errático se puede observar en la escofina “b” que está representada por la línea naranja. En esta se observa un aumento drástico en las probetas 5 y 6, de 0.25 mm/ciclo a 0.3 mm/ciclo, para luego caer a 0.15 mm/ciclo, para luego volver a subir a casi 0.35 mm/ciclo.

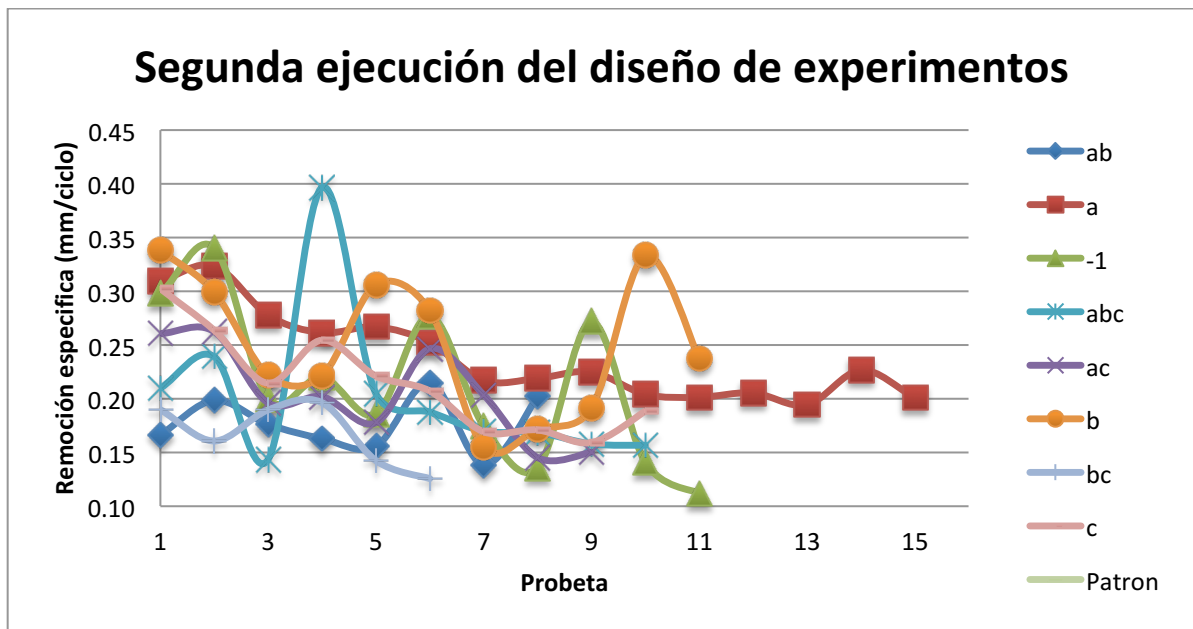


Imagen 46. Remoción específica promedio en cada probeta para la segunda ejecución de el diseño de experimentos completo.

En algunos casos, se puede omitir estos valores atípicos y prestarles atención solo a las tendencias y a los valores que tengan “más” sentido. Pero en muchos casos no es muy claro cuáles valores se deben omitir y es hacer una “acomodación” a conveniencia de los datos.

Además de este comportamiento donde hay unos datos atípicos, no se logran reproducir los resultados. En la Imagen 47 se observan los resultados para otra réplica del diseño de experimentos. En esta se observan comportamientos más estables, con menor cantidad de picos (pero aún hay datos atípicos). También se puede observar que las escofinas que mejor se comportaron en los otros

resultados no son las mejores en este, ni las peores en el anterior son las peores en este.

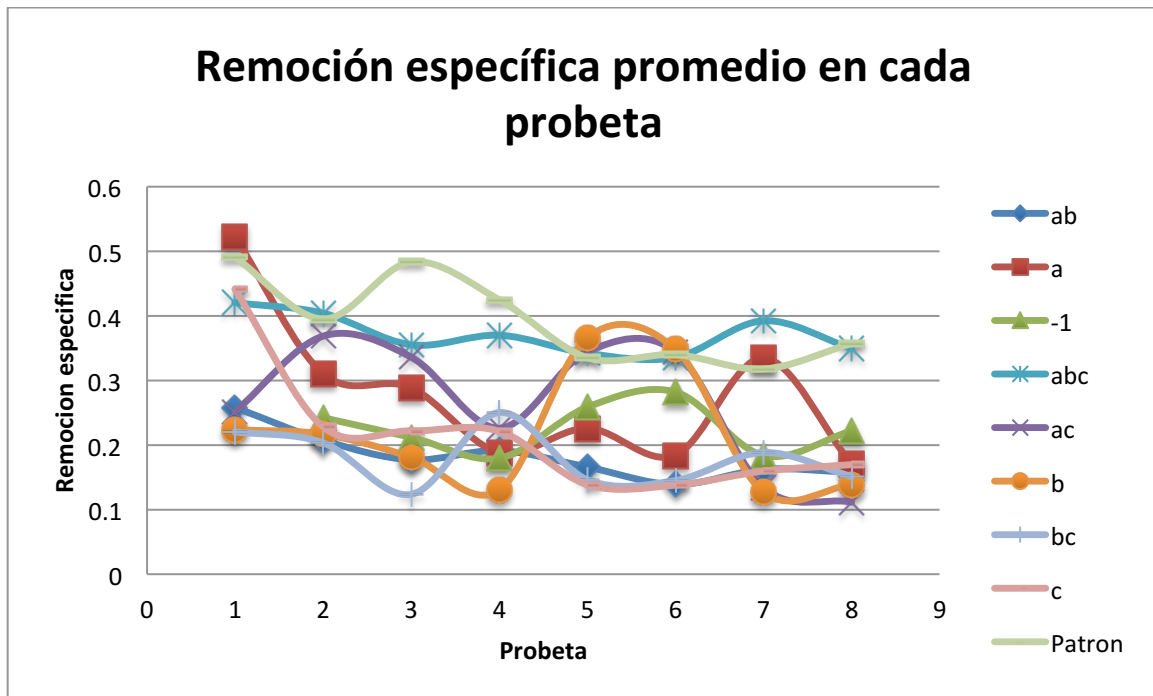


Imagen 47. Remoción específica promedio en cada probeta para la primera ejecución de el diseño de experimentos completo.

Para mostrar en mayor detalle este fenómeno de reproducibilidad se observa la Imagen 48. En esta gráfica están los 4 ensayos que se han realizado a escofinas de referencia “abc”. La gráfica habla por sí sola, no hay dos líneas que se superpongan y muestren desempeño y comportamiento igual. Y en casos como el de la tercera probeta, se tienen datos (en el orden que se hicieron ensayos) de: 0.42, 0.36, 0.14 y 0.25. Entre el dato menor y el dato mayor hay una diferencia de 300% de desempeño, y este comportamiento se presenta para la mayoría de referencias de escofinas sobre las que se realizaron ensayos.

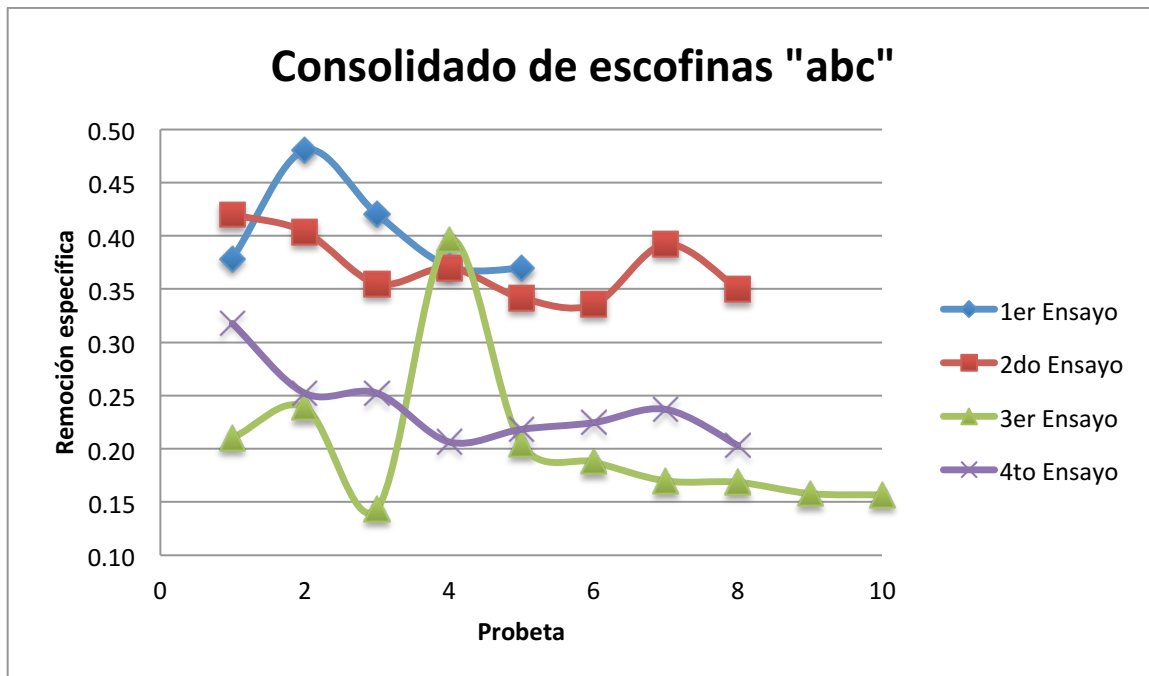


Imagen 48. Consolidado de ensayos realizado sobre escofinas de la referencia "abc".

Debido a que el tribómetro es completamente nuevo, no se conoce mucho acerca de este y de sus posibles errores en mediciones. Para descartar problemas de variabilidad en la toma de datos por parte de la máquina, se tomó la decisión de realizar una prueba parecida a la prueba de mortero en un tubo de "PVC", pero realizando las adaptaciones necesarias para que se pudieran montar probetas de el material sustituto encontrado para realizar los ensayos.

La metodología para realizar el ensayo es la misma que en el ensayo tradicional del tribómetro convencional descrito previamente, es decir, marcar la probeta cada 5 milímetros e ir tomando el tiempo cada que pase por los 5 milímetros. Realizar esto hasta que la probeta haya consumido 50 o 55 milímetros puesto que después de esto ya no existe un punto de apoyo estable y la probeta se empieza a mover mucho.

En la Imagen 49 se observa el montaje de la probeta y las modificaciones que se realizaron (un par de platinas para que la probeta tenga apoyo a los lados durante todo el recorrido) y las flechas indicando la dirección del movimiento.

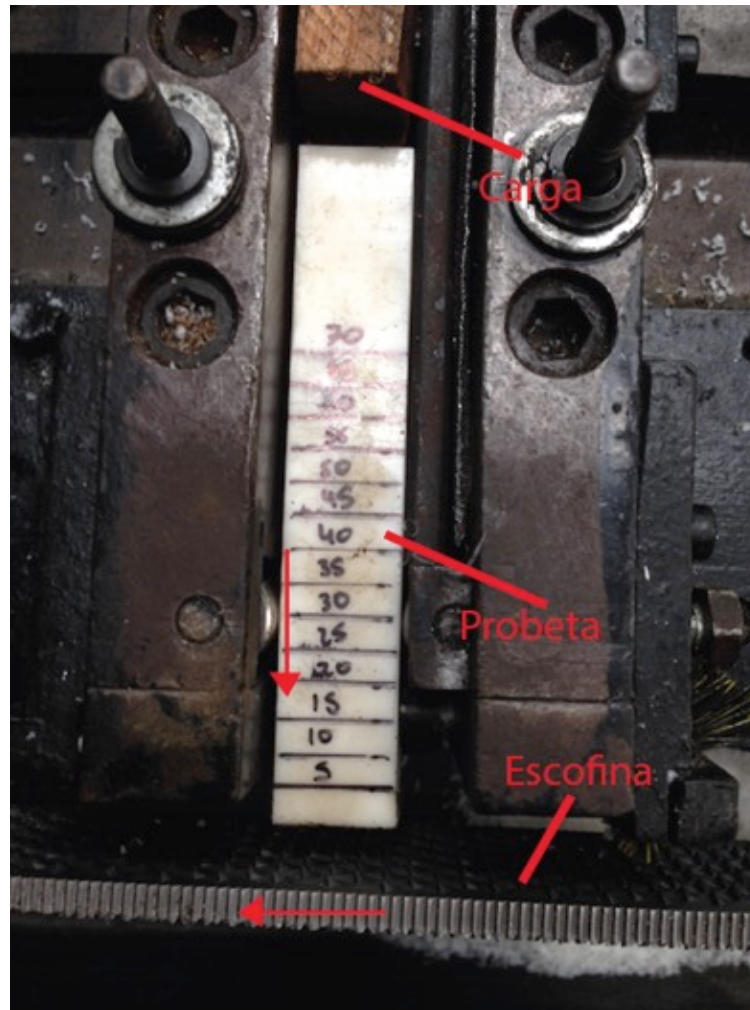


Imagen 49. Imagen de las modificaciones y el montaje realizado en el tribómetro convencional para poder ensayar con probetas del material sustituto encontrado (Hytrel 5556).

Se realiza este ensayo consumiendo 5 probetas por cada escofina para verificar la reproducibilidad del ensayo sobre una misma referencia de escofina (escofinas actuales sacadas de el proceso de producción, ya que estas son las que más estandarizadas deben estar). Los resultados no fueron mucho mejores que los del tribómetro digital.

En la Imagen 50 se observa el tiempo que toma remover cada 5 milímetros de material en el eje “y”, y en el eje “x”, la distancia acumulada (no se incluye la tabla de datos debido a la cantidad de datos, lo importante es resaltar las tendencias). Podemos notar que, a medida que va consumiendo, la probeta va requiriendo más tiempo para remover la misma cantidad de material. Esto

indica un claro desgaste de la escofina, y las tendencias son relativamente estables, aunque las probetas 2 y 3 requirieron la misma cantidad de tiempo. El ensayo pareciera estar bien y poder proveer resultados confiables. El problema se presenta cuando se trata de replicar el ensayo.

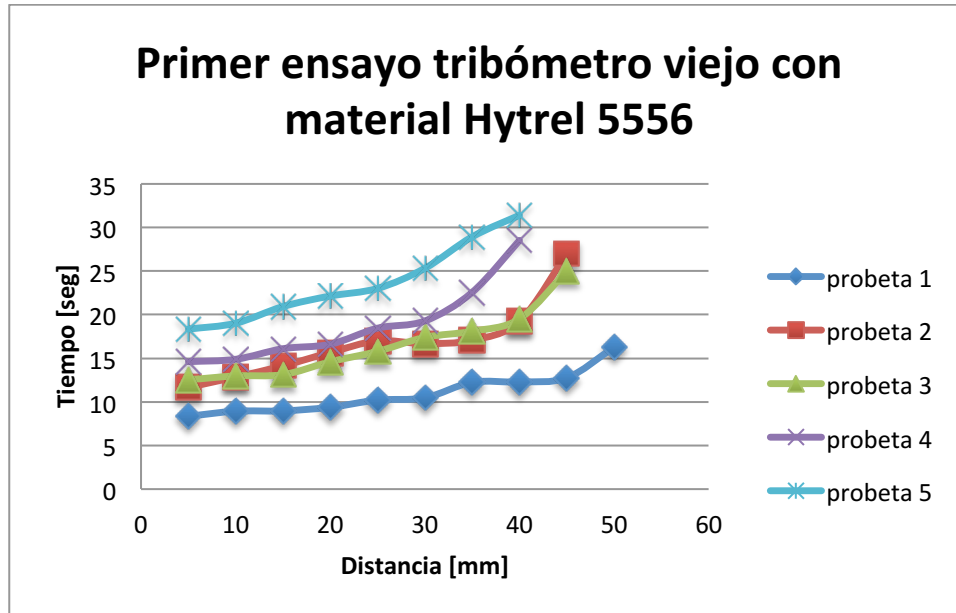


Imagen 50. Primer ensayo con el tribómetro convencional sobre el material Hytrel 5556.

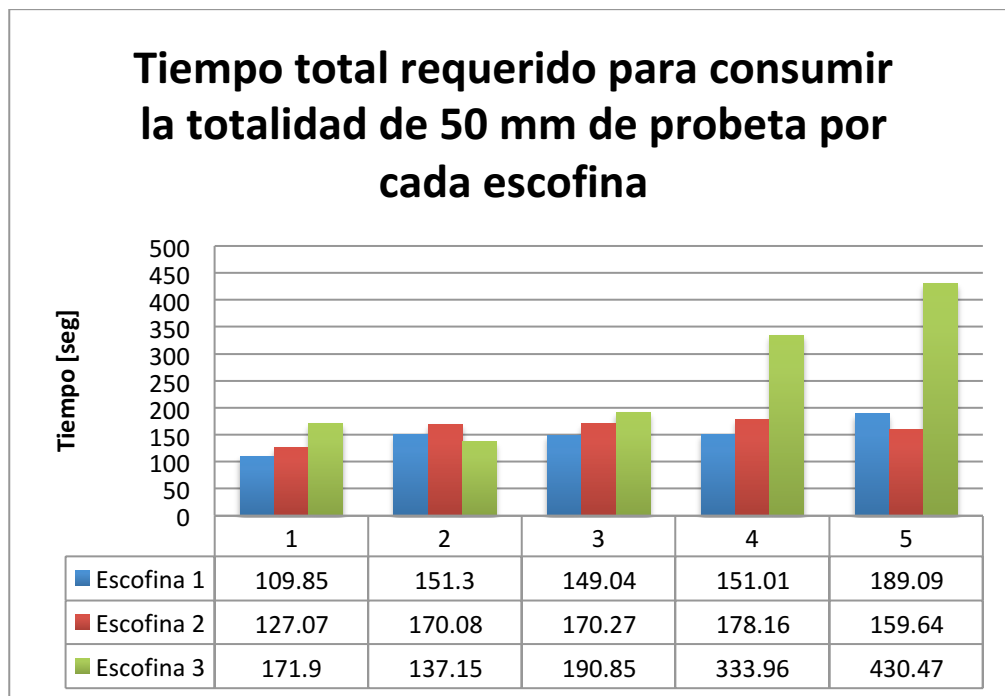


Imagen 51. Tiempo total requerido para consumir la totalidad de 50 mm de probeta por cada escofina.

En la Imagen 51 están los tres ensayos realizados en el tribómetro convencional para poder compararlos y ver la reproducibilidad que tiene este ensayo. En el eje “y” está el tiempo total que requiere cada escofina para remover los 50 milímetros de probeta, mientras que en el eje “x” están las probetas. Cada color de la gráfica representa una escofina: el azul representa el primer ensayo, el rojo la segunda y el verde la tercera. A simple vista no parecieran ser tan graves las diferencias, por lo menos durante las primeras tres probetas. Pero haciendo un análisis más detallado, y mirando los datos, se observa que, por ejemplo, para la primer probeta, el menor tiempo fue de 109 segundos, y el peor tiempo fue de 171 segundos, esto da una variación con respecto a el tiempo menor de 57%. En la Imagen 52 se observa en cada probeta cuánta fue la variación de tiempo entre el menor y el mayor tiempo (con respecto al menor). Se observa que hay variaciones desde 24% hasta 150%, esto concuerda con las variaciones encontradas en los ensayos realizados en el tribómetro digital. Además no se terminaron las probetas 4 y 5 en su totalidad (50mm) para la escofina 3, si se hubiera tomado la totalidad del tiempo, la diferencia sería aún mayor.

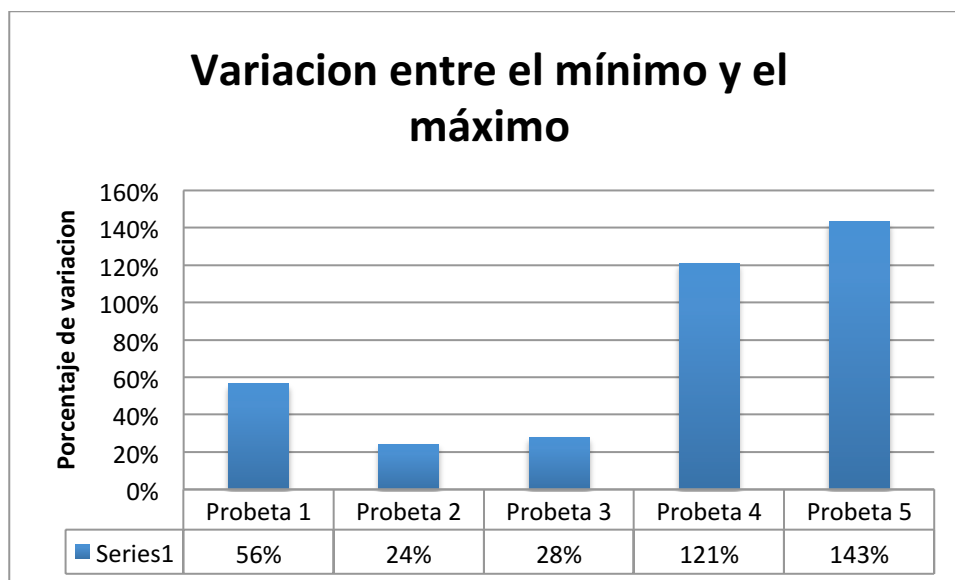


Imagen 52. Variación en porcentaje del menor y mayor (con respecto al menor) tiempo para remover 50 milímetros de probeta durante los ensayos con el material Hytrel 5556 en el tribómetro convencional.

Estos resultados permiten concluir que, antes de poder realizar diseños de experimentos, hay que realizar estudios más amplios y profundos acerca de la variabilidad de los procesos. La variación puede estar en los sistemas de medición (menos probable) en la forma que tienen los dientes (que cambie de una escofina a otra) o en el afilado, proceso del cual se habló en el capítulo 3.3, y pueden existir muchas variables que influyan y causen diferencias en el desempeño.

Uno de los puntos fundamentales en un diseño de experimentos es la precisión y confiabilidad en la medición de los resultados. Con variaciones tan altas entre una escofina y otra, aun siendo de la misma referencia, nunca se podrá saber a qué se debe el aumento, o disminución en el desempeño, si a los cambios en la geometría que se realizaron, o a la variación natural del proceso mismo.

Adicional a este diseño de experimentos se plantea otro para encontrar una mejor geometría también en el lado lima. Se estudia el proceso de producción y la literatura para determinar cuales son las posibles variables que afectan el proceso que pueden ser modificadas. Se escogen 6 variables, teniendo en cuenta lo investigado (Atkins, 2009), para modificar, esto da un total de 6 factores y dos niveles. Como se menciona anteriormente, la cantidad de referencias posibles es exponencial y depende de los factores y los niveles. Esto da un diseño factorial completo de 64 muestras distintas. Por razones de tiempo y recursos se determina que se va a hacer un factorial fraccionado utilizando el software de Minitab. En la Imagen 53 se observa una tabla con los posibles diseños de experimentos para varios factores y para 2 niveles. Los colores representan el nivel de resolución (va de 3 a 5, siendo 5 el más preciso y 3 el menos). Las resoluciones 3 y 5 son poco recomendables para este caso, el nivel 3 es poco preciso y existen interferencias debido a las interacciones de las variables y para el nivel 5 se tendría que ejecutar 32 posibles combinaciones que requieren demasiado tiempo y materiales. Por lo tanto se decide realizar la resolución 4, que deja 16 posibles combinaciones.

En la Imagen 54 se observa un diagrama de las variables a modificar de la lima, ángulos y paso (en dientes por pulgada), y en la Imagen 55 se observa un bosquejo de el cincel que conforma los dientes de la lima y los ángulos que se le pueden modificar.

Crear diseño factorial: Mostrar diseños disponibles

Diseños factoriales disponibles (con resolución)

	Factores														
Corr	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Com	III													
8		Com	IV	III	III	III									
16			Com	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III	
32				Com	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
64					Com	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
128						Com	VIII	VI	V	V	V	IV	IV	IV	

Diseños de Plackett-Burman de resolución III disponibles

Factores	Corridas	Factores	Corridas	Factores	Corridas
2-7	12,20,24,28,...,48	20-23	24,28,32,36,...,48	36-39	40,44,48
8-11	12,20,24,28,...,48	24-27	28,32,36,40,44,48	40-43	44,48
12-15	20,24,28,36,...,48	28-31	32,36,40,44,48	44-47	48
16-19	20,24,28,32,...,48	32-35	36,40,44,48		

Ayuda Aceptar

Imagen 53. Diseños de experimento de factorial fraccionado con sus niveles y factores y niveles de resolución (precisión). Imagen tomada del software Minitab.

En la Tabla 12 están los factores con sus respectivos niveles determinados como los que más afectaban el desempeño de las limas. Los valores “normales” de producción de las limas (es decir, los actuales de producción) son el promedio de el nivel – y el factor +.

Tabla 12. Factores y niveles para diseño de experimentos lado lima.

Factor \ Nivel	-	+
A (Ángulo lado Superior)	10	20
B (Ángulo lado Inferior)	30	40
C (Ángulo cincel 1)	12	18
D (Ángulo cincel 2)	32	38
E (Paso lado superior)	10	14
F (Paso lado inferior)	7	9

Después de ejecutar en el minitab las posibles combinaciones para el diseño de experimento, se obtienen las referencias que se pueden observar en la Tabla 13.

El proceso de análisis para ésta geometría no fue tan extenso ni detallado como lo fue para el lado raspa, pero cabe resaltar que se dejó la metodología para que la empresa pueda replicar el proceso en un futuro.

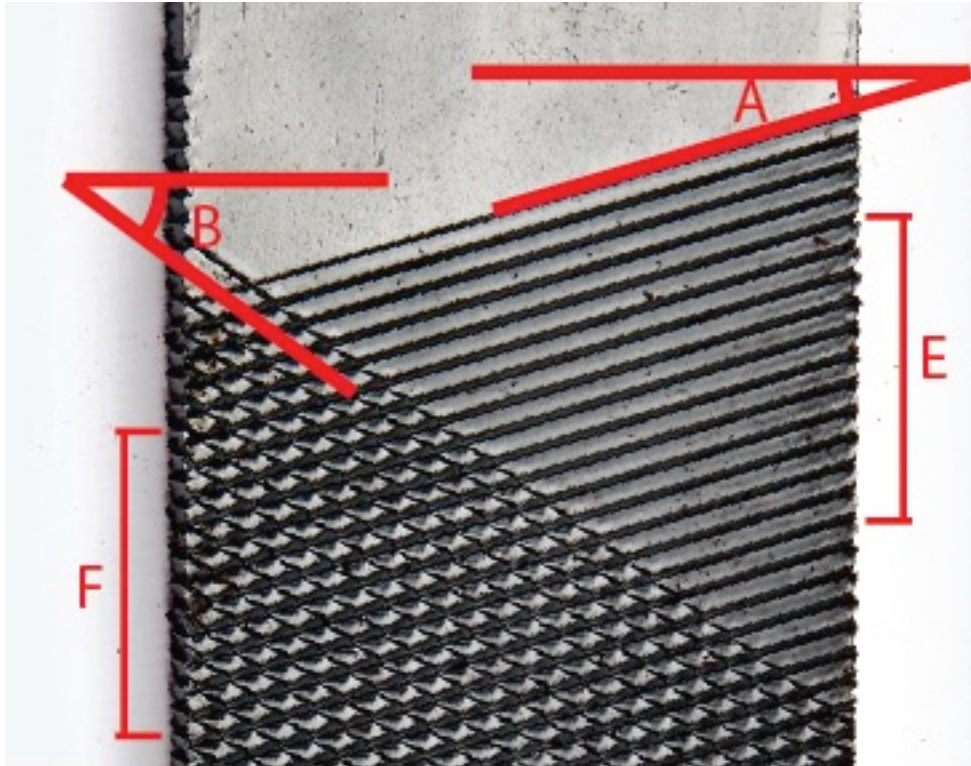


Imagen 54. Explicación de cada variable de la lima. Donde A es el ángulo superior, B es el ángulo inferior, E es el paso (en dientes por pulgada) superior y F es el paso inferior (en dientes por pulgada).



Imagen 55. Bosquejo de el cincel que forma el diente de la lima.

Tabla 13. Diseño de experimentos completo para lado lima.

Corrida	A	B	C	D	E	F	Nombre
1	+	+	-	+	-	-	ABD
2	-	-	-	-	-	-	-1
3	+	+	-	-	-	+	ABF
4	-	-	-	+	-	+	DF
5	+	-	+	+	-	-	ACD
6	+	-	-	+	+	+	ADEF
7	-	+	+	-	-	-	BC
8	-	+	+	+	-	+	BCDF
9	-	+	-	-	+	+	BEF
10	+	+	+	+	+	+	ABCDEF
11	-	-	+	-	+	+	CEF
12	-	-	+	+	+	-	CDE
13	-	+	-	+	+	-	BDE
14	+	+	+	-	+	-	ABCE
15	+	-	+	-	-	+	ACF
16	+	-	-	-	+	-	AE

Se decide fabricar las limas por ambos lados del fleje. Esto para evitar en pruebas de campo que el herrador use el lado raspa y dicte opiniones acerca de éste cuando en realidad lo importante para este experimento es la lima.

Debido a la alta variabilidad obtenida en los experimentos anteriores para el lado raspa con el tribómetro en el laboratorio de manera controlada, se determina que el mejor camino para proceder con la realización de pruebas de desempeño para tanto lado raspa como lado lima, es confiando en la opinión de los herradores (se sabe que la calificación y opinión de los herradores puede ser subjetiva y puede variar de uno con otro, pero es la mejor y más confiable forma que se encuentra actualmente para evaluar el desempeño de las herramientas).

Se le entregan escofinas de lado raspa y de lado lima únicamente a un herrador en particular, con el que la empresa tiene una estrecha relación y confía mucho en sus opiniones para que evalúe, tanto en sensaciones iniciales, acabado superficial después del corte, y longevidad en las unidades que se le entregaran.

Para el lado lima se realiza inicialmente una prueba de filo, luego se llevan al campo las 16 unidades de prueba, una por cada referencia (-1, ABCDEF, ABCE, ABD, ABF, ACD, ACF, ADEF, AE, BC, BCDF, BDE, BEF, CDE, CEF, DF).

El resultado de esta prueba arrojó que las referencias DF, BDE, ABF y ABD, eran las de mejor desempeño sobresaliendo entre ellas la ABF.

Luego de la primera prueba de campo se realiza una segunda con las 4 referencias que tuvieron mejor desempeño, arrojando de nuevo que la escofina ABF era la de mejor desempeño y acabado.

Se realizan en Heller todas las pruebas pertinentes para caracterizar, de la mejor manera posible con los actuales procesos de control de calidad, a la lima ABF.

En la Imagen 56 se observa una medición en el CountouReader del perfil del diente de la lima ABF y la lima común del proceso de producción. Se observa que tiene un “ángulo de ataque” un poco más pronunciado y una “espalda” un poco más grande.

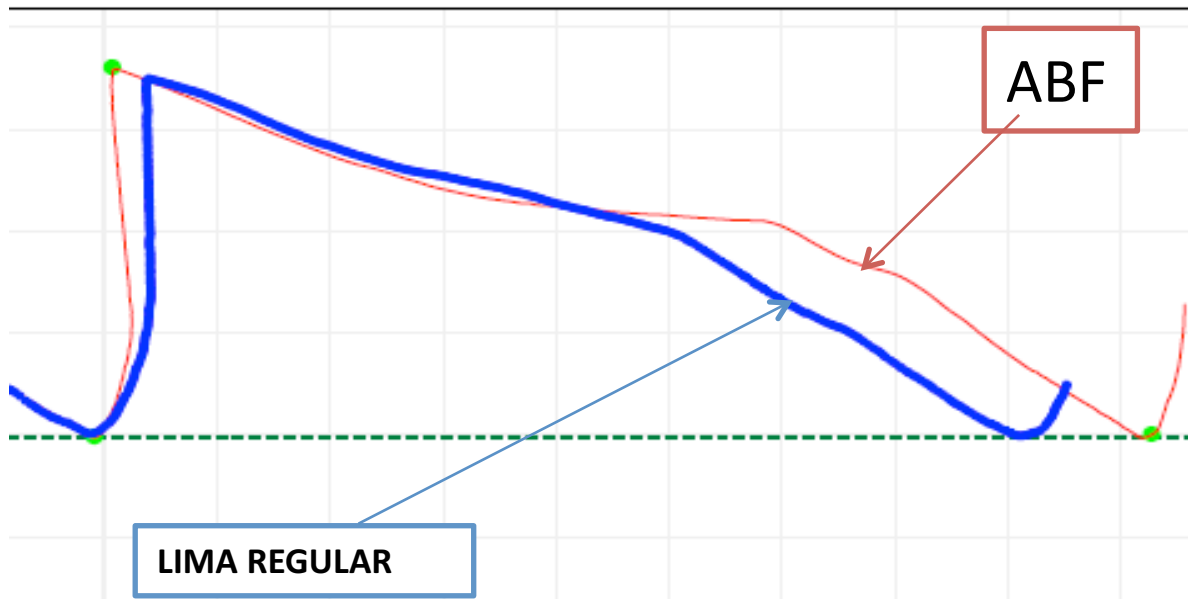


Imagen 56. Comparativo de el perfil de el diente de la lima entre la ABF y una lima regular de la producción.

En la Imagen 57 se observa una fotografía tomada a la lima perpendicular a su plano de trabajo, donde podemos observar el tamaño y la cantidad de dientes que se tienen en una misma área.

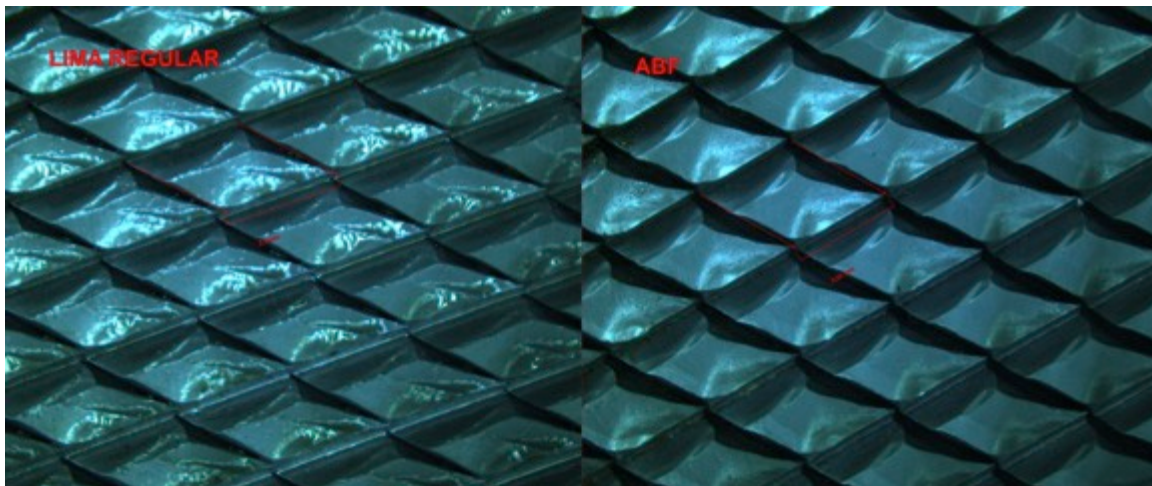


Imagen 57. Comparativo de fotografía superior entre una lima ABF y una común.

Se observa cómo hay una menor cantidad de dientes (corroborando lo analizado en el perfil del diente donde observábamos que el diente tenía un mayor tamaño).

Para el lado lima los resultados en tribómetro son un poco más consistentes, permitiendo realizar ciertos ensayos para verificar las pruebas de campo. Se realiza una prueba a 50 ciclos para observar la cantidad de remoción y comparar con limas normales de lotes de producción comunes. En la Imagen 58 se tienen los resultados de dicha prueba.

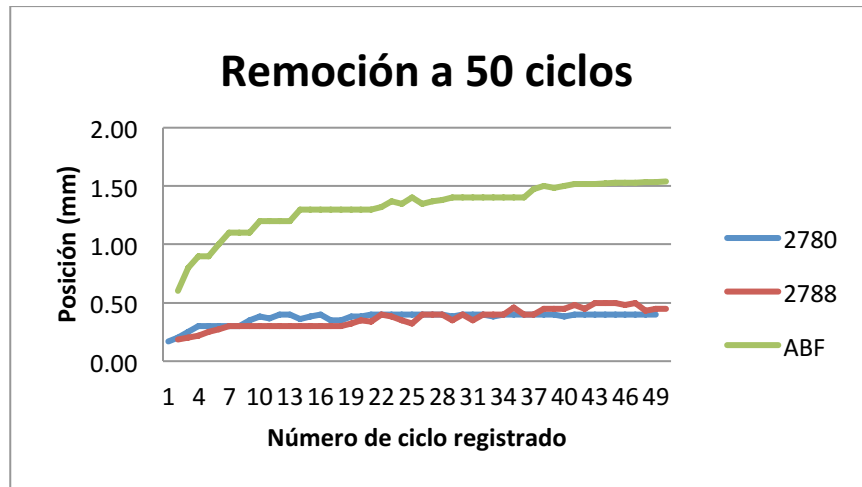


Imagen 58. Prueba de tribómetro de remoción. Cantidad removida de probeta vs ciclos.

Se puede observar cómo la lima ABF tiene un desempeño muy superior a las limas normales del proceso de producción, casi cuadruplicando la cantidad removida de las limas normales en la misma cantidad de ciclos.

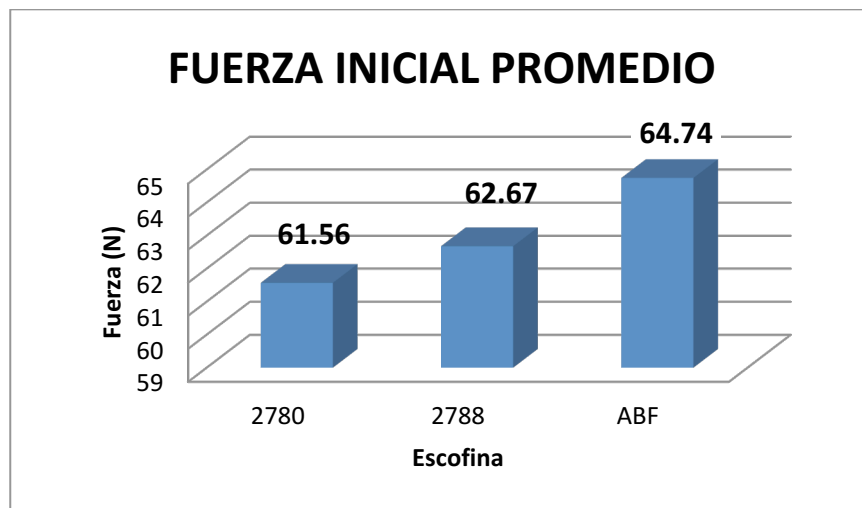


Imagen 59. Fuerza inicial promedio de los primeros 50 ciclos de corte.

En la Imagen 59 se observa cómo se tiene una fuerza mayor en la remoción para la lima ABF, esto es natural debido a que la cantidad de material removido por ciclo de la lima ABF es muy superior a aquel de las limas estándar de la producción, y a pesar de remover 4 veces más material, la fuerza promedio es tan sólo un poco superior (4.9%) a el de las limas normales.

También se realizan pruebas de microestructura y microdureza para corroborar que el proceso de producción de estas limas no hubiera estado alterado de alguna manera diferente al de los lotes de producción normales. Las especificaciones de microdureza y composición de microestructura salieron de acuerdo a los estándares establecidos de producción como normales. En la Tabla 14 se pueden observar los valores obtenidos para microdureza (HV) y dureza superficial (15N) de la lima ABF. Comparando estos valores con los obtenidos durante la previa caracterización realizada a las escofinas al principio del proyecto se observa que todo está en orden.

Tabla 14. Valores de microdureza (HV0.2) y dureza superficial obtenidos de la escofina ABF

LOTE:	ABF 2			
FECHA:	22/09/2015		Hv	15N
Centro	8	aleatorio	548.2	86.5
	9	aleatorio	465.6	83.7
	10	aleatorio	519.4	85.7
Lima	11	100 μm	754.2	91.2
	12	200 μm	720.4	90.7
	13	350 μm	657.1	89.4
	14	500 μm	681.9	89.9
	15	z ataque	845.0	92.3
	16	z ataque	748.8	91.1
	17	z ataque	864.4	92.5
	*	Capa dura (μm)	63.63	

En la Imagen 60 se observa la fotografía tomada para análisis metalográfico y donde se pueden ver las marcas del análisis de microdureza realizado a la muestra tomada de la lima ABF. Como se menciona anteriormente, todo está dentro de los valores normales de la producción, no existe nada atípico en los resultados obtenidos de estas pruebas, dando una tranquilidad en que los cambios realizados en la geometría y disposición de los dientes de la lima sí fueron los causantes de los resultados positivos obtenidos durante las pruebas tanto de campo como de laboratorio en el tribómetro.

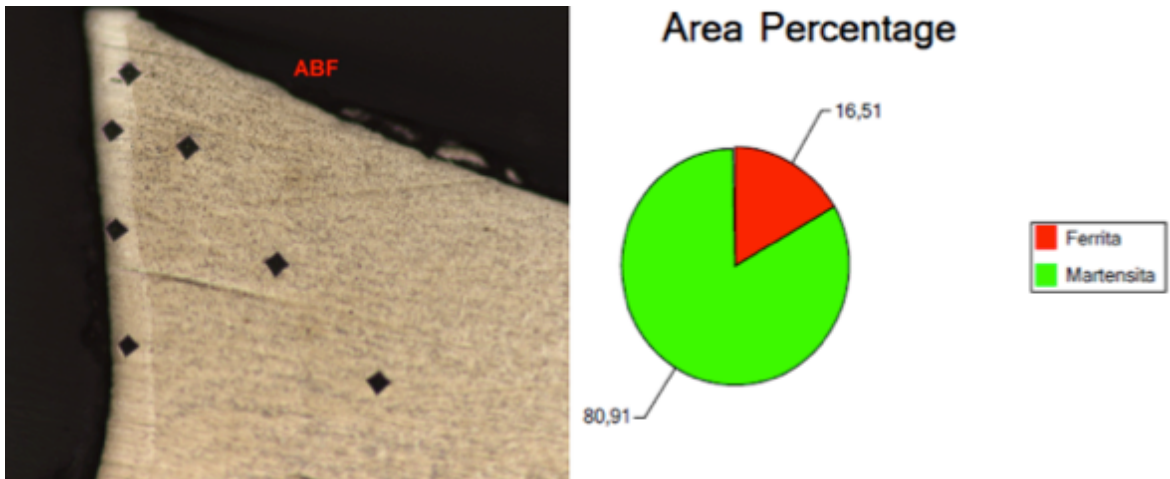


Imagen 60. Imagen de corte para metalografía con aumento de 100x de la lima ABF y porcentaje de composición de microestructura (Area Percentage: Porcentaje de área).

También se realizan pruebas de clogging para las limas ya que este es un problema recurrente en las limas y afecta negativamente el desempeño. El clogging o embotamiento ocurre cuando se queda pegado o atascado material que se está removiendo entre los dientes de la lima reduciendo el desempeño de la misma, debido a que el nuevo material que se está cortando no tiene para donde evacuar, tapando la geometría del diente.

Para esta prueba se somete la lima a una serie de cortes y se mide su peso antes y después de estos. Se requiere de una balanza con una precisión muy alta (2 cifras decimales de gramos, 0.01 gramos) debido a que las cantidades de material que se queda pegado a la lima es poco, pero puede alterar significativamente su desempeño.

En la Imagen 61 se observan los resultados que se obtienen en la prueba de clogging, la cual se le realiza a las 4 limas que mejor desempeño tienen, y, a una lima estándar del proceso de producción. La lima que mejor desempeño presenta en este campo es la DF, seguida por la ADF. La DF tiene un desempeño muy superior a todas las otras, pero la ADF obtiene mejores resultados en las pruebas de campo y de laboratorio en desempeño de el corte. El clogging no es la única variable a considerar para evaluar el desempeño total de la lima. La ADF tuvo un resultado superior a la lima estándar de la producción.



Imagen 61. Resultados de la prueba de clogging en varias limas, en el eje Y está el peso adicional en gramos.

Por último, se puede observar en la Imagen 62, un par de fotografías de un casco acabado con una lima ABF y con una lima regular. El herrador asegura que tiene mucho mejor acabado superficial los cascos acabados con la lima ABF.



Imagen 62. Comparación de acabado superficial de el casco de el caballo con una lima ABF y una lima normal.

Esto se puede corroborar con las pruebas de rugosidad Ra dadas en micrómetros, en las cuales se mide la rugosidad de las mejores limas y de una lima normal del proceso de producción, en la Tabla 15 se pueden observar los resultados de las pruebas. Al mirar el último valor de cada referencia se ve el promedio de varias mediciones realizadas. Entre menor sea el valor en la medición, mejor es el resultado, puesto que estas mediciones lo que indican es la distancia que hay entre los puntos más altos y los puntos más bajos en una superficie.

Como se puede observar, los mejores resultados los tienen la lima ABF y la lima DF. Ambos resultados muy superiores a la lima estándar y a las otras limas, esto indica una mejoría significativa en el acabado superficial que se obtiene después de usar la herramienta.

Tabla 15. Resultados de mediciones de rugosidad para las mejores 4 limas y una estándar en micrómetros. El último valor es el promedio.

Referencia				
ABD	ABF	DF	BDE	Patrón
17.3	8.2	5.3	9	16
17.1	7.5	5.3	13.4	15.9
11.1	6.3	5.5	10.4	13.7
17.5	6.7	4.8	9.5	16.4
15.7	6.9	4.7	10.7	15.1
14.9	6.7	4.3	7.5	
15.60	7.05	4.98	10.08	15.42

La lima ABF obtiene buenos resultados en todos los campos en los que fue medido su desempeño. Los comentarios de los herradores son muy positivos, y en la prueba de campo, se deja al herrador para que la probara, al hacer una revisión con el herrador, había herrado 50 caballos y la lima continuaba desempeñándose muy bien.

Debido a que no se tiene una forma sólida y confiable de cuantificar el desempeño con un valor, y a los muy buenos resultados que se obtienen con la lima ABF, la empresa toma la determinación de adoptar esta lima y no tratar de cuantificar el desempeño para ingresar los valores al software de diseño de experimentos.

6. Conclusiones

En el caso del lado raspa, los resultados de todas las pruebas, debido a la variabilidad de todos los procesos y sistemas de medición de desempeño, tanto como la subjetividad a la que están sujetas las apreciaciones de los herradores en las pruebas de campo, no se pudo obtener evidencia sólida y datos concluyentes para definir si hubo o no una mejora en cualquiera de las posibles combinaciones de cambios que se realizan sobre los productos.

Cabe anotar que hay ciertas muestras de las escofinas que presentan una mejoría notable con respecto a las escofinas patrón, pero estos resultados no se logran replicar. En la Tabla 16 se observan los valores actuales y los sugeridos, según la escofina que mejores comentarios y desempeño logra obtener a pesar de no haberse podido reproducir, para las variables involucradas.

Tabla 16. Valores actuales y valores sugeridos para las variables de producción en las escofinas (Lado raspa).

Variable	Actual	Sugerido
A (Ángulo de la cabeza de el buril)	27	30
B (Ángulo de la calza de la máquina punzonadora)	17	19
C (Altura de el diente en milésimas de pulgada)	50	45

Para solucionar este problema, como se menciona durante los resultados de las pruebas, se deben realizar primero estudios, y mejoras en los procesos de producción para obtener una estandarización y una reproducibilidad más alta en el producto y su desempeño.

Una vez estandarizados los procesos de producción se pueden repetir las pruebas y estudiar los resultados y la reproducibilidad de los resultados, para

así, poder obtener datos más sólidos y concluyentes acerca de los posibles efectos de los cambios realizados sobre las escofinas.

Para el caso del lado lima, hay datos más concluyentes y más robustos acerca del desempeño de las herramientas.

Conclusiones que determina Heller sobre el lado lima:

La escofina ABF es la elegida entre las 16 muestras evaluadas.

La escofina ABF es la que presenta una mayor longevidad con respecto a nuestra escofina regular.

La escofina ABF presenta un mejor acabado con respecto a la escofina regular

La escofina ABF se encuentra en el segundo lugar en menor clogging.

La lima ABF mejora en todos los aspectos a los cuales se les puede hacer una medición objetiva de desempeño, tanto en pruebas de laboratorio como en pruebas de campo. Los resultados se pueden reproducir tanto en laboratorio como en las pruebas de campo y los resultados concuerdan.

Esto conlleva a tomar la decisión mencionada anteriormente de modificar la producción y establecer los parámetros encontrados en la lima ABF para todas las limas.

En la Tabla 17 están los valores actuales para las limas, y los valores sugeridos a partir de los resultados de los ensayos.

Tabla 17. Valores actuales y valores sugeridos para las variables de producción en las limas.

Variable	Actual	Sugeridos
A (Ángulo lado Superior)	15	20
B (Ángulo lado Inferior)	35	40
C (Ángulo cincel 1)	14	12
D (Ángulo cincel 2)	34	32
E (Paso lado superior)	12	10
F (Paso lado inferior)	8	9

Es importante resaltar que el mayor aporte es la metodología de trabajo para que Heller pueda seguir mejorando sus productos.

7. Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio a profundidad sobre la producción y como lograr una estandarización y una reproducibilidad mas alta en el proceso productivo, ya que si no hay confiabilidad en que los productos siempre van a salir iguales, o dentro de unos rangos de variabilidad tolerables, no se podrá medir con certeza el desempeño y saber si los cambios fueron positivos o negativos debido a la variabilidad misma de la producción.

Es ideal que se establezcan varios de los ensayos y varios de los procesos para medición diseñados (Microscopía, medición de ángulos, prueba en tribómetro convencional y digital) para el departamento de control de calidad y poder así llevar un registro de las variables importantes para el desempeño.

8. Agradecimientos

El autor agradece a la empresa Heller International S.A por su cofinanciación, colaboración, disposición, recursos físicos y humanos para la realización de este proyecto. Y a la Universidad EAFIT por la cofinanciación del proyecto “Análisis de la geometría óptima de los dientes de la escofina para cascos equinos” en colaboración con Heller International S.A.

Bibliografía

- Althoff, N. (2009). *Patent No. US 2009/0205844*. USA.
- American Society of Mechanical Engineers. (1980). *Wear Control Handbook*. American Society of Mechanical Engineers.
- Ashtakov, V. P. (2010). *Geometry of single point turning tools and drills: Fundamentals and practical applications*. Springer.
- Gorczyca, F. E. (1978). *APPLICATION OF METAL CUTTING THEORY*. North Dartmouth, Massachusetts, USA: INDUSTRIAL PRESS INC.
- Haugaard, A. (2008). *Patent No. US 2008/0003066 A1*. USA.
- J. MC KITTRICK, P.-Y. C. (2012). The Structure, Functions, and Mechanical Properties of Keratin. *JOM* .
- Jones, J. C. (2012). *Patent No. US 2012/0230783 A1*. USA.
- Kishawy, A. H. (5 de November de 2013). On the Optimized Design of Broaching Tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering | Volume 136 | Issue 1 |* .
- Kobayashi, A. (1981). *Machining of Plastics*. R.E. Krieger Pub. Co; updated & corrected edition.
- Michael Ashby, H. S. (2009). *Materials: engineering, science, processing and design*. Butterworth-Heinemann.
- S. N. COLLINS, B. C. (1998). Stiffness as a function of moisture content in natural materials: Characterisation of hoof horn samples. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* (33).
- Tomlinson, W. J. (2009). *Patent No. US 7628216 B2*. USA.
- Valls, R. F. (1967). *Herramientas de Corte*. Ediciones Ceac.
- Walker, S. H. (2006). *Patent No. US 2008/0251262 A1*. USA.
- Whyde, G. J. (1986). *Patent No. 4598447*. USA.