

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

Comparación técnico-económica de diferentes tecnologías de corte aplicables a la separación de coladas y mazarotas de aluminio A319 correspondientes a fundiciones para monoblocks 4, 6 y 8 cilindros.

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADEMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS DE
MANUFACTURA**

POR:

LEOPOLDO ALEJANDRO MORALES SÁNCHEZ

MONTERREY, N. L.

MARZO 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que el presente proyecto de tesis presentado por el Ing. Leopoldo Alejandro Morales Sánchez sea aceptado como requisito parcial para obtener el grado académico de:

**Maestro en Ciencias con Especialidad en
Sistema de Manufactura**

Comité de Tesis:

Dr. Mario Alberto Martínez Hernández

Asesor

Dr. Jorge Armando Cortés Ramírez

Sinodal

Dr. Ciro Ángel Rodríguez González

Sinodal

APROBADO:

Dr. Federico Viramontes Brown

Director del Programa de Graduados en Ingeniería y Arquitectura

Mayo, 2005

Prefacio

Cuando el Señor creo el mundo y las personas para vivir en él – obra que de acuerdo a la ciencia moderna, llevó mucho tiempo- podría muy bien imaginarme que razonó para sí de la siguiente manera: “ Si hago todo predecible, estos seres humanos, a los que he dotado de cerebros bastante buenos, indudablemente aprenderán a predecirlo todo, y por lo tanto no tendrán aliciente para hacer nada, porque reconocerán por el futuro es totalmente determinado y en él no puede influir ninguna acción humana. Por otra parte, si todo lo ago impredecible, gradualmente descubrirían que no hay base racional para ninguna decisión y por lo tanto, como en el primer caso, no tendrán motivos para hacer nada. Ninguno de estos dos proyectos tiene sentido. Crearé, por lo tanto, una mezcla de los dos. Que unas cosas sean predecibles y otras impredecibles. Tendrán entonces, entre muchas otras cosas, la importante tarea de saber cuál es cual.

E.F. Schumacher

Agradecimientos

A mi esposa Mayela e hijas Natalia y Paola, por su comprensión y espera durante el tiempo que este documento tomó para su realización.

A mi Padre José María que aunque ya no está conmigo, ha sido para mí un ejemplo y en quien pienso en todo momento en sus virtudes y sus enseñanzas.

A mi madre que es ejemplo de fortaleza y entereza en los momentos más difíciles.

Hay hombres no comunes que han dejado huella en mi desarrollo e inspiración profesional que me han motivado a superarme. Gracias Onofre por apoyarme al término de mis estudios, definitivamente tu ayuda no fue casual ni pasajera, fue del corazón y para siempre. A ti Jorge Cárdenas por haberme impulsado e instruido en el ámbito profesional y académico desde los inicios de mis estudios de maestría.

A mi Jefe José Luis por ser el inspirador del tema de esta tesis, por tu comprensión y respeto.

A Frank Gressen de Wikus Sägenfabrik GmbH por su incondicional ayuda al participarme información técnica.

A Makoto Nakasawa, Toshihiko Yamamoto y Kaoru Ichihashi de Shiga Yamashita por ayudarme en la realización de las pruebas de corte con disco en Yokaischi Japón.

A Christopher Downing y Guillermo Ortega de Flow International por prestarme su laboratorio para la realización de pruebas de corte por maquinado hidroabrasivo en Seattle Wa.

A mi asesor de tesis Mario Martínez por su constante guía y énfasis en el seguimiento de la metodología empleada.

A mis sinodales Jorge Cortés y Ciro Rodríguez y por su oportuna retroalimentación.

A Nematik S. A. por financiar los envíos de piezas, viáticos requeridos para la realización de las pruebas .

Índice

Página

Prefacio	i
Agradecimientos	ii
Índice	iv
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	xi
I. Antecedentes	1
II. Definición del Problema	2
III. Justificación	4
IV. Objetivo	5
V. Hipótesis	5
VI. Marco Teórico	
A. Corte mediante sierra de banda y disco	7
B. Corte por maquinado Hidroabrasivo	8
VII. Metodología	10
VIII. Contribuciones esperadas	11
IX. Tecnologías existentes de aserrado de fundiciones del aluminio	
A. Aserrado por banda	
i. Introducción	12
ii. Tipos de sierras de banda	15
iii. Herramienta y parámetros de corte	16

iv. Ajustes_____	18
B. Aserrado por disco	
i. Introducción_____	20
ii. Tipos de sierras de disco_____	21
iii. Herramienta y parámetros de corte_____	22
iv. Ajustes_____	23
X. Corte por Maquinado Hidroabrasivo y su aplicación en aluminio	
A. Introducción_____	25
B. Historia_____	26
C. Alcances del proceso corte hidroabrasivo_____	26
D. Usos y ventajas_____	28
E. Limitaciones_____	28
F. Fundamentos_____	29
G. Variaciones del proceso_____	31
H. Equipo_____	32
I. Consumibles_____	33
J. Accesorios del equipo_____	34
K. Aplicaciones_____	34
L. Consideraciones de Seguridad_____	35
XI. Áreas de corte características de Blocks I-4, V6 y V8's_____	36
XII. Diseño de experimentos factorial 2³ para la vida útil de una banda de carburo de tungsteno.	
A. Introducción._____	41

B. Diseño Experimental Factorial 2 ³ - Vida de útil de la cinta de la cinta de carburo de tungsteno	42
C. Efectos principales	46
D. Efecto de las interacciones	50
E. Interpretación de resultados	55
XIII. Impacto de la arena en la banda con dientes de carburo de tungsteno	56
XIV. Planeación y ejecución de pruebas	
A. Corte de disco	
i. Prueba	61
ii. Proceso de corte y preparativos	62
iii. Ejecución	66
B. Maquinado hidroabrasivo	
i. Prueba	68
ii. Proceso de corte y preparativos	70
iii. Ejecución	71
XV. Resultados de pruebas	
A. Corte de disco	73
B. Maquinado hidroabrasivo	77
XVI. Comparativo costos.	
A. Análisis de Costo del corte por producto mediante Sierra Banda	85
B. Análisis de costo del corte por producto resultante mediante disco de diamante	87

C. Análisis de costo del corte por producto resultante mediante maquinado hidroabrasivo	89
D. Análisis de costo del corte por producto del sistema de corte híbrido.	92
XVII. Conclusiones	94
XVIII. Referencias	97
XIX. Tabla de Indicadores	100
XX. Terminología	101

Índice de figuras

	Página
Figura 1. Arena incrustada en el canal de corte de la colada en Block DC_____	3
Figura 2. Modelos de fundiciones de aluminio para motores V8, V6 e I-4_____	4
Figura 3. Sierra de banda Vertical August Mossner Modelo B801 y sus partes._	13
Figura 4. Arreglo de sierra banda y corte en sección_____	14
Figura 5. Grafico de los diferentes tipos de máquinas Sierra banda_____	15
Figura 6. Partes principales de la banda de corte_____	16
Figura 7. Figura de las cuatro variables interrelacionadas_____	17
Figura 8. Arreglo de guía, roller y cinta de carburo de tungsteno_____	19
Figura 9. Corte por disco_____	20
Figura 10. Arreglo de tipos de sierras de disco_____	21
Figura 11. Sierra de disco robotizado de 7 grados de libertad_____	22
Figura 12. Disco con insertos cementados de diamante_____	23
Figura 13. Sistema de Generación del por el chorro hidroabrasivo_____	30
Figura 14. Perfil de corte producido por el Chorro Abrasivo_____	31
Figura 15. Boquilla de corte_____	33
Figura 16. Áreas de corte mazarota y colada para Block Ford I-4 2.3 Lts_____	37
Figura 17. Áreas de corte mazarotas y colada para Block DC V6 3.5 Lts_____	38
Figura 18. Áreas de corte mazarotas y colada para Block GM V8 5.3 Lts_____	39
Figura 19. Áreas de corte mazarotas y colada para Block Ford V8 4.6 Lts_____	40
Figura 20. Representación geométrica del la región experimental y su transformación de coordenadas_____	44
Figura 21. Representación geométrica del diseño experimental y resultado de las pruebas_____	47
Figura 22. Representación geométrica de los efectos principales para el avance_____	48
Figura 23. Representación geométrica de los efectos principales para la velocidad_____	49
Figura 24. Representación geométrica de los efectos principales para la cantidad de arena_____	50

Figura 25. Representación de la iteración de dos factores entre avance y cantidad de arena	51
Figura 26. Representación de las iteraciones de dos factores a) Avance – Velocidad, b) Avance – Cantidad de Arena, c) Velocidad - Cantidad de Arena.	53
Figura 27. Consumo de Cintas Colada y Mazarota en Blocks GM	56
Figura 28. Consumo de Cintas Colada y Mazarota en Blocks Ford I4	57
Figura 29. Relaciones de áreas de corte en Mazarota por producto y rendimientos en mm ²	58
Figura 30. Relaciones de áreas de corte en Colada por producto y rendimientos en mm ²	60
Figura 31. Pasos de para el corte de un Block I-4 mediante Disco	63
Figura 32. Pasos de corte de un Block GM V8 5.3 Lts por Disco.	64
Figura 33. Sierra de Disco Shiga Yamashita Modelo NMK-0228 y fixture con Block Ford 4.6 Lts montado	66
Figura 34. Sierra de Disco Shiga Yamashita Modelo NMK-0228 y fixture con Block GM 5.3 Lts montado	67
Figura 35. Maquina para maquinado Hidroabrasivo de 3 ejes Marca Flow modelo 4800	69
Figura 36. Pasos de requeridos para el corte de un Block Ford V8 4.6 Lts mediante maquinado hidroabrasivo	70
Figura 37. Secuencia de prueba para el corte de un Block I-4, V8 mediante maquinado hidroabrasivo	72
Figura 38. Cortes en Block V8 Ford 4.6 Lts mediante disco de diamante	73
Figura 39. Medición de la variación del corte del Block V8 Ford 4.6 Lts después del corte por disco de diamante	74
Figura 40. Cortes de Mazarota y colada en Block Ford I-4 2.3 Lts mediante maquinado hidroabrasivo	77
Figura 41. Cortes de Mazarota y colada en Block GM V8 5.3 Lts mediante maquinado hidroabrasivo	77

Figura 42. Cortes de Mazarota y colada en Block Ford V8 4.6 Lts mediante maquinado hidroabrasivo _____	78
Figura 43. Cortes de colada en Block V6 DC 3.5 Lts mediante maquinado hidroabrasivo. _____	78
Figura 44. Relación exponencial del avance versus el incremento de espesor en Aluminio A319 para diamantes de 14, 16 y 18 milésimas de diámetro _____	79
Figura 45. Modelo de costeo general aplicado para el análisis de costos. _____	84

Índice de tablas

	Página
Tabla 1. Tabla de capacidades del corte con disco de diamante_____	24
Tabla 2. Velocidades de corte para varios materiales mediante el corte por Maquinado Hidroabrasivo_____	27
Tabla 3. Variables y niveles para estudio de vida útil de la cinta_____	43
Tabla 4. Condiciones experimentales y resultados para un diseño Factorial 2 ³ . _ _____	45
Tabla 5. Comparaciones individuales de los efectos principales para el Avance _____	46
Tabla 6. Efectos de las variables a un intervalo de confianza del 95% para el Diseño factorial 2 ³ Vida de la Cinta_____	54
Tabla 7. Relación de áreas de corte versus vida de la cinta en corte de mazarotas _____	57
Tabla 8. Relación de áreas de corte versus vida de la cinta en corte de coladas _____	59
Tabla 9. Concentración de Arena en gr/cm ² en el canal de corte de la colada_ _____	60
Tabla 10. Datos de la medición de la variación del corte del Block V8 Ford 4.6 Lts después del corte por disco de diamante_____	75
Tabla 11. Resultados de pruebas de corte con disco con insertos de diamante_ _____	76
Tabla 12. Relación de avance y espesor permisible utilizando boquillas con diamante de 14, 16 y 18 milésimas de diámetro_____	79
Tabla 13. Desglose de los avances permisibles y tiempos obtenidos con relación a los espesores utilizando una boquilla de 18 milésimas_____	80
Tabla 14. Resultados de pruebas de corte con maquinado Hidroabrasivo en mazarota_____	81
Tabla 15. Resultados de pruebas de corte en con maquinado Hidroabrasivo en colada_____	82

Tabla 16. Comparativo de costo integrado del corte de Blocks mediante corte por banda de carburo de tungsteno_____	85
Tabla 17. Comparativo de costo integrado del corte de Blocks mediante corte por disco con inserto de diamante_____	87
Tabla 18. Desglose de los avances permisibles y tiempos obtenidos con relación a los espesores para la obtención del ciclo utilizando 4 boquillas por mazarota_	88
Tabla 19. Comparativo de costo integrado del corte de Blocks mediante Maquinado Hidroabrasivo con boquilla de 18 milésimas._____	90
Tabla 20. Comparativo de costo integrado del corte de Blocks Sistema Híbrido_	93

I. Antecedentes.

En la actualidad, los procesos de corte más comúnmente utilizados para la separación de materiales en la industria son; sierra motorizada, sierra circular, corte por cizalla, disco abrasivo, oxicorte, troceado, maquinado por chisporroteo, corte por láser y corte por chorro de agua (WaterJet) [1, 2, 3, 4]. Todos estos procesos difieren por naturaleza en sus desempeños tales como; precisión, rugosidad, velocidad, costo, capacidad de penetración, y de ahí se establece la base para su aplicación adecuada y económica en la industria.

Por otro lado los proveedores directos de la industria automotriz de primer nivel, ante un ambiente agresivo se ven envueltos en la constante tarea de buscar alternativas que les permitan tener ventaja competitiva por encima de sus competidores más cercanos, especialmente en aquellos procesos de fabricación en los que es importante controlar la variación y vida de las herramientas, por los costos operativos y de mantenimiento que éstos pueden implicar. Los nuevos desarrollos y avances de la tecnología de punta permiten tener mejores desempeños de las herramientas, rendimientos de los equipos, así como una manufactura más personalizada con el uso adecuado de recursos, y esto se transfiere finalmente a una reducción en costo [5].

La industria de la fundición de alto volumen enfocada a proveer a la industria automotriz cabezas y blocks de aluminio como lo es Nematik S.A, una empresa make to stock (MTS) especialista en ese ramo y proveedora de Ford, Daimler Chrysler y General Motors, cuenta con el proceso de corte de sierra cinta para la separación de mazarotas y coladas de sus fundiciones, para sus versiones de Blocks I4, V6, y V8, siendo éste proceso de manufactura uno de los de mayor costo operativo en la producción de blocks por el elevado consumo de cintas de corte.

A pesar de los esfuerzos que la compañía ha realizado en disminuir sus costos por consumos de cintas mediante negociaciones, pruebas y calibraciones de máquina, han encontrado, basado en mediciones, que las condiciones de la fundición tiene un impacto alto en la vida de la herramienta de corte tal que, aunque el equipo se encuentre en la mejor de las condiciones, la acumulación de arena incrustada en el canal de corte disminuye más de un 50% la vida útil de la cinta con dientes de carburo de tungsteno.

Por lo anterior, hay la inquietud de investigar y probar una diferente tecnología de corte con el fin de implementar, en el futuro, un proceso de corte diferente y capaz de absorber las discrepancias del proceso de moldeo, tales como la incrustación de arena ocasionada por la penetración del aluminio en un molde erosionado o mal compactado, que sea menos susceptible a la presencia rebaba producida por herramientas desgastados, que tenga elementos expuestos a desgaste para que permita mayor estabilidad del proceso a largo plazo, y que el costo integral resultante del proceso de corte, sea menor al que se obtiene al cortar mediante sierra cinta.

II. Definición del Problema.

Existen dos procesos de moldeo, molde de arena y molde semipermanente, utilizados en la compañía para manufactura de fundiciones. El primero, que es utilizado para la manufactura de monoblocks de aluminio, requiere del control de muchos factores para la obtención de moldes completos y tersos con el fin de que la fundición resultante adquiera paredes suaves, sea fácil de cortar y limpiar.

Los factores que tienen una mayor correlación con el problema de molde erosionado, que son la causa de arena incrustada en los monoblocks, son [7]:

A pesar de los esfuerzos que la compañía ha realizado en disminuir sus costos por consumos de cintas mediante negociaciones, pruebas y calibraciones de máquina, han encontrado, basado en mediciones, que las condiciones de la fundición tiene un impacto alto en la vida de la herramienta de corte tal que, aunque el equipo se encuentre en la mejor de las condiciones, la acumulación de arena incrustada en el canal de corte disminuye más de un 50% la vida útil de la cinta con dientes de carburo de tungsteno.

Por lo anterior, hay la inquietud de investigar y probar una diferente tecnología de corte con el fin de implementar, en el futuro, un proceso de corte diferente y capaz de absorber las discrepancias del proceso de moldeo, tales como la incrustación de arena ocasionada por la penetración del aluminio en un molde erosionado o mal compactado, que sea menos susceptible a la presencia rebaba producida por herramientas desgastados, que tenga elementos expuestos a desgaste para que permita mayor estabilidad del proceso a largo plazo, y que el costo integral resultante del proceso de corte, sea menor al que se obtiene al cortar mediante sierra cinta.

II. Definición del Problema.

Existen dos procesos de moldeo, molde de arena y molde semipermanente, utilizados en la compañía para manufactura de fundiciones. El primero, que es utilizado para la manufactura de monoblocks de aluminio, requiere del control de muchos factores para la obtención de moldes completos y tersos con el fin de que la fundición resultante adquiera paredes suaves, sea fácil de cortar y limpiar.

Los factores que tienen una mayor correlación con el problema de molde erosionado, que son la causa de arena incrustada en los monoblocks, son [7]:

1 El tipo de arena: Un grano muy fino distribuido en el molde tiene un efecto significativo que influyen la erosión y las propiedades del corazón, generalmente con arena muy fina se reduce la resistencia.

2 Aditivos de la arena: Los niveles de las resinas y químicos en combinación con la arena, tienen un efecto negativo en erosión del molde.

3 Variaciones en la temperatura de vaciado del metal y tiempo de llenado, muestran un efecto muy grande en la erosión del corazón.

4 La cantidad de la amina y su composición son factores de control para las propiedades del molde y son factores significantes en la reducción de la erosión.

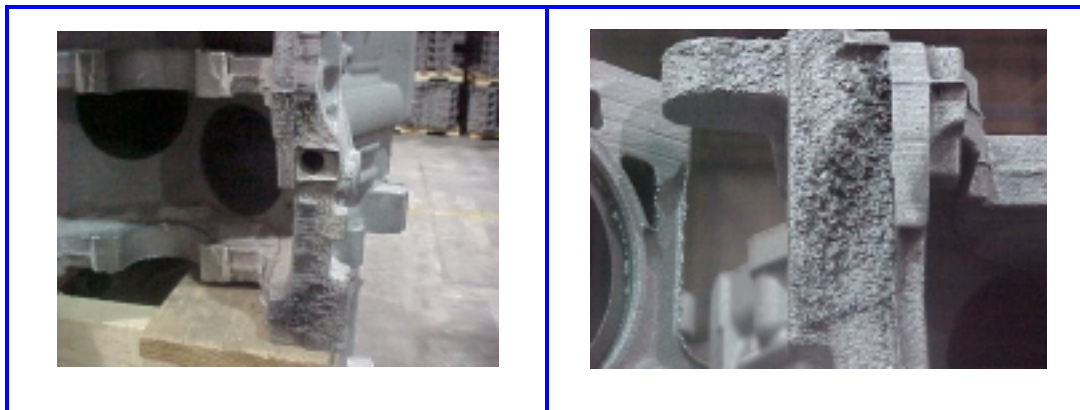


Figura 1. Arena incrustada en el canal de corte de la colada en Block DC.

Por otro lado, un mal control del ensamble de los moldes de arena aunado a las posibles combinaciones entre herramientas existentes y desgaste entre ellos, dan lugar a un ensamble disconforme, que después de vaciado y posterior a la solidificación de la aleación, se presenta apertura de moldes provocando así rebabas entre las líneas de partición.

Ante tales circunstancias, el desempeño del proceso de corte por sierra cinta es disminuido por las condiciones de arena incrustada (ver la figura 1) y las rebaba a su vez, ocasionan un desgaste prematuro y no uniforme de la sierra cinta de carburo de tungsteno [6], desgaste en las guías de acero, daños

en soportes, rompimiento de la banda, baja disponibilidad de la línea y corte fuera de tolerancia, traduciéndose todo esto en un costo de operación elevado.

En la figura 2, se pueden apreciar los 4 modelos de productos: block General Motors V8 5.3 litros, Ford V8 4.6 litros, Daimler Chrysler V6 3.5 litros y Ford I-4 2.3 litros respectivamente.

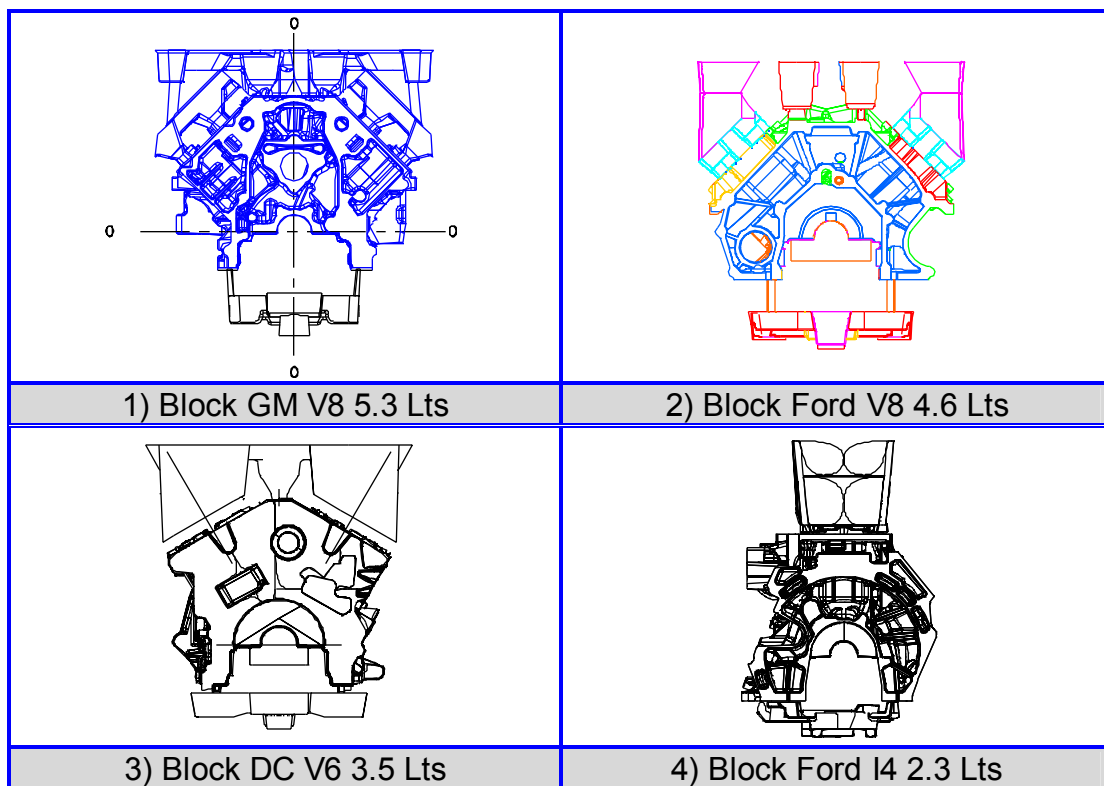


Figura 2. Modelos de fundiciones de aluminio para motores V8, V6 e I-4.

III. Justificación.

Las configuraciones de layout para poder cortar cualquiera de los productos mencionados GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, DC V6 3.5 Lts y Ford I -4 2.3 Lts (Figura 2) requiere 2 sierras, un robot para la carga y descarga, transportador palletizado de entrada, transportador motriz de salida, gripper

en soportes, rompimiento de la banda, baja disponibilidad de la línea y corte fuera de tolerancia, traduciéndose todo esto en un costo de operación elevado.

En la figura 2, se pueden apreciar los 4 modelos de productos: block General Motors V8 5.3 litros, Ford V8 4.6 litros, Daimler Chrysler V6 3.5 litros y Ford I-4 2.3 litros respectivamente.

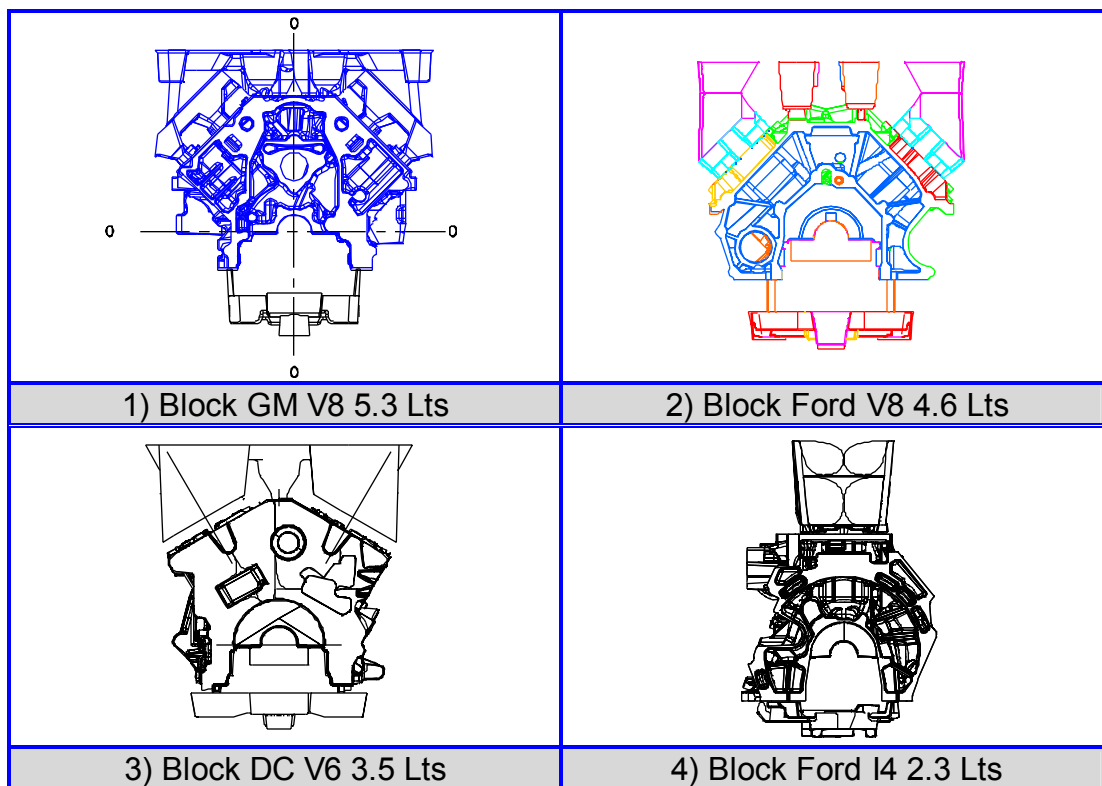


Figura 2. Modelos de fundiciones de aluminio para motores V8, V6 e I-4.

III. Justificación.

Las configuraciones de layout para poder cortar cualquiera de los productos mencionados GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, DC V6 3.5 Lts y Ford I -4 2.3 Lts (Figura 2) requiere 2 sierras, un robot para la carga y descarga, transportador palletizado de entrada, transportador motriz de salida, gripper

para robot, fixtures de sujeción del casting para corte, integración y programación como equipo, de tal forma que, para poder cortar a un ritmo de 60 Blocks por hora se requiere de una inversión de alrededor de 1.8 millones de dólares y tiene un costo operativo por consumo bandas de alrededor \$225,000 dólares promedio al año por producto. Cabe mencionar, que el costo del corte promedio es de alrededor de \$1.30 dólares por block promedio y se estimó, originalmente, tener un costo no mayor a \$0.60 centavos de dólar.

IV. Objetivo.

El objetivo de este trabajo es llevar acabo una comparación técnica y económica que refleje relación del costo beneficio de cada uno de diferentes tecnologías aplicables para el corte de mazarotas y coladas de Blocks de aluminio. Para ello, se deberán identificar los indicadores mesurables que permitan comparar en términos de costo por unidad para cada uno de los productos.

V. Hipótesis.

Es posible aplicar un proceso de corte diferente al utilizado actualmente, para la separación de mazarotas y coladas, que dé como resultado un costo operativo menor al que se logra con el proceso de corte por sierra banda. Entre estas están: la tecnología de Maquinado Hidroabrasivo (Abrasive WaterJet) y el Aserrado de Disco con inserto cementado de diamante. La primera, es una tecnología reciente que se ha implementado en Europa en fundiciones de aluminio para la separación de coladas y mazarotas, que demostró ser una alternativa segura, flexible y económica. La segunda, es un antiguo método de corte de metales que recientemente ha revolucionado con la adhesión de materiales muy resistentes a la abrasión a los dientes de un disco muy delgado de corte que permite cortar a velocidades de hasta 5500 metros por minuto.

para robot, fixtures de sujeción del casting para corte, integración y programación como equipo, de tal forma que, para poder cortar a un ritmo de 60 Blocks por hora se requiere de una inversión de alrededor de 1.8 millones de dólares y tiene un costo operativo por consumo bandas de alrededor \$225,000 dólares promedio al año por producto. Cabe mencionar, que el costo del corte promedio es de alrededor de \$1.30 dólares por block promedio y se estimó, originalmente, tener un costo no mayor a \$0.60 centavos de dólar.

IV. Objetivo.

El objetivo de este trabajo es llevar acabo una comparación técnica y económica que refleje relación del costo beneficio de cada uno de diferentes tecnologías aplicables para el corte de mazarotas y coladas de Blocks de aluminio. Para ello, se deberán identificar los indicadores mesurables que permitan comparar en términos de costo por unidad para cada uno de los productos.

V. Hipótesis.

Es posible aplicar un proceso de corte diferente al utilizado actualmente, para la separación de mazarotas y coladas, que dé como resultado un costo operativo menor al que se logra con el proceso de corte por sierra banda. Entre estas están: la tecnología de Maquinado Hidroabrasivo (Abrasive WaterJet) y el Aserrado de Disco con inserto cementado de diamante. La primera, es una tecnología reciente que se ha implementado en Europa en fundiciones de aluminio para la separación de coladas y mazarotas, que demostró ser una alternativa segura, flexible y económica. La segunda, es un antiguo método de corte de metales que recientemente ha revolucionado con la adhesión de materiales muy resistentes a la abrasión a los dientes de un disco muy delgado de corte que permite cortar a velocidades de hasta 5500 metros por minuto.

para robot, fixtures de sujeción del casting para corte, integración y programación como equipo, de tal forma que, para poder cortar a un ritmo de 60 Blocks por hora se requiere de una inversión de alrededor de 1.8 millones de dólares y tiene un costo operativo por consumo bandas de alrededor \$225,000 dólares promedio al año por producto. Cabe mencionar, que el costo del corte promedio es de alrededor de \$1.30 dólares por block promedio y se estimó, originalmente, tener un costo no mayor a \$0.60 centavos de dólar.

IV. Objetivo.

El objetivo de este trabajo es llevar acabo una comparación técnica y económica que refleje relación del costo beneficio de cada uno de diferentes tecnologías aplicables para el corte de mazarotas y coladas de Blocks de aluminio. Para ello, se deberán identificar los indicadores mesurables que permitan comparar en términos de costo por unidad para cada uno de los productos.

V. Hipótesis.

Es posible aplicar un proceso de corte diferente al utilizado actualmente, para la separación de mazarotas y coladas, que dé como resultado un costo operativo menor al que se logra con el proceso de corte por sierra banda. Entre estas están: la tecnología de Maquinado Hidroabrasivo (Abrasive WaterJet) y el Aserrado de Disco con inserto cementado de diamante. La primera, es una tecnología reciente que se ha implementado en Europa en fundiciones de aluminio para la separación de coladas y mazarotas, que demostró ser una alternativa segura, flexible y económica. La segunda, es un antiguo método de corte de metales que recientemente ha revolucionado con la adhesión de materiales muy resistentes a la abrasión a los dientes de un disco muy delgado de corte que permite cortar a velocidades de hasta 5500 metros por minuto.

Estas dos tecnologías tienen las siguientes ventajas sobre los procesos de corte por sierra cinta.

(1) La producción y el producto pueden ser más fácilmente adaptables para un requerimiento específico o cambio del cliente.

(2) El operador puede, rápida y simplemente, reprogramar los movimientos del brazo del robot, el cual sujeta la herramienta de corte para cualquier producto nuevo o diferente. El tiempo muerto de la producción se ve favorecido como resultado de esa modificación y es limitado a horas en lugar de días o semanas.

(3) Geometrías de productos complejos o, incluso, imposibles de cortar con otros procesos, pueden ser cortados con alta calidad y precisión desde que el controlador del robot es capaz de manipular la herramienta de corte en todos los planos deseados.

(4) Ambos procesos de corte son acompañados de tolerancias cerradas y radios pequeños, por lo tanto, una reducción de material de desperdicio debido al corte está presente en este proceso. Además, las superficies del corte son limpias y parejas, no existe generación de calor o deformación del material.

(5) La presencia de arena y rebabas en el canal de corte, tienen un impacto menor en las herramientas de corte en comparación al que existe en el proceso de aserrado por banda de carburo de tungsteno.

VI. Marco teórico.

A. Corte mediante sierra de banda y disco.

El proceso de corte por sierra es uno de los procesos más esencial y común para la separación de metales [11]. En realidad, es uno de los procesos que ha demostrado ser de lo más rentable para el corte de perfiles y aleaciones difíciles en la industria, ya que las condiciones de estos materiales a granel presentan superficies limpias y libres de obstáculos [9].

A pesar de ello, en el caso del corte automatizado para la separación de remanentes en fundiciones, el panorama no es igual al de condiciones de corte de materiales y perfiles con esta tecnología, ya que aunque los sistemas de corte por banda han sido sistematizados y automatizados en gran medida [8], el costo de cortar una fundición tiene una gran correlación directa con la selección de la cinta apropiada y las condiciones de la fundición en particular. Por otro lado, existen muchas variables que exigen al operador control y revisión [1,2,6].

Es relación a lo anterior, una investigación de las tecnologías aplicadas en las empresas de proveedoras de fundiciones aluminio más grandes de la industria automotriz, refleja que hay muchas empresas que utilizan el proceso de aserrado por disco, ya que sustentan tener mejores resultados y costos de manufactura que el que lograrían por banda.

Las ventajas relevantes de un corte por cinta respecto a las del corte por disco son[1,2,3]:

- 1.- Energético: Corte por cinta requiere menos energía que lo que se requiere para el corte por disco. Es precisamente éste motivo por lo que se le atribuye la alta demanda de maquinaria de sierra cinta en el mundo.

2.- Desperdicio: La sierra de disco, requiere cortar con herramienta cuyo espesor es mayor que el de la cinta, provocando un mayor desperdicio (viruta).

3.- Vida de la herramienta: Cuando se tiene un canal de acceso sin obstáculos y buena calibración, una sierra cinta da muchos más cortes que los que puede dar un disco antes de su primer afilada.

4.- Flexibilidad. El disco tiene la gran desventaja de que solo se puede cortar con el radio que a diferencia de la sierra cinta, tiene más flexibilidad para el corte de secciones mayores.

En realidad ninguno de estos procesos es mejor o pero que el otro, lo importante es identificar en que condiciones es mejor la utilización estos procesos [21],

B. Maquinado Hidroabrasivo (Abreasive WaterJet).

El proceso de corte por Water jet es una de esas tecnologías como la de soldadura por láser e incluso la robótica, que por si mismas fueron descubiertas antes de un tiempo en que se pudieran explotar ampliamente. Pero hoy en día, han encontrado un gran nicho de aplicación en la industria automotriz [12]. El corte por chorro de agua es también, una tecnología que va en paralelo con el láser por su afinidad con la robótica, la cual provee la flexibilidad a la operación demandada por la manufacturera automotriz. La programación de los robots permite complejas configuraciones de formas ha ser rápidamente generadas y fácilmente cambiadas para acomodar nuevos diseños completos, modificación de componentes por alguna otra variante en el producto [16,18].

La acción de corte a través de Water Jet es producida por fuerza del agua bajo la presencia de altísima presión (50,000 psi) a través de una boquilla fina a una velocidad de Mach2 (cerca de dos veces la velocidad del sonido), impactando con una alta energía en un área muy restringida de material a ser cortado. De éste modo no existe herramienta de desgaste o materiales que se consuman por el proceso de corte. Además de que el agua utilizada no requiere una preparación especial, es reciclada y su consumo es bajo, cerca de 1 litro por minuto para un sistema de 2 boquillas. Es ambientalmente un proceso amigable con la ausencia de generación de calor que daña tanto el material ha ser cortado como sus alrededores. No existe la presencia de emisiones o humos tóxicos como lo ocurre con láser o proceso de corte basados en calor, los cuales son un problema para algunos materiales plásticos que son cancerígenos. El ancho del rastro producido por el corte (Kerf) es muy delgado, permitiendo un corte muy preciso con un mínimo de desgaste y esfuerzos en los dispositivos de sujeción circunvecinos del equipo además, los fuerzas de corte son pequeñas previniendo así cualquier daño mecánico a la parte en cuestión [12, 14].

En el pasado se han desarrollado aplicaciones del corte por chorro de agua en la industria de la fundición integrando robots ABB-IRB, así como la utilización de patrones de corte mediante CNC. Con la integración de estas dos tecnologías es aplicables a los procesos de fundición, y no solo para el proceso de corte, sino también para los procesos de limpieza como los son el rebabeo, y de granallado [12,13].

Mediante la variación de del ángulo de corte, la presión de corte y la cantidad de abrasivo utilizado en el mismo sistema, se puede ejecutar múltiples cortes y operaciones de limpieza incluyendo la remoción de fragmentos grandes de material. Un sistema de corte por Water Jet es capaz de desempeñar las funciones de corte de colada y mazarota, de rebaba externa, internas y sobrantes en general, además de que se puede integrar un sistema

de limpieza superficial exterior de tal forma que se configure una línea de preparación para fundiciones de aluminio completamente.

El primer sistema de este tipo fue desarrollado por ABB-IRB y fue instalado en uno de las más grandes fundiciones del mundo, conteniendo líneas de terminado que producen partes de aluminio estructurales para carros Volvo. De nuevo, robots de seis ejes fueron utilizados para sujetar las boquillas de alta presión para cortar y limpiar las fundiciones de aluminio; sistema de este tipo fue suministrado por ABB para ser instalado en Alemania, e Italia. El potencial de la robótica va a la par, el corte por WaterJet continua en crecimiento, en paralelo proveyendo no solamente una solución segura, sino también flexible y económica[12,15].

Por otro lado, el seguimiento del control para el corte puede ser llevado a cabo mediante la implementación de sistema de visión (Cognex, DVT) que le provee al robot la trayectoria para la remoción de las coladas y mazarotas mediante la aplicación de GUI (Graphical User Interface), así como para la limpieza de rebaba y excedentes de la fundición no deseables [17].

VII. Metodología.

La metodología para el desarrollo de esta tesis consiste en la investigación de los procesos de corte por aserrado (banda con inserto de carburo de tungsteno, disco con inserto cementado de diamante), así como la investigación del alcance del proceso de corte por maquinado hidroabrasivo ante la necesidad de separar coladas y mazarotas para los diferentes productos de Blocks de aluminio 4, 6 y 8 cilindros. A partir de esta revisión conceptual, y con el fin de obtener los costos unitarios más reales se establecen las siguientes actividades para la obtención de información

de limpieza superficial exterior de tal forma que se configure una línea de preparación para fundiciones de aluminio completamente.

El primer sistema de este tipo fue desarrollado por ABB-IRB y fue instalado en uno de las más grandes fundiciones del mundo, conteniendo líneas de terminado que producen partes de aluminio estructurales para carros Volvo. De nuevo, robots de seis ejes fueron utilizados para sujetar las boquillas de alta presión para cortar y limpiar las fundiciones de aluminio; sistema de este tipo fue suministrado por ABB para ser instalado en Alemania, e Italia. El potencial de la robótica va a la par, el corte por WaterJet continua en crecimiento, en paralelo proveyendo no solamente una solución segura, sino también flexible y económica[12,15].

Por otro lado, el seguimiento del control para el corte puede ser llevado a cabo mediante la implementación de sistema de visión (Cognex, DVT) que le provee al robot la trayectoria para la remoción de las coladas y mazarotas mediante la aplicación de GUI (Graphical User Interface), así como para la limpieza de rebaba y excedentes de la fundición no deseables [17].

VII. Metodología.

La metodología para el desarrollo de esta tesis consiste en la investigación de los procesos de corte por aserrado (banda con inserto de carburo de tungsteno, disco con inserto cementado de diamante), así como la investigación del alcance del proceso de corte por maquinado hidroabrasivo ante la necesidad de separar coladas y mazarotas para los diferentes productos de Blocks de aluminio 4, 6 y 8 cilindros. A partir de esta revisión conceptual, y con el fin de obtener los costos unitarios más reales se establecen las siguientes actividades para la obtención de información

fidedigna para un buen análisis: a) Determinar las áreas de corte de cada monoblock en cada sección de mazarota y colada, con el fin de traducir los rendimientos de las herramientas en términos áreas cortadas, permitiendo así, mostrar el trabajo real que se requiere hacer por producto utilizando cada proceso de corte sugerido. b) Comprobar, a través de Diseño Factorial Experimental, la contribución real que tienen las variables importantes del proceso de aserrado por cinta en la vida de las cintas de carburo de tungsteno. c) Evaluar el impacto real que tiene la arena sílica en la banda con diente de carburo de tungsteno en el proceso de aserrado mediante sierra banda. Con esta actividad se pretende evidenciar la magnitud del problema d) Caracterizar cada tecnología para obtener un perfil comparativo homogéneo entre ellos. e) Establecer y ejecutar un plan de pruebas para medir cada proceso de corte en términos de costo integral por producto.

VIII. Contribuciones esperadas.

- Aplicar una tecnología diferente de corte que presente una solución más económica y robusta a las condiciones de las fundiciones de los monoblocks que provienen de fundiciones de molde de arena.
- Obtener información mensurable, tangible y aplicable a la toma de decisiones para futuras inversiones de la organización.
- Publicar e informar los resultados de la investigación en los foros de la compañía Nematik S.A. para la toma de decisiones futuras. Además, de ser posible, en medios impresos nacionales de aplicaciones industriales, así como en algún Journal Internacional.
- Sentar las bases para el desarrollo de nuevas aplicaciones a través del uso nuevas tecnologías en la industria de la fundición de aluminio.

fidedigna para un buen análisis: a) Determinar las áreas de corte de cada monoblock en cada sección de mazarota y colada, con el fin de traducir los rendimientos de las herramientas en términos áreas cortadas, permitiendo así, mostrar el trabajo real que se requiere hacer por producto utilizando cada proceso de corte sugerido. b) Comprobar, a través de Diseño Factorial Experimental, la contribución real que tienen las variables importantes del proceso de aserrado por cinta en la vida de las cintas de carburo de tungsteno. c) Evaluar el impacto real que tiene la arena sílica en la banda con diente de carburo de tungsteno en el proceso de aserrado mediante sierra banda. Con esta actividad se pretende evidenciar la magnitud del problema d) Caracterizar cada tecnología para obtener un perfil comparativo homogéneo entre ellos. e) Establecer y ejecutar un plan de pruebas para medir cada proceso de corte en términos de costo integral por producto.

VIII. Contribuciones esperadas.

- Aplicar una tecnología diferente de corte que presente una solución más económica y robusta a las condiciones de las fundiciones de los monoblocks que provienen de fundiciones de molde de arena.
- Obtener información mensurable, tangible y aplicable a la toma de decisiones para futuras inversiones de la organización.
- Publicar e informar los resultados de la investigación en los foros de la compañía Nematik S.A. para la toma de decisiones futuras. Además, de ser posible, en medios impresos nacionales de aplicaciones industriales, así como en algún Journal Internacional.
- Sentar las bases para el desarrollo de nuevas aplicaciones a través del uso nuevas tecnologías en la industria de la fundición de aluminio.

IX. Tecnologías existentes de aserrado de fundiciones del aluminio.

A. Aserrado por banda.

i. Introducción.

El proceso de corte por sierra cinta es el proceso por el cual una herramienta multidentada, de espesor delgado, se hace pasar contra un material para ser cortado. La rotación de la cinta creada por los volantes motrices produce la velocidad lineal de la cinta (V_c), y los dientes se van enterrando en el material conforme el avance determinado provocado por eje transversal (f_s). Los dientes montados en la cinta o banda de corte se encuentran espaciados en un determinado paso, y alternados con diferentes ángulos y secuencias.

El proceso de corte por sierra es uno de los procesos más esenciales y comunes para la separación de metales [11]. En realidad, es uno de los procesos que ha demostrado ser de los más rentables para el corte de perfiles y aleaciones difíciles en la industria, ya que las condiciones de estos materiales a granel presentan superficies limpias y libres de obstáculos [9].

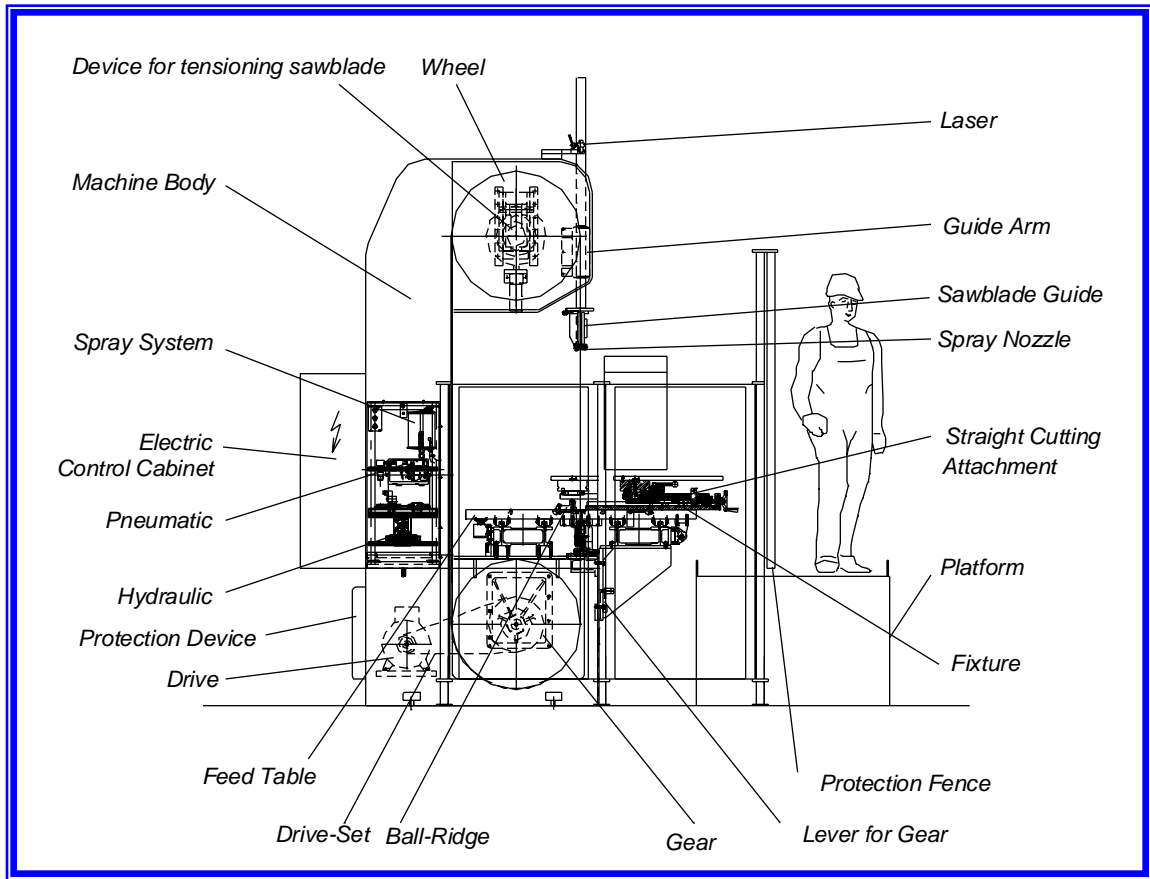


Figura 3. Sierra de banda Vertical August Mossner Modelo B801 y sus partes.

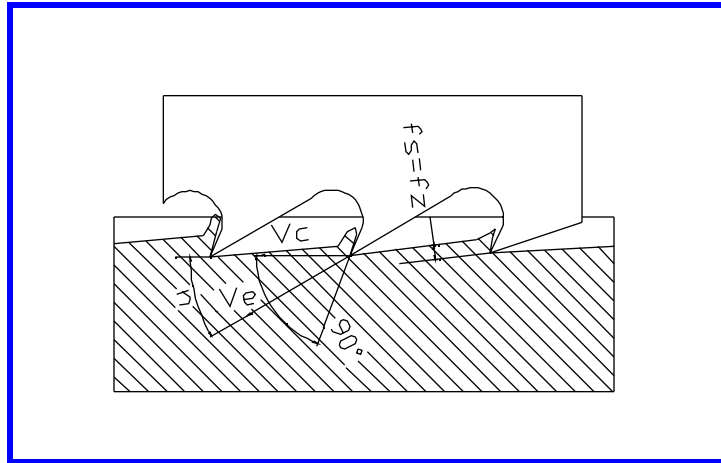


Figura 4. Arreglo de sierra banda y corte en sección.

El aserrado por medio de banda es un proceso de aserrado continuo, las partes que constan una sierra de banda se muestran en la figura 4. Las variables en el proceso de corte por sierra cinta son: a) banda; b) pieza o material a cortar; c) plano de corte; d) velocidad de corte de la banda (V_c); e) avance del diente; (f_z), f) velocidad efectiva (V_e); g) distancia de contacto (a_e) y h) avance (f_s)

Las velocidades normales de corte a través de este proceso (corte de acero a alta velocidad) se encuentran entre los rangos de $V_c = 6$ a 45 m/min con avances de $f_z = 0.1$ a 0.4 m/min. En bandas con dientes de carburo cementados, son utilizadas para incrementar la velocidad hasta 2500 m/min y avances hasta 1.8 m/min para metales ligeros como el aluminio.

ii. Tipos de sierras de banda.

En general existen tres tipos de Sierras Banda, Verticales o Universal (3) que es la más utilizados en la industria de la fundición debido a que la distancia entre los volantes suele permitir cortar espesores mayores de 800 Figura 5.

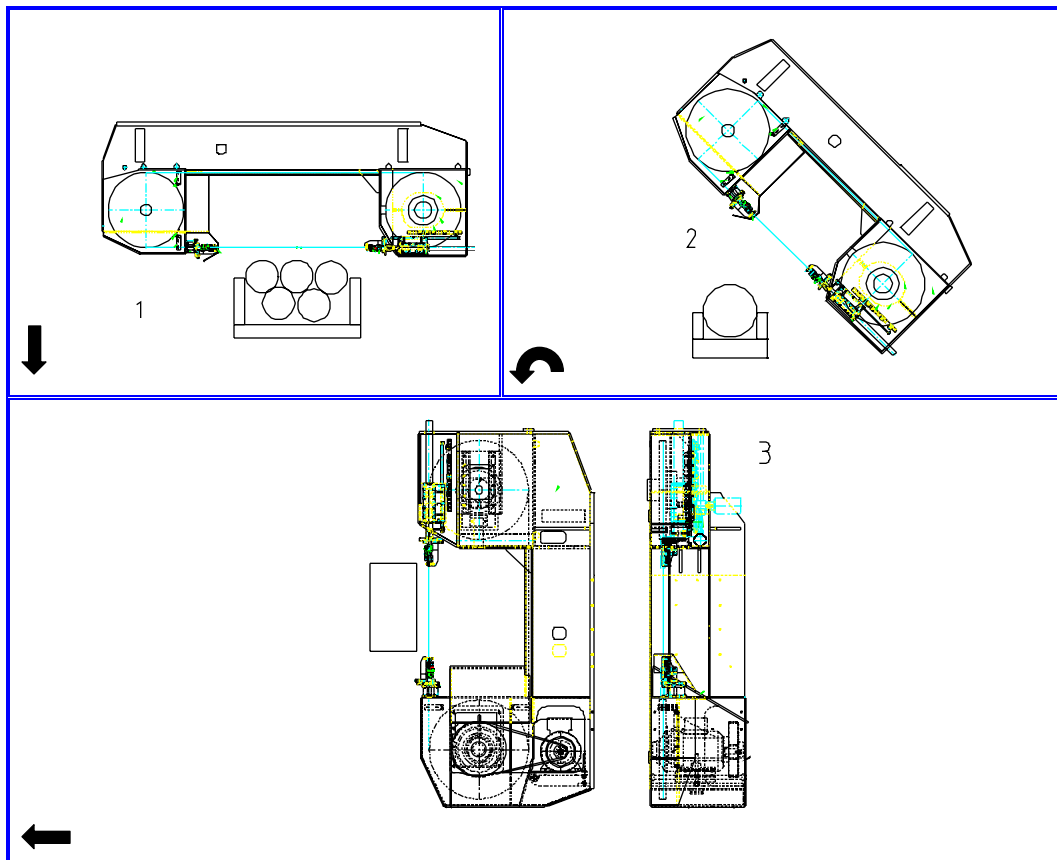


Figura 5. Grafico de los diferentes tipos de máquinas Sierra banda.

A su vez las sierras de banda de brazo articulado (2), son las de mayor utilización en talleres o en industrias para el corte de ligotes o coladas continuas en líneas semiautomáticas. Por otro, lado las sierras horizontales (1), permiten cortar a su vez perfiles de materiales múltiples, es decir, que se hace bajar la sierra para el corte de coladas continuas de forma múltiple. El tipo de máquina universal o vertical (3), es el

comúnmente utilizado en la industria automotriz, ya que permite cortar monoblocks de forma vertical, por lo que la distancia entre los volantes superior e inferior es de hasta 2 metros.

iii. Herramienta y parámetros de corte.

La selección correcta de una herramienta para una aplicación de corte específica es crítico en el resultado del costo de por unidad. Existen cinco características principales de una cinta (figura 6); forma de los dientes, paso, ancho, espesor del diente y espesor de la cinta. Cada proveedor de este tipo de herramientas tiene una serie especial para el corte específico de fundiciones de diferentes materiales, con variantes de cada una de estas características y con la adhesión de dientes de carburo de tungsteno cementados en las crestas de las cintas

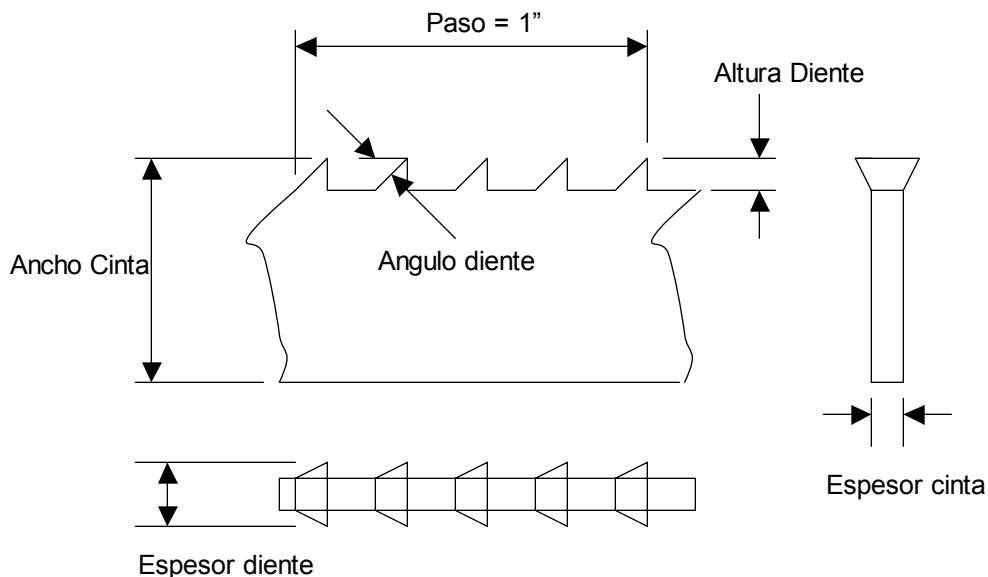


Figura 6. Partes principales de la banda de corte.

Una selección de del avance correcto para un corte óptimo es necesario encontrar la relación correcta de la velocidad de la banda y el

avance. La siguiente formula ha sido desarrollada por WIKUS[®], y sirve para calcular el avance máximo permisible.

$$L_{\max} = v (1.54 - 1.13 \times \log (T_z)) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde L_{\max} = es el avance máximo permisible en (cm²/min.); v es la velocidad de la banda en (m/min) y $\log(T_z)$ representa el logaritmo del paso seleccionado para un material específico

Existen ciertas interdependencias entre la vida de la banda, el acabado de la superficie cortada, el avance de la banda y su exactitud, como se muestra en la figura 7, que siempre existen en proceso de corte por aserrado de banda; sin embargo, el grado de cada uno de ellos depende a su vez del tipo de material y la calidad de los ajustes de la máquina, lubricación, y las condiciones externas de la superficie del material.

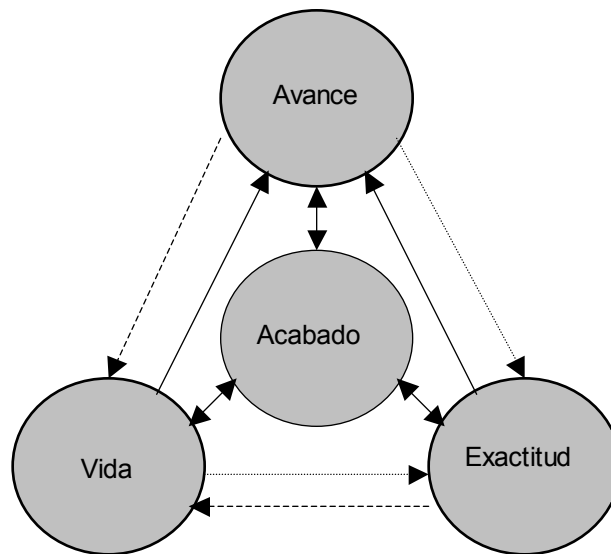


Figura 7. Figura de las cuatro variables interrelacionadas

El avance puede ser incrementado al costo de la reducción de la vida de la herramienta y la reducción de la exactitud - Flechas continuas - como se muestra en la figura 7. La exactitud del corte es incrementada al costo de la disminución del avance y vida de la herramienta - flechas seccionadas -. La vida de la herramienta es incrementada al costo de sacrificar el avance y la exactitud - flechas punteadas -. La calidad del acabado de la superficie cortada esta fuertemente relacionada con el avance de la herramienta.

iv. Ajustes.

Este proceso requiere de muchos ajustes y cuidados de los elementos que componen una sierra. En la figura 3, se pueden apreciar las partes de una sierra vertical y una buena operación del equipo es necesario saber:

a) Volante motriz y volante loco con recubrimiento de poliuretano debe estar en buen estado y con ángulos centradores dentro de especificación. Estos permiten mantener la banda al centro por lo que, el recubrimiento como el balanceo dinámico de estos volantes es crítico, para que no exista vibración y desajuste.

b) Espaciamiento entre guías superiores e inferiores (figura 8). A mayor distancia entre ellas, existe mayor efecto de flexión lateral decrementando la vida de la banda, y a menor distancia este efecto desaparece. Sin embargo, se debe dejar suficiente espacio para que el material cortado pueda ser liberado.



Figura 8. Arreglo de guía, roller y cinta de carburo de tungsteno.

c) Tensión. La tensión de la banda permite aumentar la estabilidad perdida por espaciamento entre las guías. 300 N.mm^2 , es una tensión correcta para cortar con una velocidad de la banda de 1000 mm/min .

d) Lubricación. Este es un punto crítico en la vida de la sierra. El llevar acabo cortes sin lubricación ocasiona que la banda recristalice por el calor generado por la fricción, provocando que se debilite.

e) Ajuste entre espaciadores. Tanta precisión exista en este ajuste, mayor precisión habrá en el corte. Este espaciador permite una determinada holgura para que deslice la banda entre la guías sin fricción (0.05 mm en guía superior y 0.15 mm guía Inferior).

f) Sistema Rodillos niveladores ((figura 8). Esto mantienen la banda entre ambas guías en una condición a 90° , permitiendo que la banda se centre cuando existe la reacción al momento de estar cortando el material. Existe una holgura entre el rodillo nivelador y la banda

recomendado de 1 mm tanto en los rodillos niveladores superiores como inferiores.

B. Aserrado por disco.

i. Introducción.

Las sierras circulares o de disco fueron desarrolladas en Alemania a principios del siglo 19 y son comúnmente conocidas como “Cold Saws” por diferenciarlas del tipo de disco abrasivo. Las sierras circulares cortan rápido por la fuerza centrífuga generada por un motor eléctrico de altas revoluciones y producen una superficie suave y exacta comparable a las características que se alcanza con equipos de maquinado.

Este proceso se difiere esencialmente del corte por cinta por tener una herramienta de corte muy rígida y que los dientes están montados en las crestas sobre el perímetro de un disco. Sierras de alta velocidad suelen utilizar dientes segmentados de carburo de tungsteno o diamante.

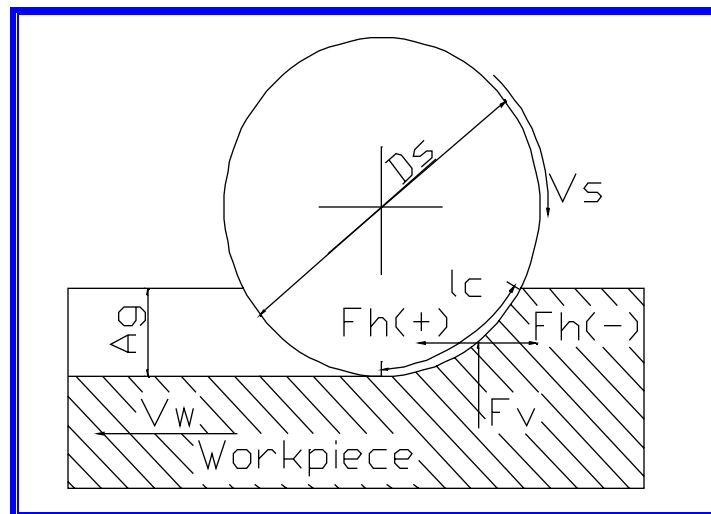


Figura 9. Corte por disco.

Las variables involucradas en el corte por disco están representadas en la figura 9 donde: a) Las fuerzas verticales y horizontales (F_h y F_v) actuando sobre el disco; b) la zona de contacto (l_c); c) el diámetro del disco (D_s); d) velocidad tangencial del disco (V_s), el avance (V_w); e) profundidad del corte (A_g).

ii. Tipos de sierras de disco.

Estas existen en 4 configuraciones principales como se muestran en la figura 10; Horizontales (1), Verticales (2) e inclinada (3), todas ellas con una herramienta móvil en un solo plano de movimiento y el material permanece fijo. El cuarto tipo de sierra circular (4) data desde 1980, en la cual la herramienta es montada a un robot cubriendo mayores grados de libertad, así como el material de corte en otro, capaz de cubrir hasta 7 grados de libertad entre ambos. En la figura 11 se puede apreciar los 7 ejes de movimiento de la sierra de disco.

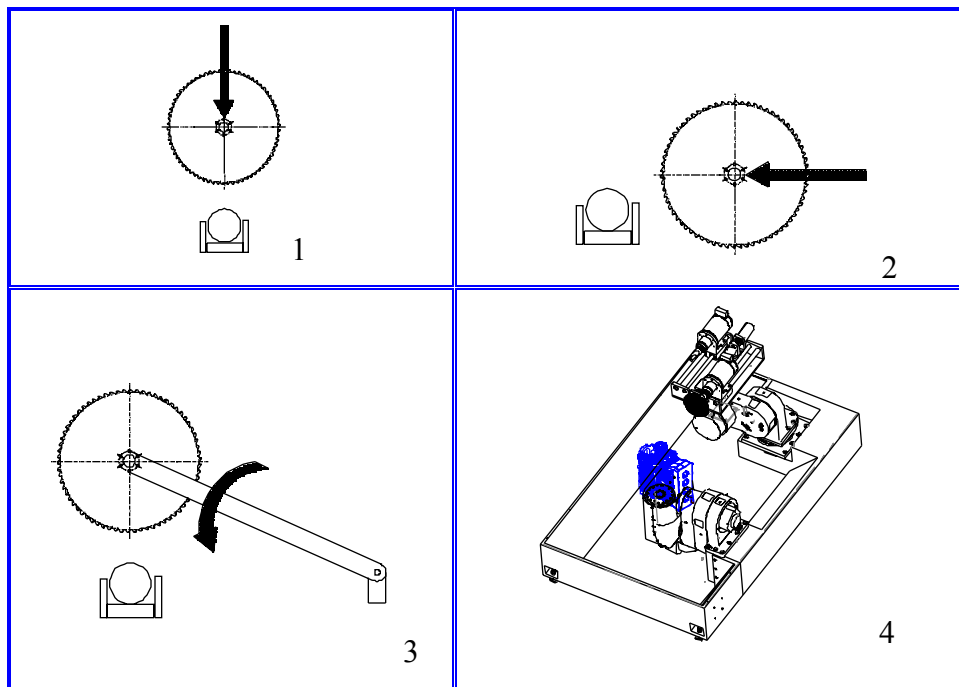


Figura 10. Arreglo de tipos de sierras de disco.

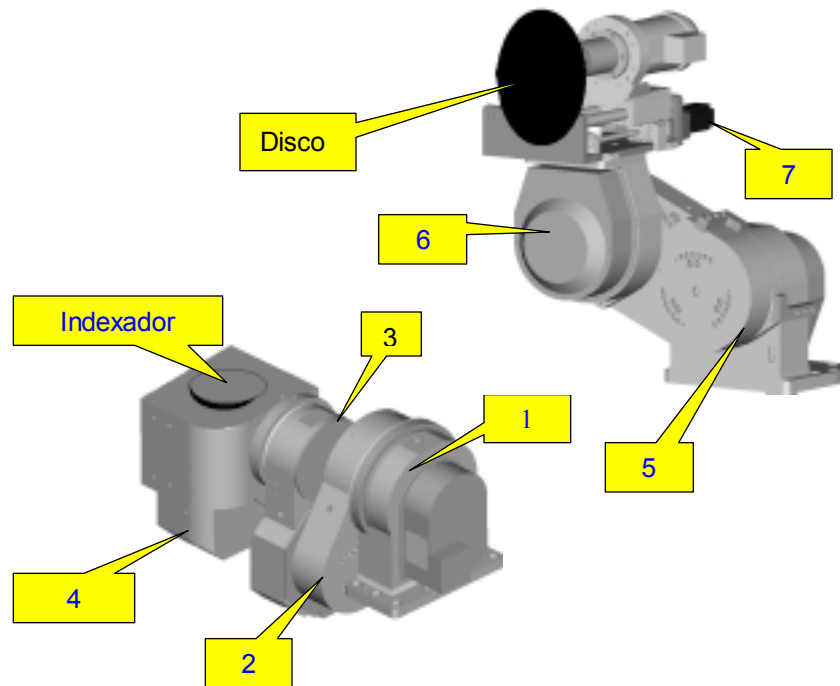


Figura 11. Sierra de disco robotizado de 7 grados de libertad.

iii. Herramienta y parámetros de corte.

Las sierras circulares cortan con discos dentados a lo largo del perímetro de la circunferencia. El disco es montado a la flecha de un motor y sujeto a éste. Los diferentes tipos de estas sierras ofrecen en general un tiempo de montaje corto de la herramienta de corte.

En la figura 12, se puede apreciar una de las últimas tecnologías en sierra circular, que consta de un espesor muy delgado [35 mm], y un diámetro de 350 mm. Los dientes de diamante están sementados y cortan a una velocidad de 5500 m/min.

En la tabla 1, se ilustran los alcances que un disco de diamante puede lograr en el corte de fundiciones de aluminio en cuanto a parámetros de corte. La herramienta puede ser afilada hasta 5 veces y puede alcanzar un avance de hasta 3000 mm/minuto

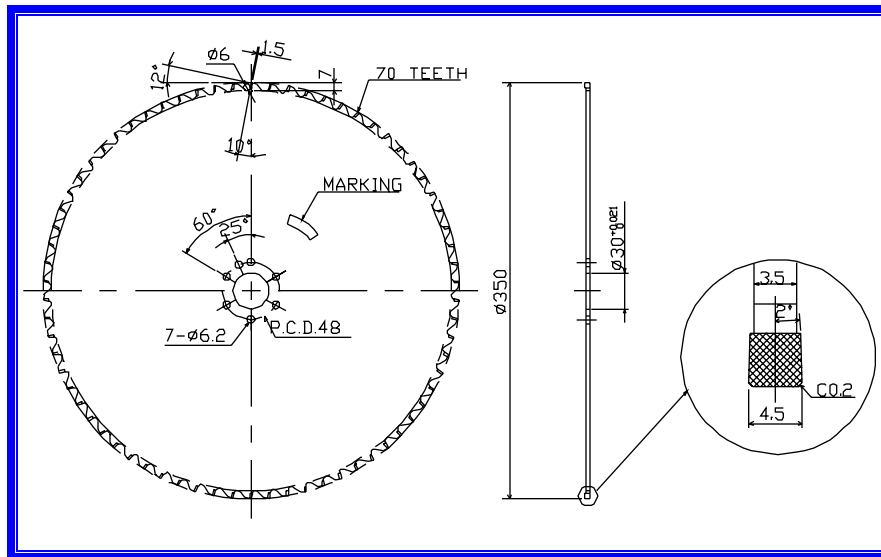


Figura 12. Disco con insertos cementados de diamante.

iv. Ajustes.

Muy pocos ajustes y requerimientos son necesarios para la buena utilización de esta tecnología, es decir, sólo el reemplazo del disco y una buena revisión del sistema de lubricación es importante. Los avances y rutinas son previamente programadas lo que permite poca supervisión por parte del operador. Por otro lado, los tiempos de reemplazo de discos es menor a los 5 minutos.

Capacidades de una sierra con Disco de diamante		
Disco	Diámetro (mm)	350
	Ancho de la viruta (mm)	5
	Ancho del diente (mm)	4
	Numero de dientes	70
	Ajuste del disco al motor	Tornillos u adaptador
Motor	Potencia (kw)	8
	Torque (Nm)	15
	Torque máximo (Nm)	60
	Revoluciones (rpm)	5,000
	Revoluciones (rpm) (max)	8,000
Condiciones de corte	Revoluciones (rpm)	5,000
	Avances (mm/min)	3000
	Velocidad (m/min)	5,500
	Espesor viruta (mm)	0.0085
	Exactitud (mm)	+/- 1mm o menos
Vida	Vida estimada para Fundiciones de Aluminio	Más de 15,000
	Costo (\$)	\$1,750.00
	Numero de reafiladas (veces)	5
Ventajas	Garantiza el paralelismo del corte	
	Se logran avances mayores que por banda	
	El disco es ligero y delgado	
	Tiempo de montaje de herramientas muy rápido (5 min)	
	Muy bajo consumo de energía	
	Diamante permite múltiples reafiladas 4 a 5	
	El corte en seco es posible con esta tecnología	

Tabla 1. Tabla de capacidades del corte con disco de diamante.

X. Corte por Maquinado Hidroabrasivo y su aplicación en aluminio.

A. Introducción.

Abreasive Water Jet Machining es también conocido como maquinado hidroabrasivo, es capaz de cortar una gran variedad de materiales, metálicos y no metálicos, utilizando un chorro de agua a alta velocidad. El chorro es producido al forzar al agua pasar a través de un orificio de 0.004 a 0.024 in [0.1 a 0.6 mm] de diámetro hecho en un material de zafiro o diamante a una presión de 30,000 a 60,000 psi [207 a 414 Mpa]. La velocidad del chorro fluctúa en los rangos de [520 a 914 m/s]. A estas velocidades y presiones, el agua erosiona muchos materiales rápidamente, actuando como una sierra. El curso del agua a un rango de flujo entre 0.1 a 5 gal/min [0.4 a 19 lt/min] es usualmente manipulado por un sistema robotizado o un gantry. El rango de distancia entre la boquilla mas comúnmente se encuentra entre 0.010 a 1.0 in [0.25 a 25 mm].

Metales y otros materiales duros son cortados mediante la adhesión de algún abrasivo en forma de polvo al curso del agua. Con este método, llamado maquinado hidroabrasivo o maquinado por chorro abrasivo, las partículas abrasivas (frecuentemente granate) son aceleradas por el agua, logrando así cortar una mayor gama de materiales. Altos rangos de flujo de agua son requeridos para acelerar las partículas abrasivas.

Materiales son cortados limpiamente, sin la presencia de filos rasgados, sin la generación de calor y generalmente más rápido que una sierra cinta. Una zona Kerf angosta y suave es producida por la separación mediante este método 0.030 a 0.100 in [0.8 a 2.5 mm]. No existe la presencia de la delaminación térmica o problemas de este tipo cuando es correctamente aplicado. No hay presencia de polvos.

B. Historia.

En el antiguo Egipto se utilizó arena combinada con agua para la tarea de minería y limpieza. Los equipos de chorro de arena (sandblasters) de este siglo, utilizaron chorros presurizados de hasta 500 psi [3400 kPa] para la limpieza y remoción de pintura. En 1968, Frenze patentó un concepto de sistema de corte mediante la presurización del agua. Su patente que consistió en producir un sistema coherente de corte, involucró la adhesión de un líquido base polímero al chorro de agua para prevenir el rompimiento de la salida del orificio de la cámara presurizada.

Antes de su aplicación para propósitos de corte en la industria, agua a muy alta presión fue empleada en la ciencia forestal y minería. En los 1970's presiones entre 30,000 a 55,000 psi [207 a 379 Mpa] fueron desarrolladas para cortar materiales no metálicos mediante tecnología de corte hidroabrasiva. El primer sistema comercial de corte por chorro de agua fue vendido en 1971 para cortar muebles y realizar aplicaciones donde la sierra de cinta no se podía aplicar adecuadamente. En 1983, el proceso fue modificado por la adhesión de partículas abrasivas como la sílica y granate al chorro para cortar metales, compósitos y otros materiales duros.

C. Alcances del proceso corte hidroabrasivo.

El corte por chorro de agua y los sistemas de corte hidroabrasivo compiten con los procesos de corte por aserrado (disco y banda), cuchilla o cizalla, flama, plasma y láser. Puede cortar materiales susceptibles al daño por calentamiento de aquellos procesos térmicos o que se estropean por el daño mecánico de las herramientas de corte. En algunos casos, es posible costear la sustitución efectiva de hasta tres operaciones como el corte burdo, maquinado y rebabeo por este proceso.

Material	Espesor		Velocidad de Corte	
	[in]	[mm]	[in/min]	[mm/min]
Aluminio	0.125	3.2	40	1020
Aluminio	0.5	12.7	18	480
Aluminio	0.75	19.0	5	120
Latón	0.425	10.8	5	120
Bronce	1.0	25.4	1	30
Cobre	0.625	15.9	8	180
Plomo	2.0	50.8	8	180
Acero al carbón	0.75	19.1	8	180
Hierro fundido	1.5	38.1	1	30
Acero Inoxi. (304)	4.0	101.6	1	30
Titanio	0.500	12.7	12	300
Acero para htas	0.250	6.4	10	240
Fibra de vidrio	0.250	6.4	100	2520
Vidrio	0.250	6.4	100	2520
Vidrio	0.750	19.1	40	1020
Grafito / Epóxico	1.0	25.4	15	360
Kevlar	1.0	25.4	3	78
Lexan	0.5	12.7	12	300
Pheonolic	0.5	12.7	10	240
Plexiglass	0.175	4.4	50	1260
Hule	0.300	7.6	200	5100

Tabla 2. Velocidades de corte para varios materiales mediante el corte por Maquinado Hidroabrasivo.

D. Usos y ventajas.

El gran rango de aplicación y la ausencia de calor son las ventajas mayores del corte por chorro de agua. La versatilidad del proceso es demostrada mediante cortes simultáneos en acero al carbón, latón, cobre aluminio y acero inoxidable, mostrados en la tabla 2. El corte hidroabrasivo es particularmente bueno para el corte de hojas de lamina simultáneamente (sandwiches) de metales y no metales. Desde que este proceso es capaz de penetrar casi todos los materiales, ya no es necesario el proceso de pretaladrado como proceso inicial de corte y el corte, puede ser multidireccional. Múltiples formas pueden ser formadas y cortadas dependiendo de los límites del sistema de control y el tamaño de la pieza. La zona Kerf generalmente no es un problema a menos que, la velocidad de corte sea muy alta, que el espesor de la pieza es muy grande, o que las boquillas estén desgastadas.

No hay herramientas expuestas al desgaste, tan solo el orificio de la boquilla, y existe una mínima fuerza generada que simplifica la complejidad de los dispositivos de sujeción de la pieza a ser cortada.

Las tolerancias dependen del equipo, el material de la pieza y su espesor, pero puede ser tan cercanas a +/- 0.004 in [0.1mm] en dimensión y +/- 0.002 in [50µm] en posición.

E. Limitaciones.

Relativamente, bajas velocidades de corte son la principal limitación de los sistemas de corte por hidroabrasivo. Las velocidades típicas se muestran en la tabla 2. Otra limitación es, el equipo debe contener elementos para recolección y filtrado del agua. La inversión de capital inicial generalmente es alta, debido a la bomba y la cámara de presurización requeridas para suministrar y dirigir el agua.

El material a ser cortado, debe ser más suave que el abrasivo utilizado. Materiales muy delgados y dúctiles tienden a doblarse. Las boquillas deben ser reemplazadas con una relativa frecuencia dependiendo del tipo de abrasivo empleado, diámetro máximo de la boquilla requerido y el tiempo de uso de ésta.

El grano del abrasivo desgasta las boquillas provocando que el chorro de agua pierda su simetría, causando que la calidad de la superficie de corte se deteriore.

El suministro del agua debe ser filtrado óptimamente hasta 0.5 micras para reducir el mantenimiento del equipo. Muchos sistemas operan exitosamente mediante la filtración en línea del suministro de agua de la red principal.

El agua sobrante, después del proceso de corte, debe ser manejada y/o contenida apropiadamente.

F. Fundamentos.

La entrada de agua pasa, primeramente, a través de la bomba inyector para presurizarla hasta 190 psi [1300 kPa] filtrándola y; después una bomba intensificadora (bomba hidráulica de acción recíproca) crea una presión del agua de 30,000 a 60,000 psi [207 a 414 Mpa] con un rango de flujo de hasta 3.5 gal/min [13.3 lts/min]. Forzando el flujo a través de un orificio de zafiro se forma el chorro de agua como se muestra en la figura 13. La velocidad del chorro depende de la presión del agua.

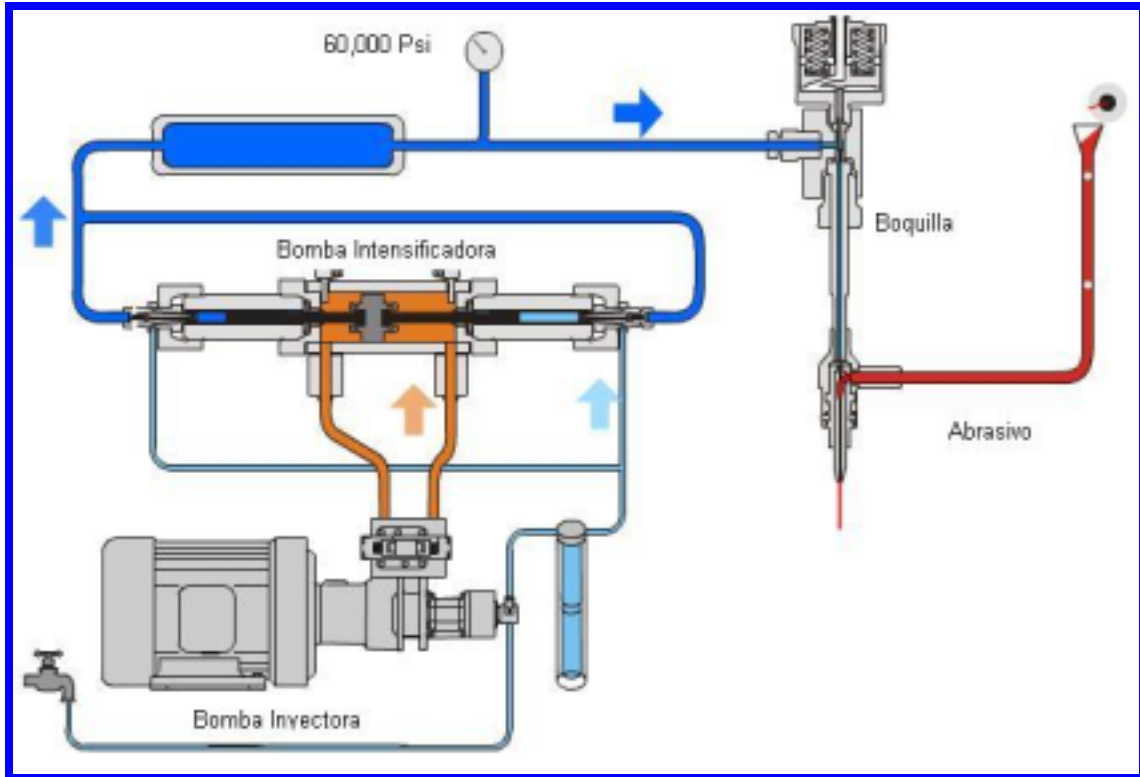


Figura 13. Sistema de Generación del por el chorro hidroabrasivo.

Para corte hidroabrasivo, partículas secas deben ser alimentadas a una tolva dentro de una cámara de mezclado. El agua acelera el abrasivo a velocidades supersónicas. La alta velocidad del chorro es enfocada y sale a través del orificio dejando un perfil de corte de 0.020 a 0.090 in [0.5 a 2.3 mm] como el que se muestra en la figura 14.

Dependiendo de las propiedades del material, el corte es el resultado de la erosión o falla bajo elevada concentración de esfuerzos localizados puntualmente y en movimiento. Este proceso no produce distorsiones térmicas o mecánicas.

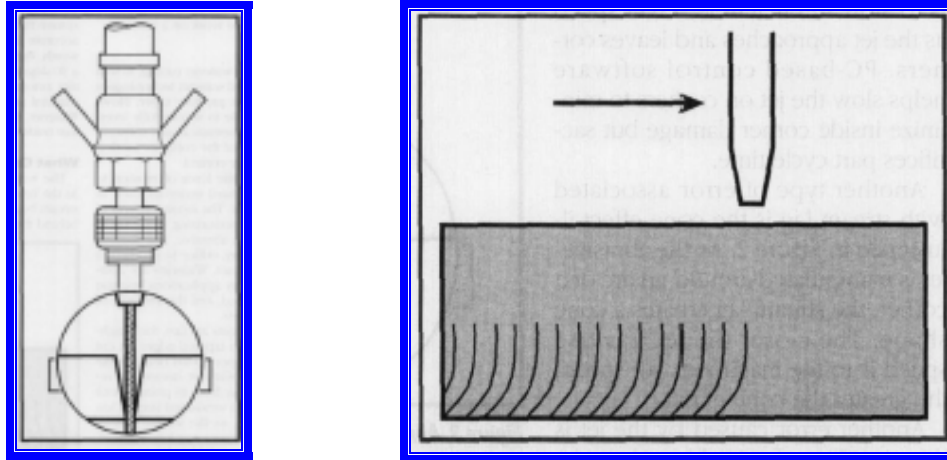


Figura 14. Perfil de corte producido por el Chorro Abrasivo.

G. Variaciones del proceso.

Profundidades y las características de las superficies del corte varían dependiendo de las siguientes variables: (1) Presión del chorro de agua y del diámetro de éste; (2) el tamaño, tipo y rango del flujo del material abrasivo; (3) velocidad de corte transversal; (4) ángulo del corte; (5) número de pasadas. Mediante el incrementado de la presión, el diámetro y la disminución de la velocidad de corte transversal, se incrementa la profundidad de corte por lo que una pieza de mayor densidad y espesor puede ser cortada mediante el chorro de agua. El incremento del flujo de agua, la cantidad de abrasivo, o ambos, e incrementando el tamaño de las partículas del abrasivo, da como resultado un incremento de la velocidad de corte del chorro. La utilización de una partícula abrasiva pequeña a baja velocidad de corte (avance) mejorará la calidad de la superficie de corte.

Mediante el incremento de la presión del agua en el corte por chorro hidroabrasivo se incrementa la capacidad de corte, debido a que las partículas son aceleradas y son capaces de penetrar a mayores espesores. La presión

óptima alcanza rangos de entre 30,000 psi [207 a 310 Mpa], debido a que las altas presiones resultan en un incremento del costo de mantenimiento.

Partículas finas de abrasivo, debajo de malla 150, son relativamente ineficientes; las más efectivas generalmente, se recomiendan que tengan un tamaño para el corte de metales entre malla de 60 a 80. Para materiales cerámicos muy duros, abrasivo de carburo de boro es utilizado en ocasiones.

Rangos elevados de flujo de abrasivos resultan en un costo elevado por el consumo del abrasivo y el desgaste prematuro de las boquillas.

Mientras en algunos procesos de corte se requiere de un solo paso para realizar el corte completo en materiales de espesor considerable, mediante el corte hidroabrasivo, es posible que se requiera múltiples pasadas.

H. Equipo.

Las partes principales del equipo de chorro de agua o sistema de hidroabrasivo de corte son: (1) la bomba especial para producir la presión y el intensificador usado para proveer el agua, (2) la tubería, el tanque y el receptor que manejan el agua, (3) el gantry, robot, el sistema de transporte que guía la boquilla del chorro de agua y, (4) el ensamble de la boquilla que forma el chorro. En el caso del chorro con abrasivo, (5) el sistema de alimentación del abrasivo con su tolva, válvula de dosificación y unidad de mezclado que mezcla el abrasivo con el agua curso del agua como se muestra en la figura 13.

Los equipos se encuentran disponibles en una variedad de formas, desde componentes individuales hasta sistemas completos e integrados. Sistemas más complejos, como los de sistemas robotizados de más de 5 ejes, tiende a ser construidos bajo características particulares y necesidades específicas.

Hoy en día, existen muchas conversiones de sistemas de corte por flama a corte por chorro.

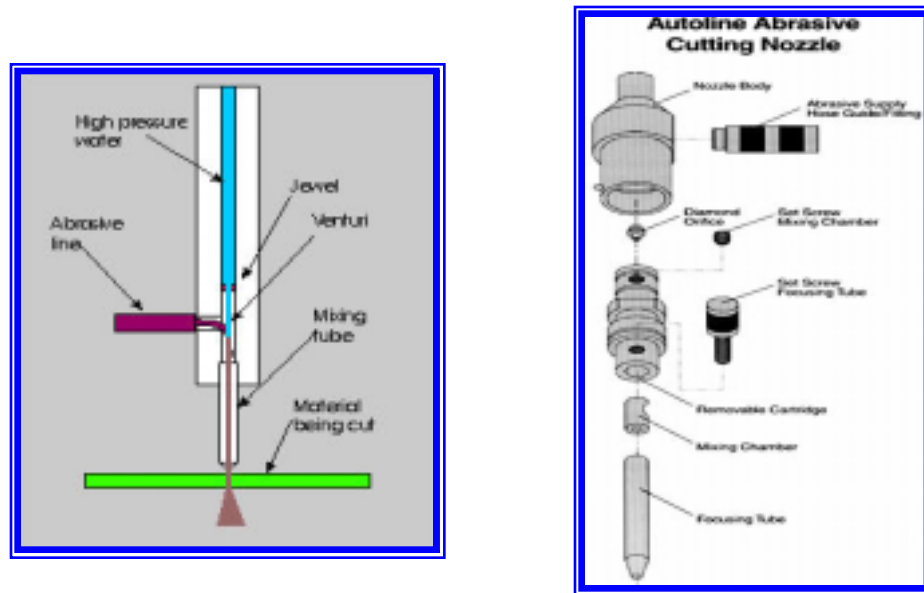


Figura 15. Boquilla de corte.

I. Consumibles.

El componente principal sujeto a desgaste es el orificio de zafiro y, en el sistema abrasivo, la boquilla de carburo. Un sistema de chorro de agua, únicamente, el zafiro dura hasta 200 hrs. En sistemas abrasivos, la boquilla de carburo dura solo 4 horas. Otros consumibles son el agua, el abrasivo y la electricidad. Las partículas de abrasivo son utilizadas a un rango de 0.25 a 3.0 lb. [0.1 a 1.4 Kg] por minuto. En la figura 15 se muestran las partes de desgaste de las boquillas de corte.

J. Accesorios del equipo.

Equipo suplementario para la carga y descarga de las piezas es requerido, por lo que polipastos, robots cartesianos, o robots de más ejes montados en pedestal, pueden ser utilizados e integrados al sistema. Este sistema de manejo es generalmente independiente de los controladores que manejan del sistema de corte, pero son integrados a través de interfaces entre controladores.

Para llevar a cabo el perfilado a lo largo del perímetro de una pieza (rebabeo) un robot de 5 ejes podría requerirse así como un receptor especial para que pare el chorro de agua y disipe su energía.

Agua pesada requiere de un sistema de tratamiento de agua. Un sistema de limpieza periódico que remueva las partículas de la mesa de corte y los sobrantes generados del mismo, son necesarios para su operación.

K. Aplicaciones.

Hoy en día existen cientos de aplicaciones en la industria a lo largo del mundo. Las industrias que utilizan esta tecnología incluye la automotriz, aeroespacial, de construcción, electrónica, metal mecánica, fundición, alimentos, vidrio, minería, petróleo y gas, empaque, hule y acero entre otras. Cabe mencionar que, los discos de corte utilizados en el proceso de aserrado con de discos, son manufacturados a través de maquinado hidroabrasivo.

Las aplicaciones en la industria aeroespacial incluyen, el corte hidroabrasivo para estructuras de compósitos avanzados, superaleaciones de titanio, níquel y cobalto, y el corte de materiales apilados como metales y fibras de vidrio. El maquinado hidroabrasivo es particularmente útil para el corte de compósitos debido a la ausencia de calor y delaminación.

En la industria automotriz y entre sus proveedores, el uso del corte por chorro de agua abrasivo y no abrasivo es utilizado para tareas de rebabeo, corte de vestiduras y tapetes, corte de paneles de compósitos, corte de vidrio entre otras.

En la industria de la fundición la utilización del corte hidroabrasivo para la remoción de arena quemada de fundiciones de hierro y recubrimientos de cerámicos mono-shell. La separación de colada y mazarota (degating) y el detallado de la pieza es una aplicación común.

L. Consideraciones de seguridad.

Desde que el corte por chorro de agua o corte hidroabrasivo pudo fácilmente cortar carne y hueso, la protección a la operación es requerida. El ruido, generalmente durante el corte, está entre los rangos de 80 a 90 decibeles típicamente, pero se puede alcanzar los 120dB. Paneles de seguridad son especialmente diseñados para ensordecer el ruido durante el proceso y proteger al operador de éste fenómeno.

El personal de mantenimiento requiere ser entrenado para manejar los dispositivos del sistema de alta presión. Cada integración debe ser diseñada para crear un escudo, de tal forma que se prevea cualquier posibilidad de descarga de agua. Sensores de presión son utilizados para apagar el equipo en caso de una falla de tubería.

XI. Áreas de corte características de blocks I-4, V6 y V8's.

El corte actual de los blocks de aluminio Ford I-4 2.3 Lts, Daimler Chrysler V6 3.5 Lts, General Motors V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts se lleva acabo en Nemak S A con el proceso de corte por Sierra Cinta utilizando la banda dentada de carburo de tungsteno. En las figuras 16, 17, 18 y 19 se muestra que, para cada block se corta primero la mazarota en sierra 1, posteriormente la colada sierra 2 junto con algunas pequeñas conexiones adicionales en los productos V6 y V8.

Además, se muestran las dimensiones principales de los cortes así como las áreas de los cortes para los blocks Ford I-4 2.3 Lts, Daimler Chrysler V6 3.5 Lts, General Motors V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts respectivamente. De las figuras 17, 18, y 19, de los productos V6 y V8, es posible observar que la distancia que existe entre mas mazarotas principales y tamaño de la banda al llevar acabo el primer corte, entra en la mazarota opuesta representando un área de corte mucho mayor que la misma área de corte de las uniones de la block con su mazarota correspondiente. Es decir, que la segunda mazarota de cada producto por su cercanía con la primera representa un obstáculo mayor que la cinta se ve forzado a cortar una sección restándole vida útil, innecesariamente.

Por otro lado, es posible observar en las figuras 16, 17, 18 y 19 correspondientes a las áreas de corte de los productos Ford I-4 2.3 Lts, Daimler Chrysler V6 3.5 Lts, General Motors V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts respectivamente, la magnitud del área de corte de las conexiones con la colada y la base del monoblock (Pan Rail) versus las áreas de corte que representa la separación de las mazarotas.

Esta área de corte que adicionalmente se realiza durante la separación de uniones entre la mazarota y el block en los productos V6 y V8, se presenta en

la tabla 7. como un área de oportunidad y que representa un 66, 72, y 44 % del área de corte neta para los productos Daimler Chrysler V6 3.5 Lts, General Motors V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6, Lts respectivamente.

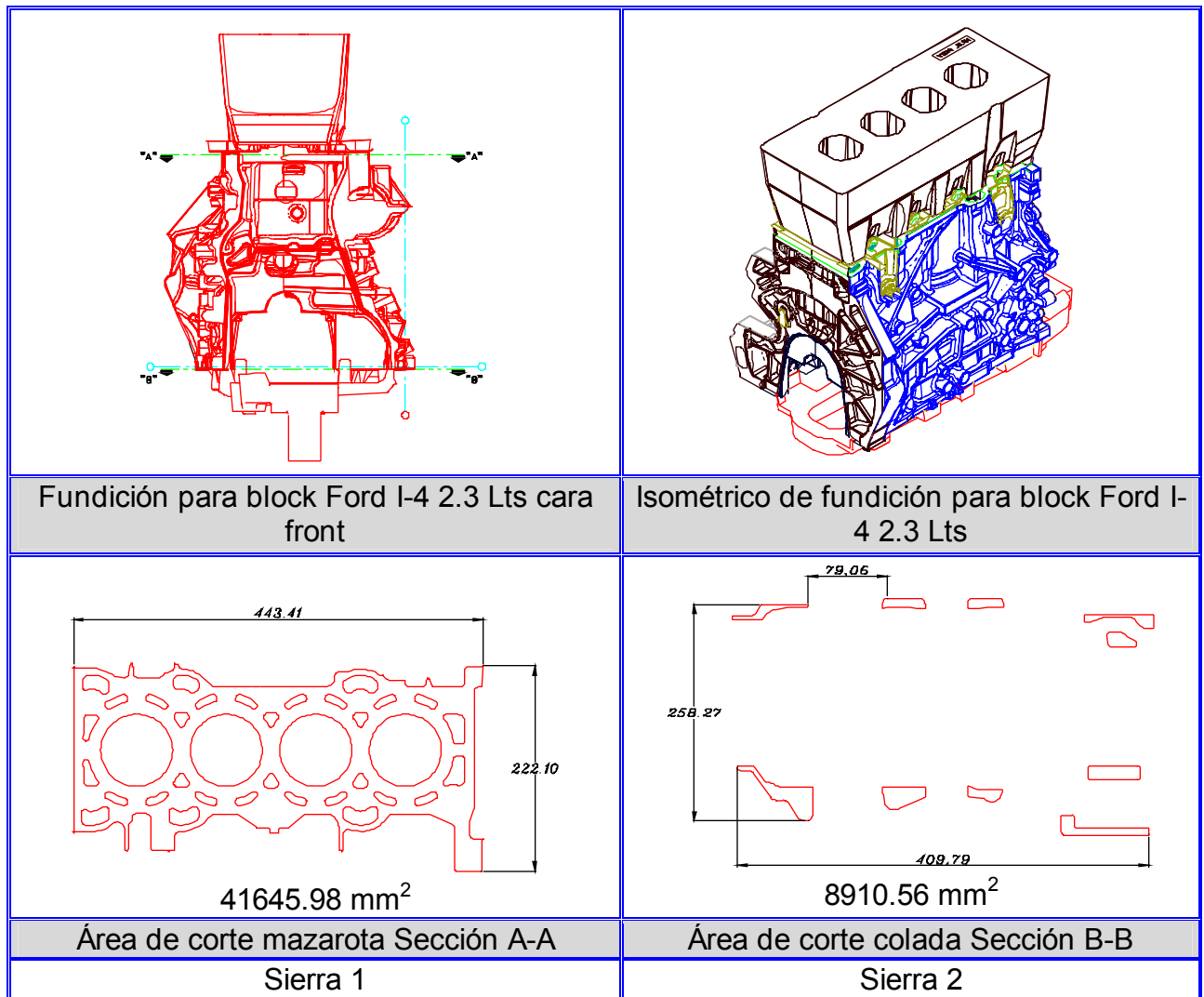


Figura 16. Áreas de corte mazarota y colada para block Ford I-4 2.3 Lts.

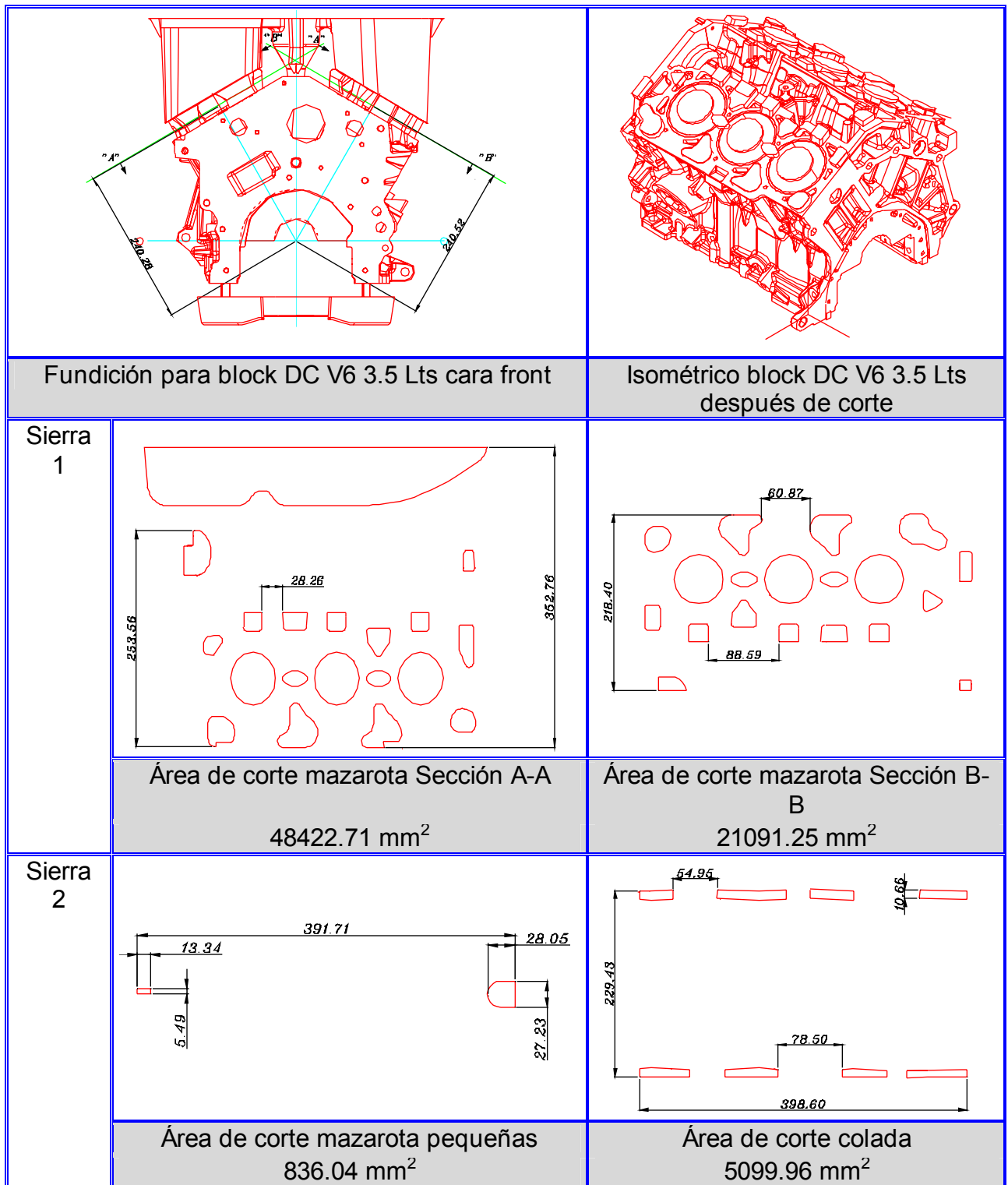


Figura 17. Áreas de corte mazarotas y colada para block DC V6 3.5 Lts.

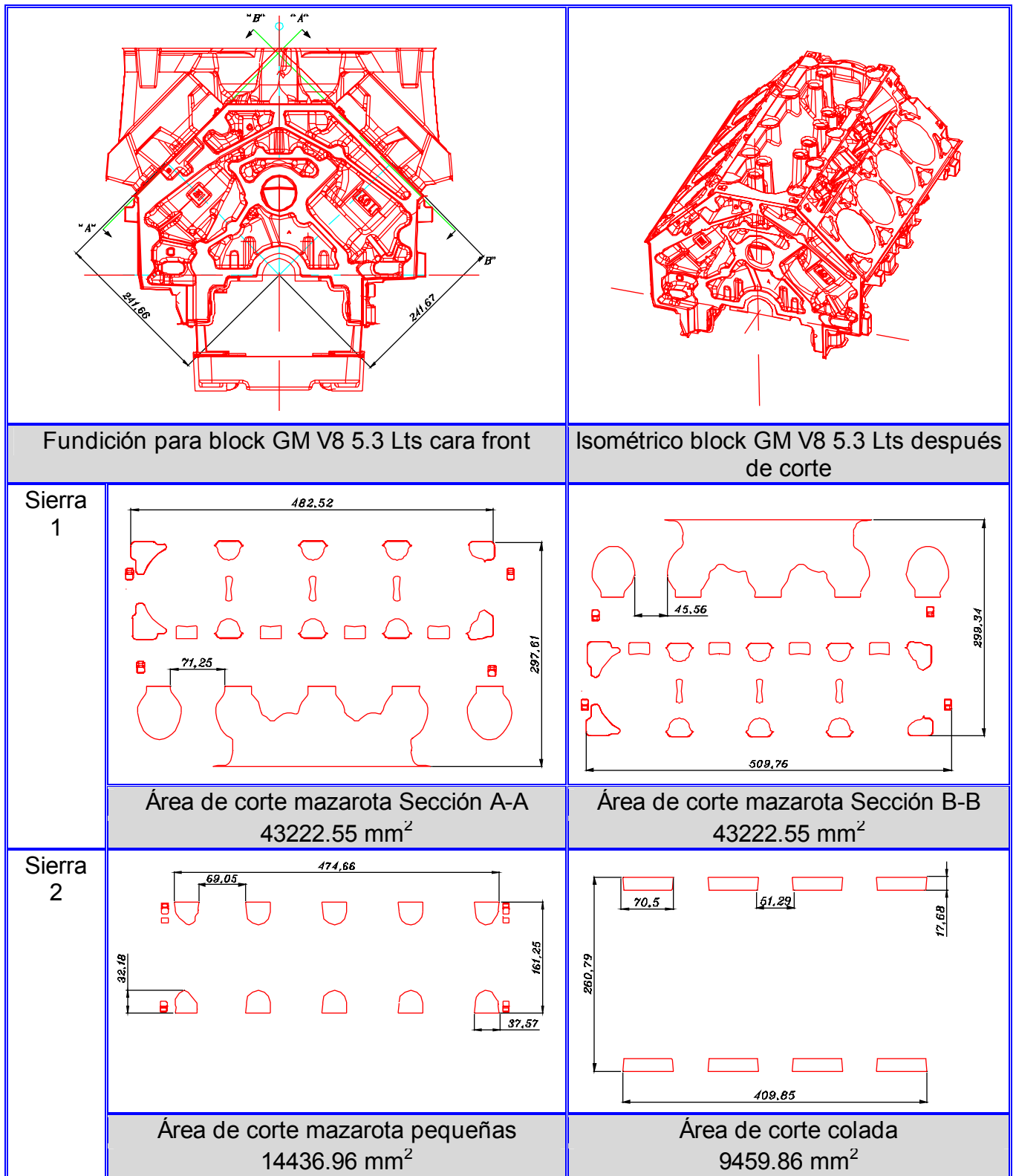


Figura 18. Áreas de corte mazarotas y colada para block GM V8 5.3 Lts.

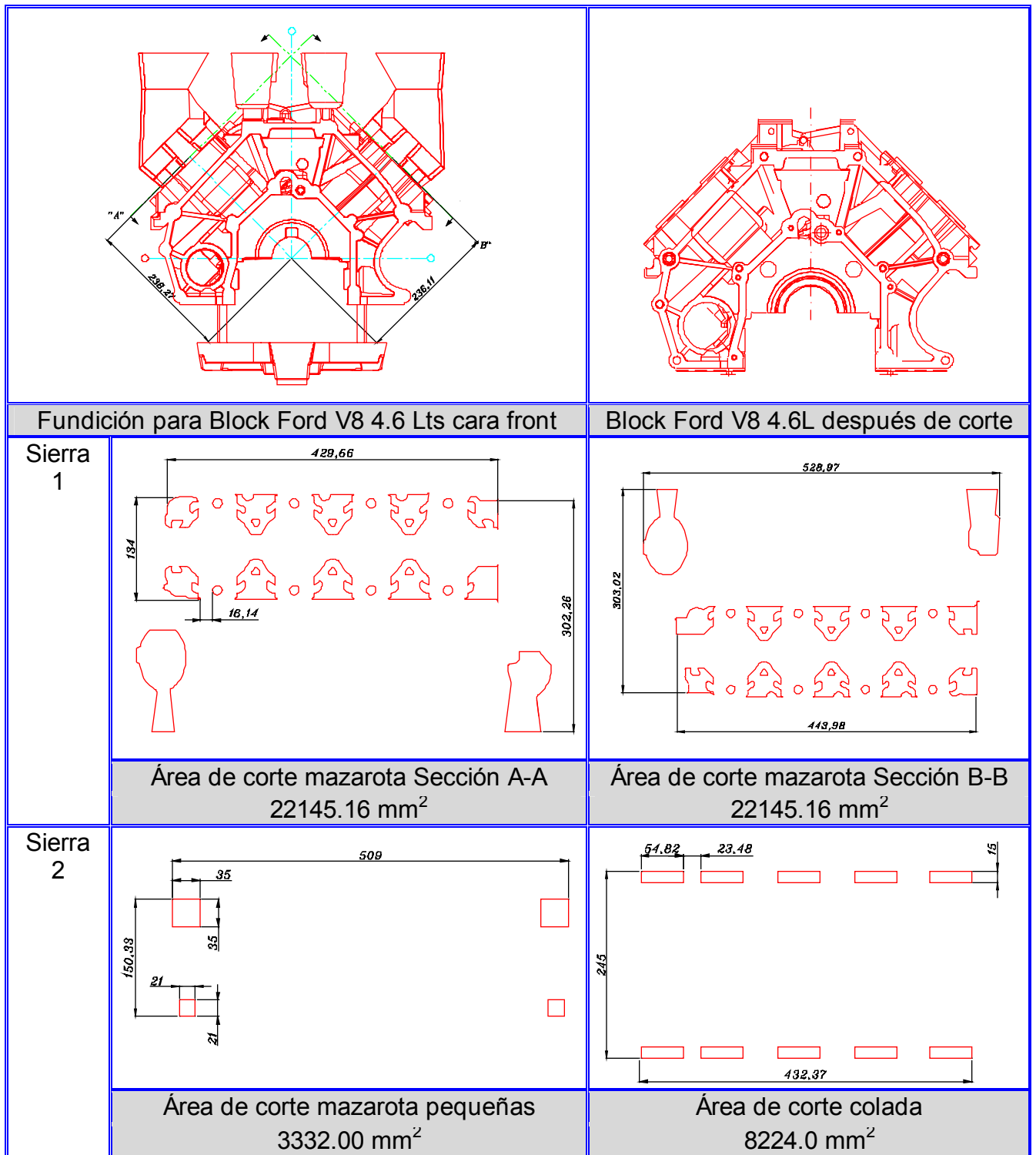


Figura 19. Áreas de corte mazarotas y colada para block Ford V8 4.6 Lts.

XII. Diseño de experimentos factorial 2³ para la vida útil de una banda de carburo de tungsteno.

A. Introducción.

Muchos procesos de manufactura en la industria metalmeccánica están compuestos de mecanismo complejos y pueden ser investigados de mejor manera a través de la experimentación. El propósito de la investigación, es la obtención de información relevante de un proceso para evaluarlo, especialmente cuando no existe un análisis teórico apropiado que describa los efectos en un cambio de parámetros o variables. Sin embargo, los problemas en las áreas de los procesos de manufactura, involucran una gran cantidad de variables con el resultado de que la experimentación viene a ser costosa. Para mejorar la eficiencia de la experimentación con respecto a la cantidad de información útil obtenida por unidad, técnicas de diseño de experimental estadística han demostrado ser muy poderosas.

Una experimentación apropiada consiste en el diseño de experimentos, el desempeño de la prueba, el análisis e interpretación de resultados. Desde el punto de vista estadístico, el diseño de experimentos es más importante que el análisis de datos. No importa que tan riguroso el análisis pueda ser, muy poca información útil puede obtenerse si el experimento fue planeado pobremente. En ésta situación, la información es despreciable y el daño de un diseño de experimentos pobre es irreparable. Por el contrario, una buena planeación del diseño de experimentos puede generar considerablemente información útil con análisis de datos muy simples.

Existe un número de ventajas del diseño de experimentos estadístico en comparación con el método convencional de una variable a la vez. Mediante la utilización del diseño de experimentos estadístico, muchas variables pueden ser estudiadas simultáneamente dentro de un proceso como efectos en la ganancia de la variable de respuesta bajo investigación. Además, las

interacciones entre las variables pueden ser evaluadas. Esto no es posible cuando es utilizado un procedimiento convencional de experimentos.

Cuando solo existe conocimiento limitado disponible concerniente al proceso, el cual involucra un gran número de variables, una investigación de todas las variables resulta ser muy costosa. Más allá, es probable que solo muy pocas variables sean de importancia relevante a la respuesta. Un diseño de experimentos estadístico, como el diseño factorial fraccionado [23,24], puede ser utilizado eficientemente para mostrar las variables más importantes que afectan al proceso.

Esta modelación o configuración, que es presentada a través del diseño de experimentos estadísticos, facilita el análisis y permite una interpretación clara de los resultados.

De hecho, no son necesarias manipulaciones matemáticas rigurosas.

B. Diseño Experimental Factorial 2^3 - Vida de útil de la cinta de la cinta de carburo de tungsteno.

Este experimento es concerniente los efectos del corte de monoblocks de aluminio en una banda de carburo de tungsteno. Existen 3 variables en el proceso de análisis (avance, velocidad, cantidad de arena incrustada por cm^2 en el canal de corte) que fueron investigadas para evaluar su influencia en la vida útil de la cinta; dejando fijas las variables lubricación, distancia entre guías y tensión de la banda.

Un plan experimental consiste primero en escoger un numero de fijo de niveles para cada factor o variable que se considera afecta el sistema. Subsecuentemente, los experimentos son llevados a cabo en todas las

combinaciones posibles de los factores y niveles. Este plan es llamado diseño factorial. El más simple y económico arreglo de diseño factorial es el que utiliza 2 niveles para cada factor. Entonces decir (K) variables son estudiadas simultáneamente a 2 niveles cada una, el diseño de experimentos contendrá 2^K corridas y es llamado diseño factorial 2^K .

Para las tres variables en estudio, tenemos un diseño factorial 2^3 (con $2^3 = 8$ experimentos) cubre todas las combinaciones posibles. Los 2 niveles para 3 variables fueron escogidos como sigue en la tabla 3:

Variables	Nivel Inferior	Nivel Superior
Avance (A) , [mm/min]	1000	1200
Velocidad (V) , [m/min]	1300	1800
Arena (W) , [gr/cm ²]	3	10

Tabla 3. Variables y niveles para estudio de vida útil de la cinta.

Si las escalas de las tres variables son seleccionadas apropiadamente, las ocho combinaciones de las condiciones de prueba pueden ser representadas como se muestra en la figura 20. Para simplificar los cálculos, una codificación de las variables estandarizadas en (-1) y (+1), o simplemente mediante A, V y W a X_1 , X_2 y X_3 respectivamente, de acuerdo a las siguientes relaciones.

$$X_1 = \frac{A - 1100 \text{ mm/min}}{100 \text{ mm/min}} \quad \text{Ec (2)}$$

$$X_2 = \frac{V - 1550 \text{ m/min}}{\quad} \quad \text{Ec (3)}$$

250 m/min

$$X_3 = \frac{W - 6.5 \text{ gr/cm}^2}{3.5 \text{ gr/cm}^2} \quad \text{Ec (4)}$$

El nuevo sistema de coordenadas (X_1 , X_2 y X_3) tiene su origen al centro del cubo y los niveles de las variables son diseñados por el número de paréntesis superpuestas en la figura 20.

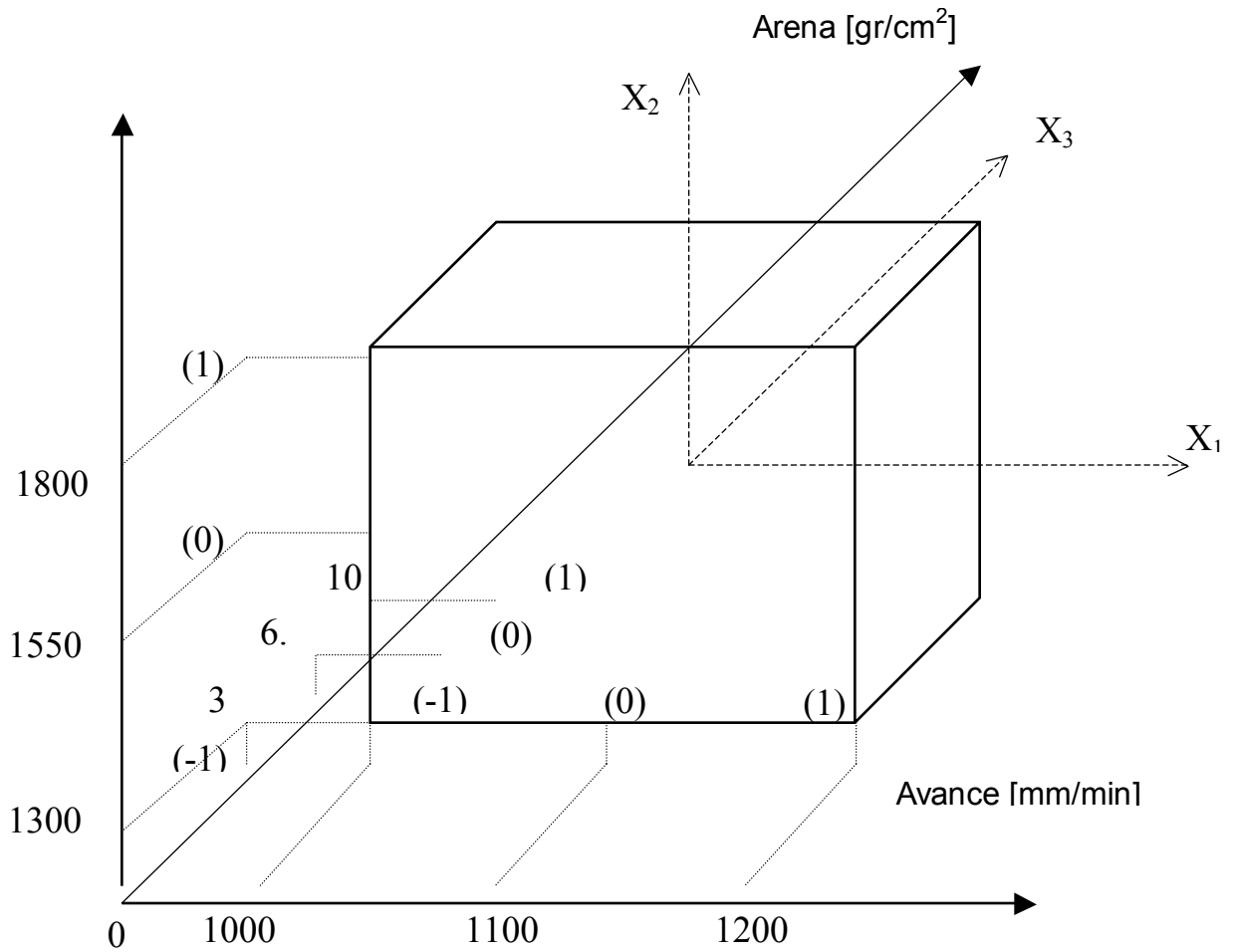


Figura 20. Representación geométrica de la región experimental y su transformación de coordenadas.

Por ejemplo, cuando el avance es fijado en el nivel superior a 1200 mm/min;

$$X_1 = \frac{1200 - 1100}{100} = +1; \text{ y cuando } A = 1000 \text{ mm/min entonces,}$$

$$X_1 = \frac{1000 - 1100}{100} = -1.$$

A través de esta información (o estandarización) de las variables es claro que todas las variables tienen dos rangos experimentales a cubrir (desde -1 a +1) en el nuevo sistema de coordenadas. Las 8 esquinas del cubo en la figura 21 representan las 8 condiciones únicas de prueba. Estas combinaciones de las condiciones de prueba son arregladas en un orden particular estandarizado mostrado en la tabla 4. El juego de 3 columnas de las condiciones de prueba codificadas es llamado “matriz de diseño” del diseño de experimentos factorial. La primera columna de la matriz de diseño consiste en asignar signos (-) y (+), la segunda columna de alternar pares de signos (-) y (+); y la tercera columna de alternar grupos de signos de 4 (-) y (+).

	Condiciones de Corte						Resultado números de cortes por cinta		
	Codificado			Actual					
	X ₁	X ₂	X ₃	A [mm/min]	V [m/min]	W [gr/cm ²]	Corrida 1	Corrida 2	Prom. ŷ _i
1	-	-	-	1000	1300	3	778	762	770
2	+	-	-	1200	1300	3	780	790	785
3	-	+	-	1000	1800	3	812	832	822
4	+	+	-	1200	1800	3	783	761	772
5	-	-	+	1000	1300	10	764	754	759
6	+	-	+	1200	1300	10	779	795	787
7	-	+	+	1000	1800	10	809	803	806
8	+	+	+	1200	1800	10	775	763	769

Tabla 4. Condiciones experimentales y resultados para diseño factorial 2³.

El orden estándar de las condiciones experimentales es diseñado por el número en círculo en las ocho esquinas del cubo como se muestra en la figura 21. Debe notarse que el experimento actual debe correr en secuencia aleatoria. El número siguiente al círculo en la figura 21 son los valores promedio resultantes de las replicas del experimento.

C. Efectos principales.

Para mostrar los efectos principales de una variable con respecto a una salida, comparaciones individuales pueden llevarse a cabo para las 4 combinaciones de las otras dos variables como se muestra en la tabla 5. El promedio de los efectos principales para el Avance, $E[X_1]$, es estimado mediante las diferencias de las cuatro comparaciones individuales.

$$E[X_1] = \frac{1}{4} [(\hat{y}_2 - \hat{y}_1) + (\hat{y}_4 - \hat{y}_3) + (\hat{y}_6 - \hat{y}_5) + (\hat{y}_8 - \hat{y}_7)]$$

$$E[X_1] = \frac{1}{4} [(\hat{y}_2 + \hat{y}_4 + \hat{y}_6 + \hat{y}_8) - (\hat{y}_1 + \hat{y}_3 + \hat{y}_5 + \hat{y}_7)] \quad \text{Ec. (5)}$$

Comparación Individual de Resultado de Prueba	Condiciones de otras variables a las cuales la comparación es realizada	
	Velocidad, V [m/mm]	Cantidad Arena, W [gr/cm ²]
$(\hat{y}_2 - \hat{y}_1) = (785 - 770) = 15$	1300	3
$(\hat{y}_4 - \hat{y}_3) = (772 - 822) = -50$	1800	3
$(\hat{y}_6 - \hat{y}_5) = (787 - 759) = 28$	1300	10
$(\hat{y}_8 - \hat{y}_7) = (769 - 806) = -37$	1800	10
El promedio de los efectos para el Avance: $= \frac{1}{4} [15 - 50 + 28 - 37] = -11$		

Tabla 5. Comparaciones individuales de los efectos principales para el Avance.

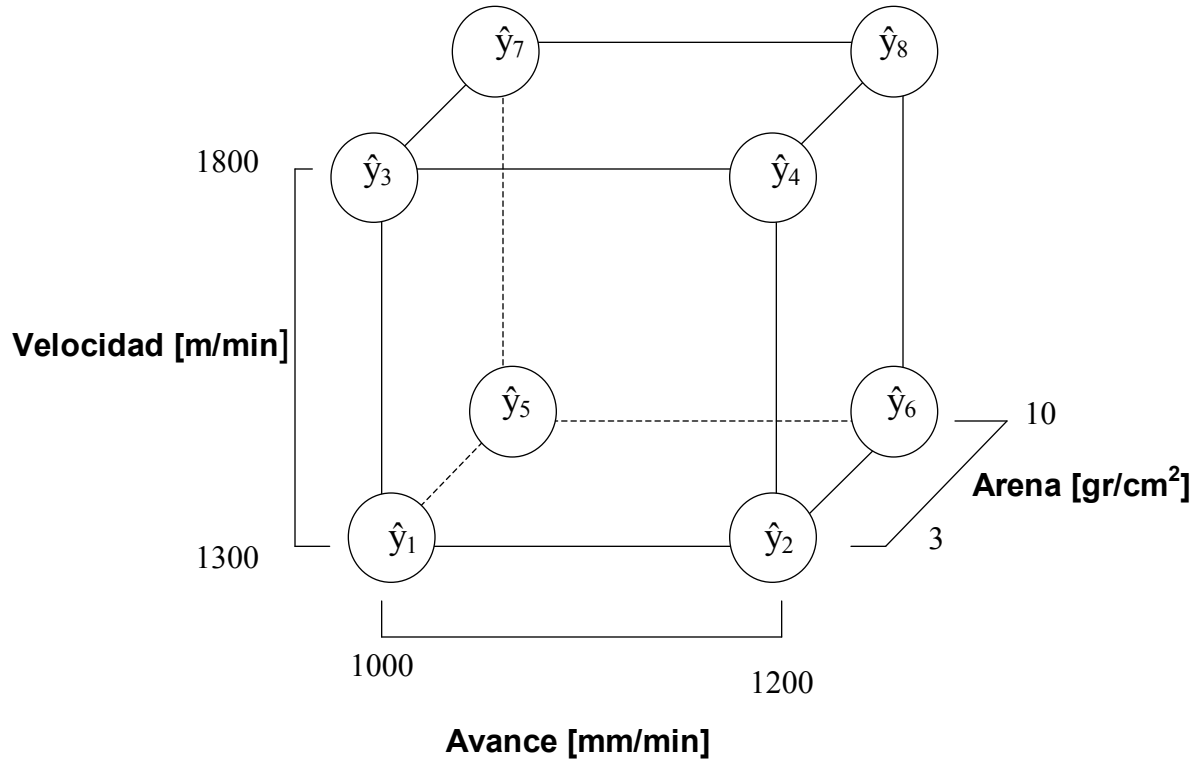


Figura 21. Representación geométrica del diseño experimental y resultado de las pruebas.

Cuando los datos experimentales son sustituidos en la Ec. 5 da como resultado la estimación de efecto principal debida a la variable X_1 (Avance):

$$E[X_1] = \frac{1}{4} [(\hat{y}_2 + \hat{y}_4 + \hat{y}_6 + \hat{y}_8) - (\hat{y}_1 + \hat{y}_3 + \hat{y}_5 + \hat{y}_7)]$$

$$E[X_1] = \frac{1}{4} [(\hat{y}_2 + \hat{y}_4 + \hat{y}_6 + \hat{y}_8) - (\hat{y}_1 + \hat{y}_3 + \hat{y}_5 + \hat{y}_7)] = -11$$

Físicamente, la Ec. 5 representa la diferencia de las respuestas promedio entre los niveles alto y bajo de una variable X_1 . Una representación geométrica del efecto principal del Avance es mostrada en la figura 22 donde las respuestas promedio en dos caras cruzadas son comparadas entre sí. Además, los efectos principales de la velocidad y la cantidad de arena pueden

ser determinados como se muestran en las figuras 23 y 24 respectivamente mediante la comparación apropiada de las otras caras pares. Es importante denotar que la combinación lineal de la Ec. 5 puede ser obtenida tomando la suma de los productos de los elementos que corresponden en las columnas X_1 y \hat{y}_i en la tabla 4 y dividiéndolo por 4.

$$\begin{aligned}
 E[X_1] &= \frac{1}{4} [(-\hat{y}_1 + \hat{y}_2 - \hat{y}_3 + \hat{y}_4 - \hat{y}_5 + \hat{y}_6 - \hat{y}_7 + \hat{y}_8)] \\
 &= \frac{1}{4} [-770 + 785 - 822 + 772 - 759 + 787 - 806 + 769] \\
 &= -11
 \end{aligned}$$

y que resulta el mismo valor obtenido por la Ec. 5.

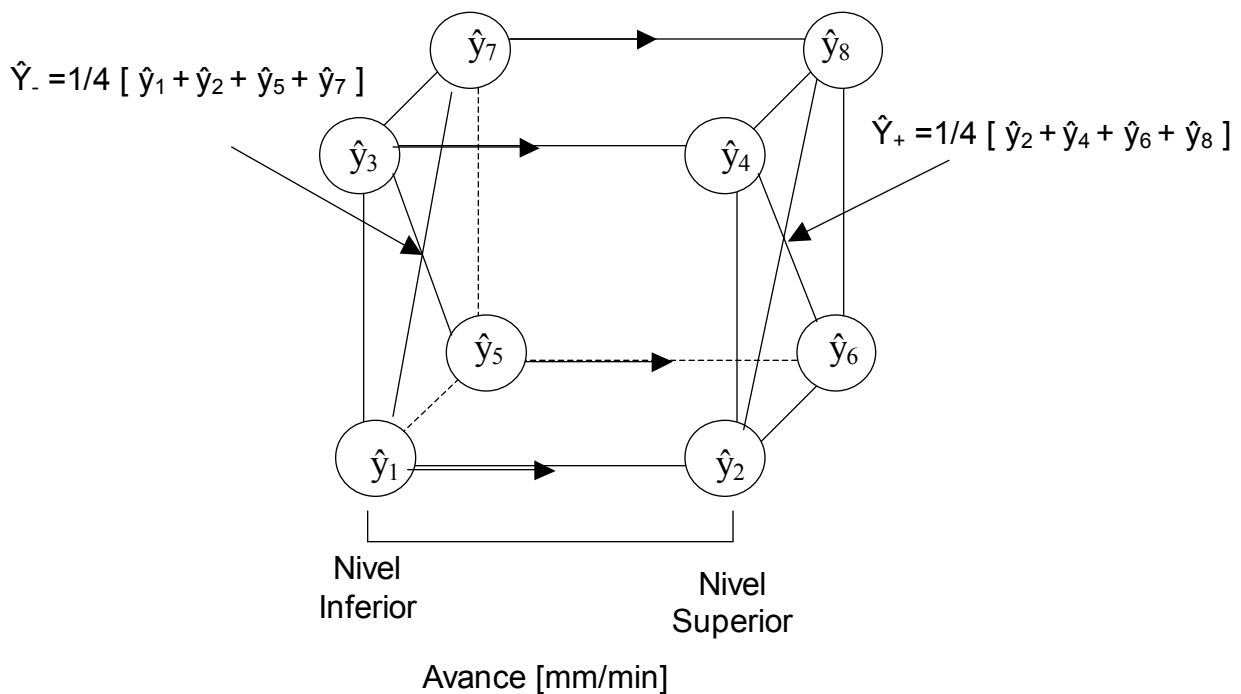


Figura 22. Representación geométrica de los efectos principales para el avance.

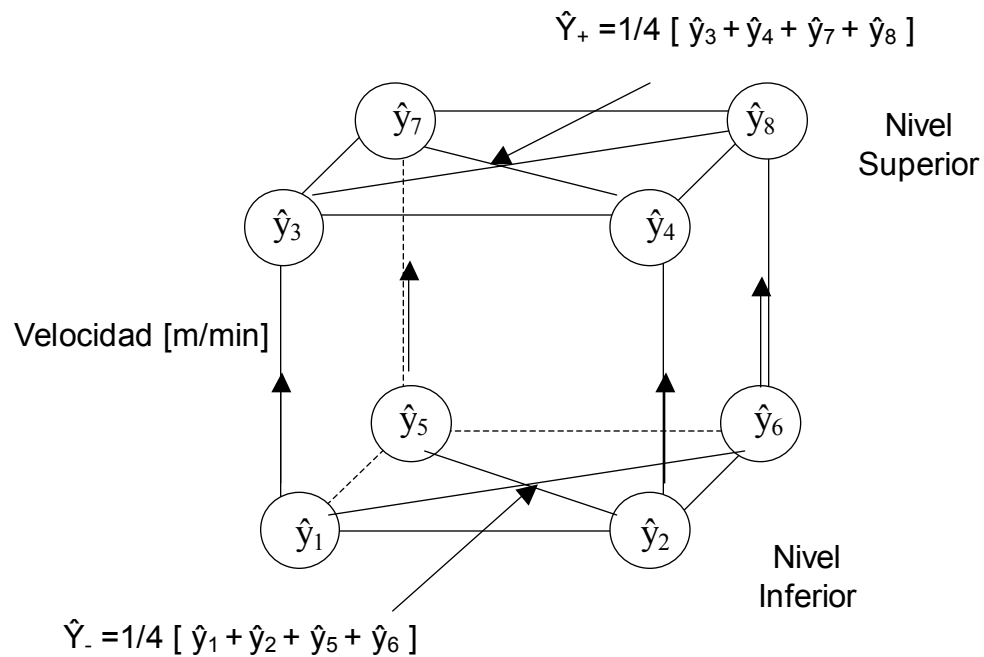


Figura 23. Representación geométrica de los efectos principales para la velocidad.

En general, el efecto principal de una variable X_i puede ser estimado mediante la ecuación:

$$E[X_i] = 2/N \sum (\text{+/- elementos en la columna } X_i) (\hat{y}_j) \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde $i = 1, 2, \dots, k$. Y $N = 2^k$ igual al número total de intentos

$$E[X_2] = 1/4 [(-\hat{y}_1 - \hat{y}_2 + \hat{y}_3 + \hat{y}_4 - \hat{y}_5 - \hat{y}_6 + \hat{y}_7 + \hat{y}_8)] = 17 \quad \text{Ec. (7)}$$

$$E[X_3] = 1/4 [(-\hat{y}_1 - \hat{y}_2 - \hat{y}_3 - \hat{y}_4 + \hat{y}_5 + \hat{y}_6 + \hat{y}_7 + \hat{y}_8)] = -32.5 \quad \text{Ec. (8)}$$

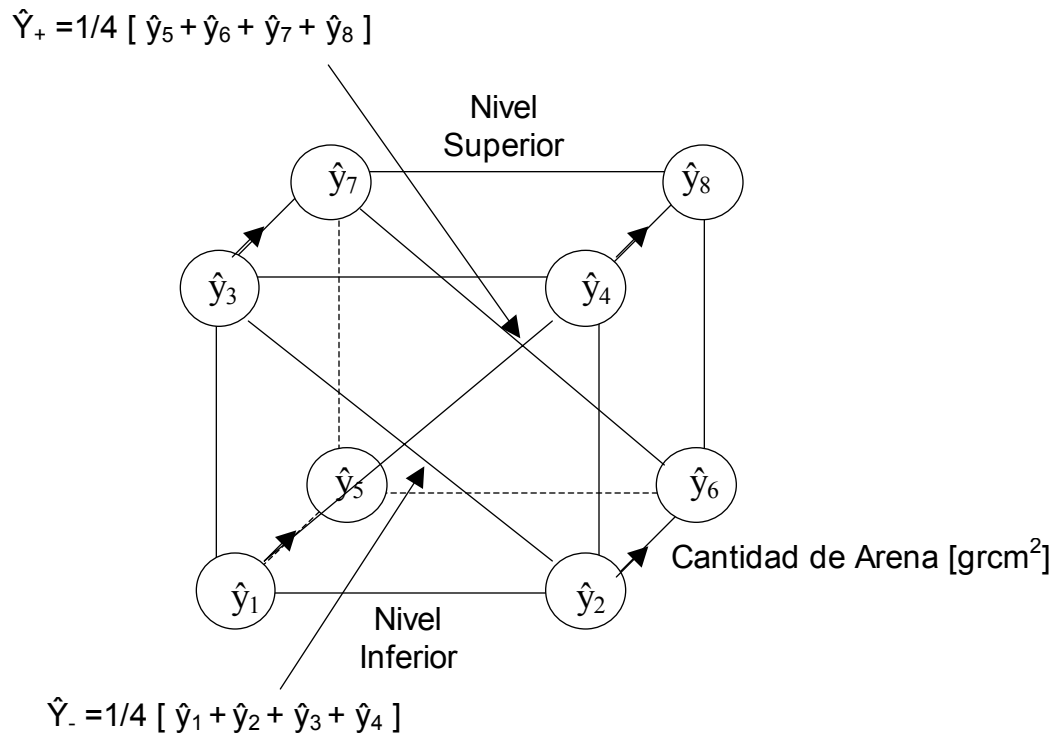


Figura 24. Representación geométrica de los efectos principales para la cantidad de arena.

D. Efecto de las interacciones.

El método de una variable a la vez provee solamente un estimado de los efectos sobre una variable bajo condiciones fijas de otras variables. El diseño factorial, por otro lado, provee las indicaciones de sí las variables están actuando o no independientemente. En esta prueba las interacciones 2 nivel entre el avance y la cantidad de arena pueden ser examinadas mediante el diagrama de 2 vías ilustradas en la figura 25. Este diagrama fue construido temporalmente ignorando el efecto de la velocidad de la banda, por lo que se colapsó el cubo de la figura 21 verticalmente hacia un plano. Los valores de las esquinas del diagrama de 2 vías representan los promedios de cada una de las dos pruebas.

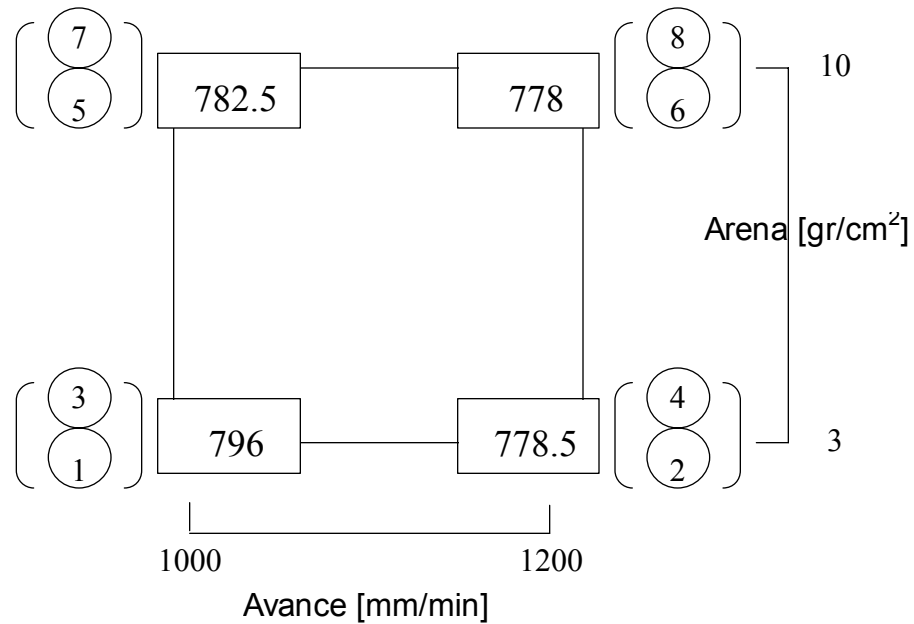


Figura 25. Representación de la iteración de dos factores entre avance y cantidad de arena.

Una examinación visual de este diagrama, revela que el efecto del avance no es el mismo cuando la cantidad de arena está en su nivel inferior. Cuantitativamente, al variar el rango del avance, también se refleja un decremento de la vida de la cinta. Esto significa que las variables de avance y cantidad de arena no se comportan independientemente, de tal forma que se dice que interactúan.

Una medición de la interacción es proveída por la diferencia entre el promedio del efecto del avance con la cantidad de arena menor y el promedio del avance con la de mayor cantidad.

$$E[X_1 X_3] = \frac{1}{4} [(\hat{y}_1 + \hat{y}_3 + \hat{y}_6 + \hat{y}_8) - (\hat{y}_2 + \hat{y}_4 + \hat{y}_5 + \hat{y}_7)] \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde la notación $E[X_1 X_3]$ representa un estimado de la interacción $X_1 X_3$. Una interpretación geométrica de la interacción de los efectos se muestra en la figura 26, donde la interacción de dos factores es estimada por la diferencia entre los promedios representadas por planos diagonales. La combinación lineal para estimar la interacción de los efectos puede ser obtenida por una expresión general similar a la de la Ec. (10).

$$E[\text{Interacción}] = 2/N \sum_{j=1}^N (\text{+/- elementos de una interacción}) (\hat{y}_j) \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde los elementos de la interacción son generados mediante el producto de los elementos correspondientes de la interacción de los efectos principales en la matriz de diseño. Esto es ilustrado en la tabla 4, donde los elementos en la columna denotada como Interacción $X_1 X_3$, fueron obtenidos mediante el producto aritmético de los elementos correspondientes en la columna de los efectos principales X_1 y X_3 en el orden de [+ - + - - + - +]. Aplicando la Ec. 10, la interacción entre el avance y la cantidad de arena es:

$$E[X_1 X_3] = 1/4 [(\hat{y}_1 - \hat{y}_2 + \hat{y}_3 - \hat{y}_4 - \hat{y}_5 + \hat{y}_6 - \hat{y}_7 + \hat{y}_8)] = 6.5$$

El cual es el mismo resultado obtenido por la ecuación 10

$$E[X_1 X_2] = 1/4 [(\hat{y}_1 - \hat{y}_2 - \hat{y}_3 + \hat{y}_4 + \hat{y}_5 - \hat{y}_6 - \hat{y}_7 + \hat{y}_8)] = -7 \quad \text{Ec. (11)}$$

$$E[X_2 X_3] = 1/4 [(\hat{y}_1 + \hat{y}_2 - \hat{y}_3 - \hat{y}_4 - \hat{y}_5 - \hat{y}_6 + \hat{y}_7 + \hat{y}_8)] = -2.5 \quad \text{Ec. (12)}$$

$$E[X_1 X_2 X_3] = 1/4 [(-\hat{y}_1 + \hat{y}_2 + \hat{y}_3 - \hat{y}_4 + \hat{y}_5 - \hat{y}_6 - \hat{y}_7 + \hat{y}_8)] = 0 \quad \text{Ec. (13)}$$

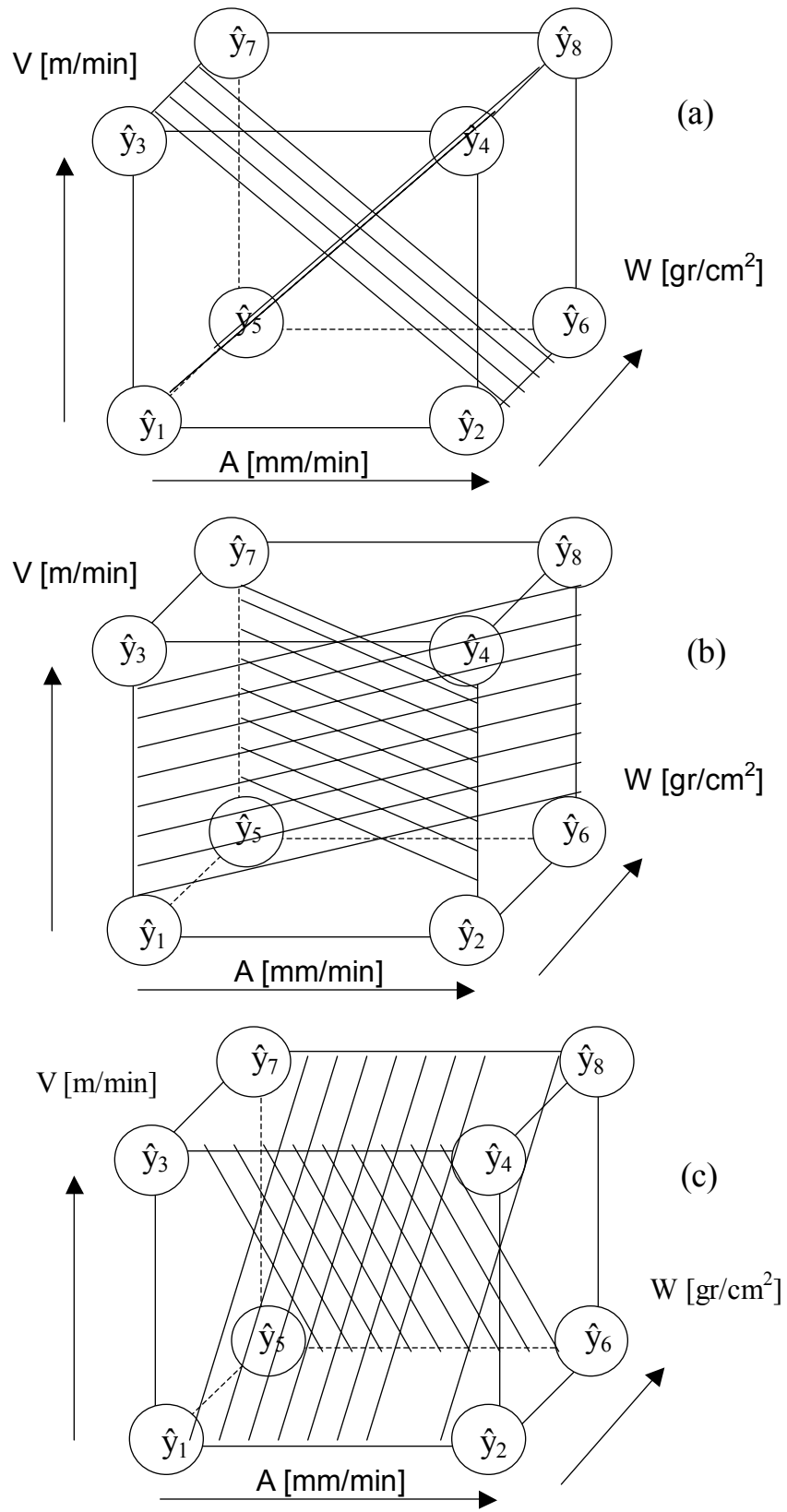


Figura 26. Representación de las iteraciones de dos factores a) Avance -

Velocidad, b) Avance - Cantidad de Arena, c) Velocidad - Cantidad de Arena.

La desviación estándar de los efectos es calculada mediante la expresión:

$$S^2 = 1/N (\hat{y}_i - Y)^2 \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde N es el numero de muestras, \hat{y}_i representa el valor de la observación promedio, y "Y" es el promedio de las observaciones. En suma, el intervalo del de confianza al 95% para el efecto estimado es determinado mediante la expresión:

$$\{ \text{Efecto} \} \pm \{ t_{8, .05} \} \{ \text{Desviación estándar estimado del efecto} \}$$

donde $t_{8, .05} = 2.306$ es la probabilidad en la distribución t basado en 8 grados de libertad y que es obtenida de tablas estadísticas. Entonces, el intervalo de confianza del 95% es estimado como:

$$(\text{Efecto}) \pm (2.306)(9.88) \text{ cortes}$$

	Efecto ± Desviación Estándar, (Número de Cortes)	Intervalo de Confidencia al 95%
Efectos Principales		
Avance, A	- 11 ± 9.88	-33.8 a 11.8
Velocidad, V	17 ± 9.88	-5.8 a 39.8
Cantidad de Arena, W	-32.5 ± 9.88	-55.3 a - 9.7
Interacciones de 2do Orden		
AV	-7 ± 9.88	-29.8 a 15.8
AW	6.5 ± 9.88	-16.3 a 29.3
VW	-2.5 ± 9.88	-25.3 a 20.3
Interacción de 3er Orden		
AVW	0 ± 9.88	-22.8 a 22.8

Tabla 6. Efectos de las variables a un intervalo de confianza del 95% para el Diseño factorial 2³ Vida de la Cinta.

E. Interpretación de resultados.

Los resultados de la tabla 6 indican que el efecto principal de la cantidad de arena es muy grande que la desviación estándar de los efectos. Las interacciones de segundo orden AV y VW son despreciables en comparación con la desviación estándar de los efectos. El efecto de la arena es más 3 veces mayor que la desviación estándar de los efectos; y existe un intervalo de 95% de confianza que esta alejado de cero, lo cual refleja que es un efecto real en la respuesta de gran impacto en la vida de la cinta.

XIII. Impacto de la arena en la banda con dientes de carburo de tungsteno.

Mediante el diseño de experimentos se ha podido evaluar el efecto que tiene la arena en la vida de la banda de carburo de tungsteno versus otras variables importantes del proceso de corte. Sin embargo, el impacto de la arena en la vida de la banda en relación de cortar superficies libres de ésta, es posible estimarla con los datos de mediciones llevadas a cabo en estas dos condiciones.

Un monitoreo por un periodo de 42 semanas registro el numero de cortes que se pudieron realizar promedio por una banda para cada producto Ford I-4 2.3 Lts, Daimler Chrysler V6 3.5 Lts, General Motors V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts. En las figuras 27 y 28 se presenta el numero de Blocks cortados por banda promedio a lo largo de este periodo tanto mazarota como colada para los productos General Motors V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts respectivamente.

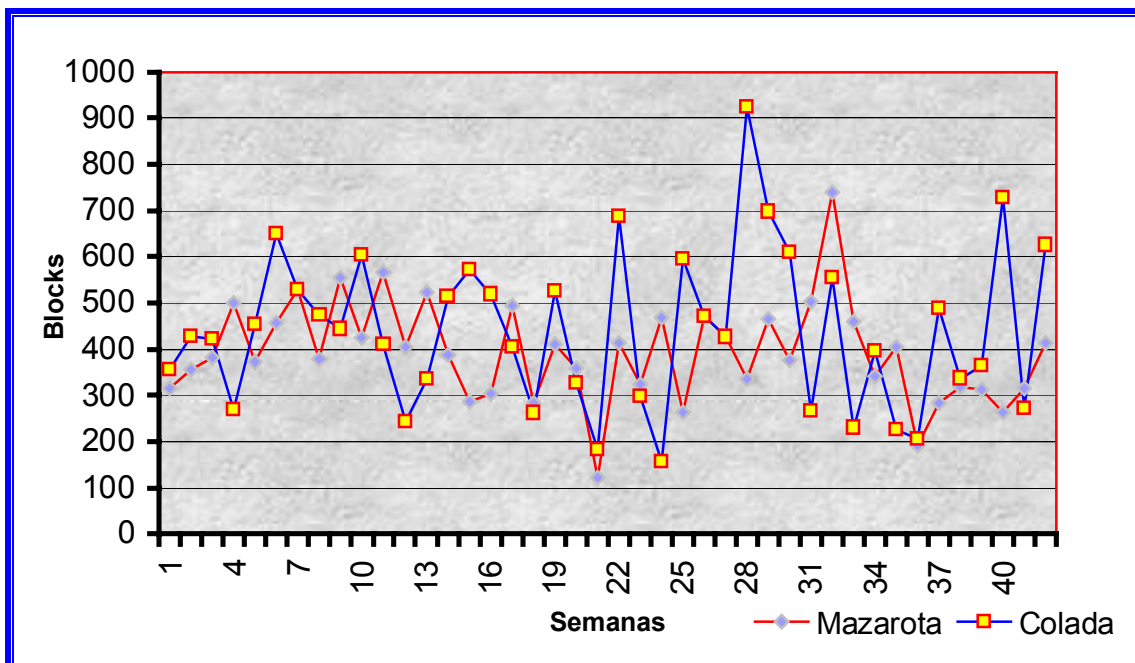


Figura 27. Consumo de cintas en colada y mazarota en blocks GM V8 5.3 Lts.

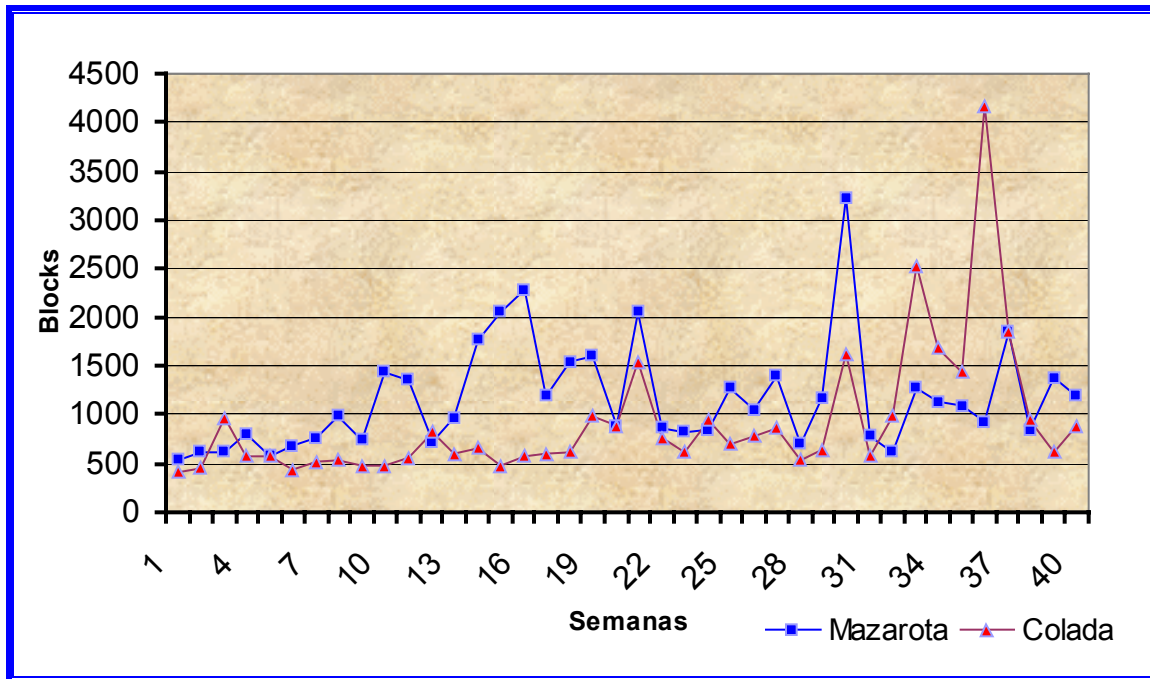


Figura 28. Consumo de cintas en colada y mazarota en blocks Ford I4 2.3 Lts.

Analizando el número de cortes de mazarotas en todos los productos se conoce la vida a lo largo de 42 semanas de producción representada en cantidad de Blocks que fueron cortados por banda promedio. Así mismo, haciendo uso del cálculo de las áreas de corte reales, es posible determinar la vida de la banda con dientes de carburo de tungsteno en superficies limpias de arena expresadas en milímetros cuadrados [mm²]. En la tabla 7 se muestra la vida en milímetros cuadrados para cada producto de la mazarota.

Producto	Sierra 1				
	Mazarotas [mm ²]	Área de Oportunidad [mm ²]	%	Blocks x Cinta	Vida [mm ²] x 10 ⁶
Ford 4.6 Lts	44,290.32	19,334.42	44%	685	30.34
GM 5.3 Lts	86,445.10	62,351.84	72%	390	33.71
DC 3.5 Lts	68,513.96	44,941.58	66%	658	45.08
Ford 2.3 Lts	41,645.98			1095	45.60

Tabla 7. Relación de áreas de corte versus vida de la cinta en corte de mazarotas.

De esta tabla 7, es posible hacer ciertas observaciones importantes. 1) El Producto GM 5.3 V8 Lts cuenta con el doble de área de corte de mazarota que la que representa el producto Ford 4.6 V8 Lts y, sin embargo, la vida de ambas a lo largo de 42 semanas es casi la misma. Esto significa que, al no haber arena incrustada en el lado de la mazarota, posiblemente una combinación de lubricación, velocidad y avance pudieran mejorarse en el caso del producto Ford V8 4.6 Lts, ya que del producto GM V8 5.3 Lts se esperaría tener menor rendimiento con relación a la mayor área de corte. 2) La vida del producto Ford I4 2.3 Lts, es un 50% mayor al Ford V8 4.6 Lts, a pesar de que tienen áreas de corte muy similares. 3) El producto DC V6 3.5 Lts tiene un 20% de área de corte menor respecto a la del producto GM V8 5.3 Lts, y casi se cumple en la misma proporción el rendimiento esperado mayor del producto DC V6 3.5 versus el GM V8 5.3 Lts. 4) El producto GM 5.3 Lts, cuenta con mas del doble de área de corte que la del producto Ford 2.3 Lts, por lo que se esperaría tener un mayor rendimiento de la cinta en el producto Ford 2.3 Lts, y sólo se logra un 50% más de rendimiento.

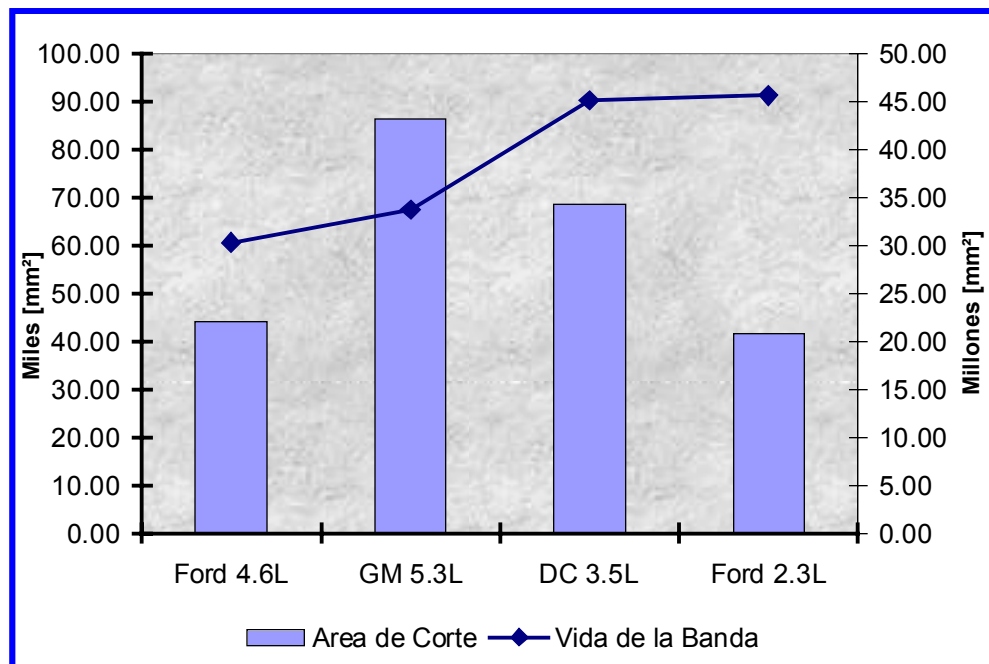


Figura 29. Relaciones de áreas de corte en mazarota por producto y rendimientos.

Por otro lado, en la condición de arena incrustada que se presenta en el lado de la colada, y haciendo uso de la misma información a lo largo de 42 semanas de producción, la vida de la cinta en el lado de la colada expresada en número de blocks cortados por banda de carburo de tungsteno, se obtuvo la tabla 8 que muestra también la conversión de la vida de la banda en milímetros cuadrados para cada producto.

Producto	Sierra 2			
	Colada [mm ²]	Mazarotas Chicas [mm ²]	Blocks x Cinta	Vida [mm ² x 10 ⁶]
Ford 4.6 Lts	8,224.00	3,332.00	632	7.30
GM 5.3 Lts	9,459.86	14,436.96	444	10.61
DC 3.5 Lts	5,099.96	836.04	1423	8.45
Ford 2.3 Lts	8,910.56		891	7.94

Tabla 8. Relación de áreas de corte versus vida de la cinta en corte de coladas.

De la tabla 8, también se pueden hacer algunas observaciones importantes. 1) Las áreas de corte del área de la colada son muy semejantes y su bajo rendimiento con relación a la tabla 7, es debido a la presencia de arena en el canal de corte. 2) El rendimiento de la cinta del producto Ford 4.6 Lts e de corte de colada, es casi igual a la del Ford 2.3 Lts, y aparenta haber relación, ya que el área de corte es muy semejante entre ellos.

Mediciones a diferentes lotes de producción han arrojado variadas concentraciones de arena presentes en las conexiones entre los Blocks y las coladas de los productos. En la tabla 9, se muestran 13 mediciones realizadas a las conexiones de los productos Ford V8 4.6 Lts y Ford I-4 2.3 Lts.

Muestra	Ford 4.6L [gr/cm ²]	Ford 2.3L [gr/cm ²]
1	2.66	9.83
2	2.80	10.15
3	3.52	9.23
4	3.33	9.89
5	2.95	11.20
6	3.28	9.66
7	2.76	10.10
8	2.91	10.34
9	2.98	9.33
10	2.89	10.20
11	2.75	10.72
12	3.47	9.98
13	3.10	10.15
Promedio	3.03	10.06

Tabla 9. Concentración de arena en el canal de corte de la colada en los productos Ford V8 4.6 Lts y Ford I-4 2.3 Lts.

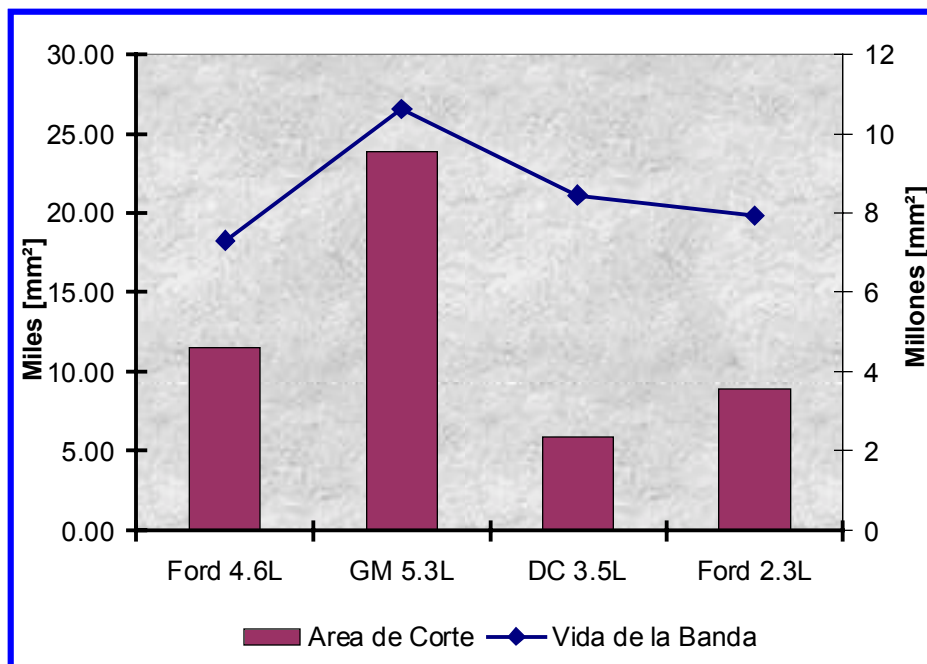


Figura 30. Relaciones de áreas de corte en colada por producto y rendimientos.

Haciendo un análisis de las tablas 7 y 8 se puede concluir que el impacto de la arena en la vida promedio de la cinta es:

$$L = 100 - \Sigma (X_K) / (X_J) \times 100 \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde X_K representa los valores de la vida de la banda en el lado de colada expresada en milímetros cuadrados y X_J los valores de la vida de la banda en el lado de mazarota expresada en milímetros cuadrados para cada uno de los productos y L, representa el impacto de la arena en la vida de la banda de carburo de tungsteno expresada en porcentaje.

De la Ec. XX se obtiene que:

$$L = 100 - (34.30 / 154.73) \times 100$$

$$L = 77.8 \%$$

XIV. Planeación y ejecución de pruebas.

A. Corte por disco.

Para poder llevar acabo las prueba correspondiente de corte por disco, se contactó a la compañía Shiga Yamashita localizada en Yokaichi Chi, Shiga Japón, con el fin de que colaboraran con equipo de prueba, y poder medir el avances, consumos, tolerancias de éste proceso aplicado a las fundiciones de Aluminio A319 para blocks Ford I-4 2.3 Lts, Daimler Chrysler V6 3.5 Lts, General Motors V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts. Esta compañía es experta en la fabricación de maquinaria para este tipo de aplicaciones y accedieron en

Figura 30. Relaciones de áreas de corte en colada por producto y rendimientos.

Haciendo un análisis de las tablas 7 y 8 se puede concluir que el impacto de la arena en la vida promedio de la cinta es:

$$L = 100 - \Sigma (X_K) / (X_J) \times 100 \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde X_K representa los valores de la vida de la banda en el lado de colada expresada en milímetros cuadrados y X_J los valores de la vida de la banda en el lado de mazarota expresada en milímetros cuadrados para cada uno de los productos y L, representa el impacto de la arena en la vida de la banda de carburo de tungsteno expresada en porcentaje.

De la Ec. XX se obtiene que:

$$L = 100 - (34.30 / 154.73) \times 100$$

$$L = 77.8 \%$$

XIV. Planeación y ejecución de pruebas.

A. Corte por disco.

Para poder llevar acabo las prueba correspondiente de corte por disco, se contactó a la compañía Shiga Yamashita localizada en Yokaichi Chi, Shiga Japón, con el fin de que colaboraran con equipo de prueba, y poder medir el avances, consumos, tolerancias de éste proceso aplicado a las fundiciones de Aluminio A319 para blocks Ford I-4 2.3 Lts, Daimler Chrysler V6 3.5 Lts, General Motors V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts. Esta compañía es experta en la fabricación de maquinaria para este tipo de aplicaciones y accedieron en

realizar una demostración para evaluar los desempeños que se podrían lograr, aplicando la tecnología de corte por disco con dientes cementados de diamante.

i. Prueba.

Fueron enviados 5 Blocks Ford I-4 2.3 Lts, Daimler Chrysler V6 3.5 Lts, General Motors V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts a Shiga Yamashita, en las condiciones más desfavorables que se encontraron de arena en la colada y se solicitó fabricar un dispositivo de sujeción (fixture) para cada tipo producto, con el fin de que el corte fuese controlado durante el proceso. Así mismo, se especificó medir: tolerancia de corte, rugosidad, avance, revoluciones, potencia, ciclo de corte y ruido,

Además, con el fin de saber cuánto duraría la herramienta de diamante, se solicitó una estimación de la vida del disco de diamante bajo tales condiciones de arena, en el lado de la colada y con relación al área de corte de cada uno de los productos, así como los costos unitarios.

ii. Proceso de corte y preparativos.

Fue necesario definir para cada una de las geometrías de mazarotas y coladas de los distintos productos, la secuencia de corte para un disco de 350 mm de diámetro. Es decir, número de pasos de corte que permitan, a su vez, liberar el material sobrante sin que se golpeen los insertos de diamante. Así bien, cabe resaltar que el corte con disco se lleva a cabo sólo con una parte del radio, ya que debe existir suficiente espacio para que el vástago del motor no colisione con la pieza. En las figuras 31 y 32 se muestran los pasos de corte para el block I-4 y el block GM V8 5.3 Lts.

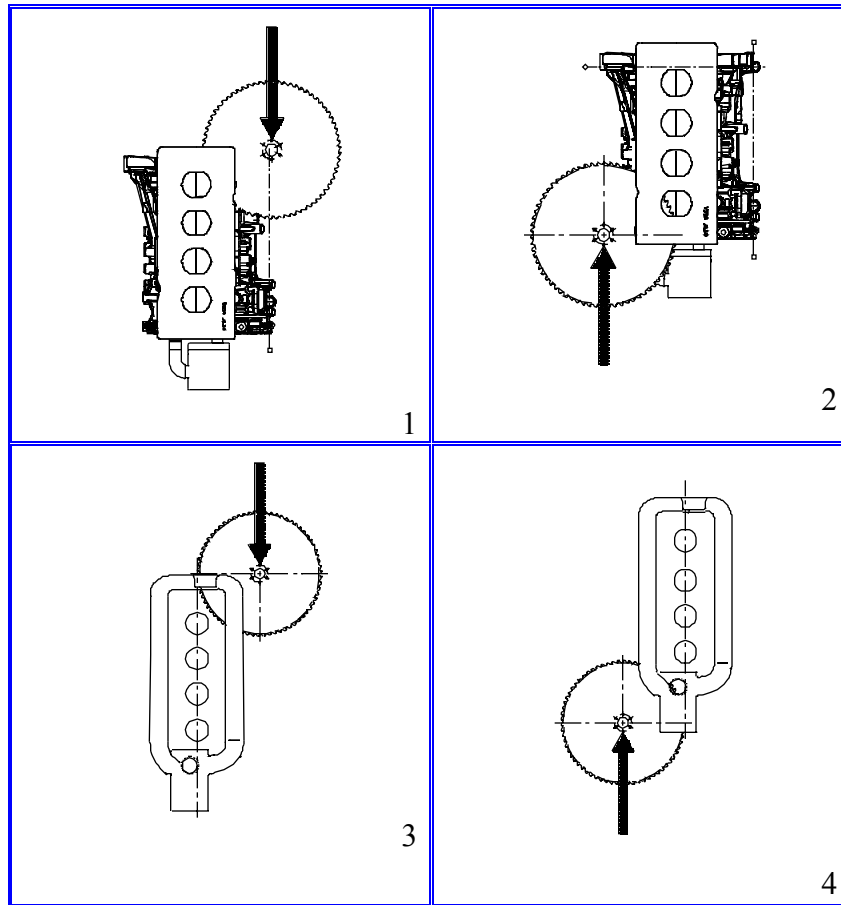


Figura 31. Pasos de para el corte de un Block I-4 mediante disco.

En la figura 31, se puede apreciar que se requieren dos pasos para liberar tanto la mazarota (pasos 1 y 2) como la colada (pasos 3 y 4). Por otro lado concierne a los blocks DC V6, GM V8 y Ford V8, los pasos de corte lo determinan el ancho de las mazarotas. Para el Block GM V8 5.3 Lts figura 32, las mazarotas laterales están unidas, y fue necesario seccionarlas en 2 (paso 1,2); posteriormente, se liberaron las mazarotas laterales (pasos 3 y 4); subsecuentemente, se removieron las mazarotas pequeñas (pasos 5) y por último la colada (pasos 6 y 7).

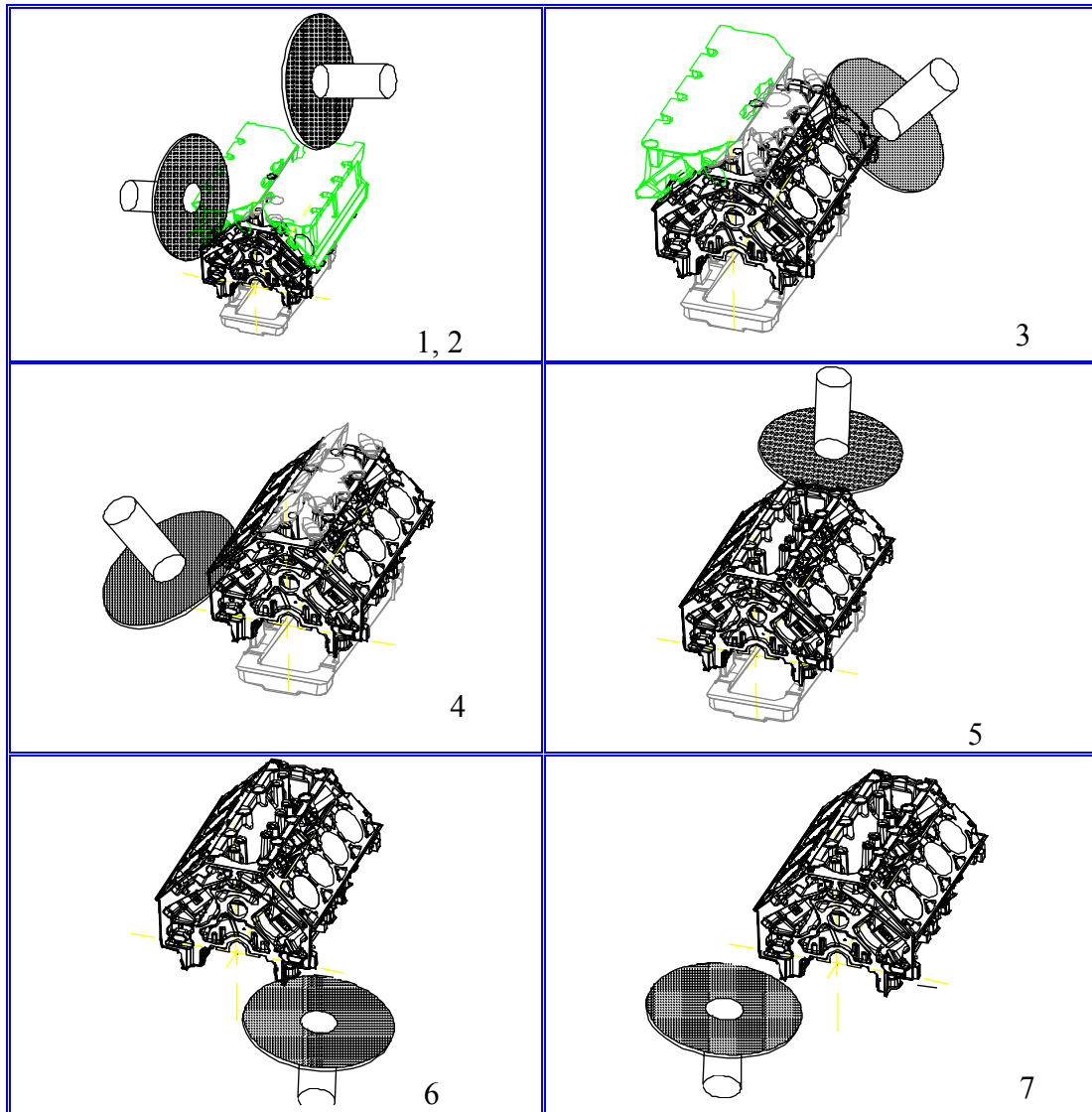


Figura 32. Pasos de corte de un Block GM V8 5.3 Lts por Disco.

Para el caso de los blocks Ford V8 4.6 Lts y DC V6 3.5 Lts, los pasos de corte son muy similares a los de la figura 32, la diferencia consiste en que no es necesario seccionar las mazarotas, ya que no están unidas a todo lo largo (pasos 1 y 2 no existen). Por lo que los pasos de corte se resumen en 5. Paso 1, corte de mazarota lateral izquierda; paso 2, corte de mazarota derecha; paso 3, corte de mazarotas secundarias; paso 4, corte de colada lado derecho y, finalmente paso 5, corte de colada lado izquierdo.

Los parámetros de corte utilizados fueron definidos por el ingeniero Kaoru Ichihashi, como los apropiados para la aleación de aluminio A319 dureza 90-120 brinell que se resumen en la tabla 11, el disco de 4 milímetros e insertos de diamante 5 milímetros de espesor y fue el propuesto como la herramienta que soporta el mayor avance y velocidad, menor variación y mejor acabado o rugosidad. Además, este disco de 350 mm es el de mayor diámetro y menor espesor en su tipo que permite a alta velocidad un ancho de corte (Kerf) de no más 5 milímetros ya que es muy rígido y está balanceado.

Para cada producto se enseña una rutina de corte a través de un Teachpendant (Interfase del controlador para manipular cada uno de los ejes de los al mismo tiempo). Esta enseñanza consiste en programar a los robots, de forma simultánea, los movimientos (distancias y avances) requeridos para cortar cada sección deseada de cada producto, y que se cumplan, de tal forma, el corte sea correcto y preciso.

Así bien, se fabricaron los fixtures para montar los Blocks en los robots y descarga de forma manual, se fabricó un fixture de localización para una una máquina de coordenadas, con el fin de medir la repetibilidad entre las piezas concerniente a las alturas de corte finales y además, se preparó un rugosímetro de taller para determinar la rugosidad de las superficies cortadas.

iii. Ejecución.

Para llevar acabo esta prueba, se fabricaron los fixtures de apoyo y sujeción que permitieran la rigidez necesaria, para que los diferentes blocks, durante el proceso de corte, no experimentaran ningún movimiento a través de sujetadores hidráulicos. Estos fixtures son montados a un robot de 4 ejes que tiene la posibilidad de aproximar las mazarotas y colada montadas de forma vertical hacia un segundo robot con 3 ejes el cual cuenta con un motor con disco de montaje en el 7mo eje. El robot que sujeta el producto cuenta también con la posibilidad de girar mediante un indexador rotativo y permitir de esta forma, cubrir los ángulos requeridos para liberar el block de sus mazarotas y colada correspondientes. En la figura 33 y 34 se muestran los fixtures y los blocks Ford 4.6 y GM 5.3, montados sobre los robots respectivamente.



Figura 33. Sierra de disco Shiga Yamashita Modelo NMK-0228 y fixture con block Ford 4.6 Lts montado.

En todos los casos de los Blocks V8's y V6, los Blocks fueron montados de forma vertical. Esto es con el fin de que la rutina de corte empiece de abajo hacia arriba para cada mazarota y colada. Esto permite que el disco con insertos de diamante, al terminar de cortar, esté

suficientemente alejado de la mazarota y/o colada cortada, de tal suerte que no exista riesgo de colisión entre las partes y se dañe la herramienta de corte.

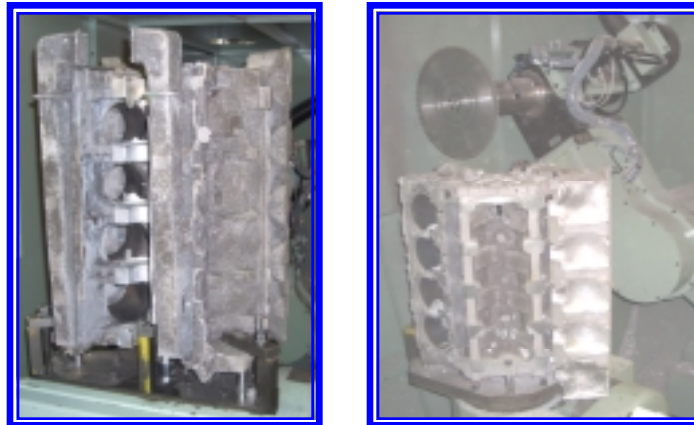


Figura 34. Sierra de disco Shiga Yamashita Modelo NMK-0228 y fixture con block GM 5.3 Lts montado.

En el caso del block I-4 fue colocado de forma horizontal sobre un fixture, y se programó la rutina de cortar la mazarota de izquierda a derecha, realizando medio corte, y haciendo pasar la sierra por la parte inferior, y después de derecha a izquierda, para el segundo medio corte, pasando la sierra por la parte superior de Block. De la misma forma se efectuó el corte de la colada girando el Block 180 grados sobre el indexador.

B. Maquinado de hidroabrasivo.

Para poder llevar a cabo las pruebas correspondientes de corte por maquinado hidroabrasivo, se contactó a la compañía Flow Internacional Inc. , localizada en Kent Washington USA con el fin de que colaboraran con equipo de prueba y poder medir los avances, consumos, tolerancias de este proceso aplicado a las fundiciones de Aluminio A319 para Blocks Ford I-4 2.3 Lts, Daimler Chrysler V6 3.5 Lts, General Motors V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts. Esta compañía es pionera en las aplicaciones del Water Jet, y han contribuido en la introducción del abrasivo, a la tecnología de corte por chorro de agua para el corte de aleaciones especiales. Así mismo, cuentan con un laboratorio de pruebas con máquinas que van desde 3 ejes hasta 6, permitiendo gran versatilidad. El último desarrollo de Flow, es un equipo que alcanza una presión de hasta 80 KPsi a través de una bomba de 250 HP. Flow Internacional accedió a colaborar prestando su laboratorio por dos días de pruebas para evaluar los desempeños que se podrían lograr aplicando la tecnología de corte hidroabrasivo.

i. Prueba.

Fueron enviados 8 Blocks Ford I-4 2.3 Lts, Daimler Chrysler V6 3.5 Lts, General Motors V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts Flow Internacional en las condiciones más desfavorables que se encontraron de arena en la colada y se solicitó fabricar un dispositivo de sujeción (fixture) para cada tipo de producto con el fin de que el corte fuese controlado durante el proceso de corte. Así mismo, se especificó medir: tolerancia de corte, rugosidad, avance, consumos de abrasivo, potencia, ciclo de corte y ruido,

Además, con el fin de saber cuánto duraría la los elementos de las boquillas de diamante, se solicitó una estimación de la vida de los componentes y costos unitarios.



Figura 35. Máquina para maquinado hidroabrasivo de 3 ejes Marca Flow modelo 4800.

En la figura 35 se muestra la máquina para corte hidroabrasivo marca Flow Internacional de 3 ejes servo controlados. Tiene una interfase con una PC que permite programar la trayectorias en un sistema cartesiano (x, y) y la boquilla en un eje z. Esta maquina cuenta con un tanque agua que en el cual la pieza a cortar es semisumergida, durante el proceso de corte el tanque recibe el abrasivo y mantiene a través de un sistema de bombeo un nivel controlado de altura de agua de tal forma que se minimice el ruido generado por las salida de las partículas abrasivas (sílica). En la parte posterior de ella se encuentra la unidad de bombeo, con una bomba intensificadora que mantiene una presión constate de 60 KPsi.

ii. Proceso de corte y preparativos.

Fue necesario definir, para cada conexión entre mazarotas y coladas de los distintos productos, la secuencia de corte y parámetros que permitieran liberar el block de estos excedentes. Para ello, el ingeniero Christopher Downing Gerente del laboratorio, analizó para cada producto los espesores, e ingresó la información a la base de datos de la computadora de la máquina y se determinó el diámetro de la boquilla, avance y flujo de abrasivo para cada sección que se resumen en la tabla 13. En la figura 36 se muestran los pasos de corte para el block Ford V8 4.6 Lts.

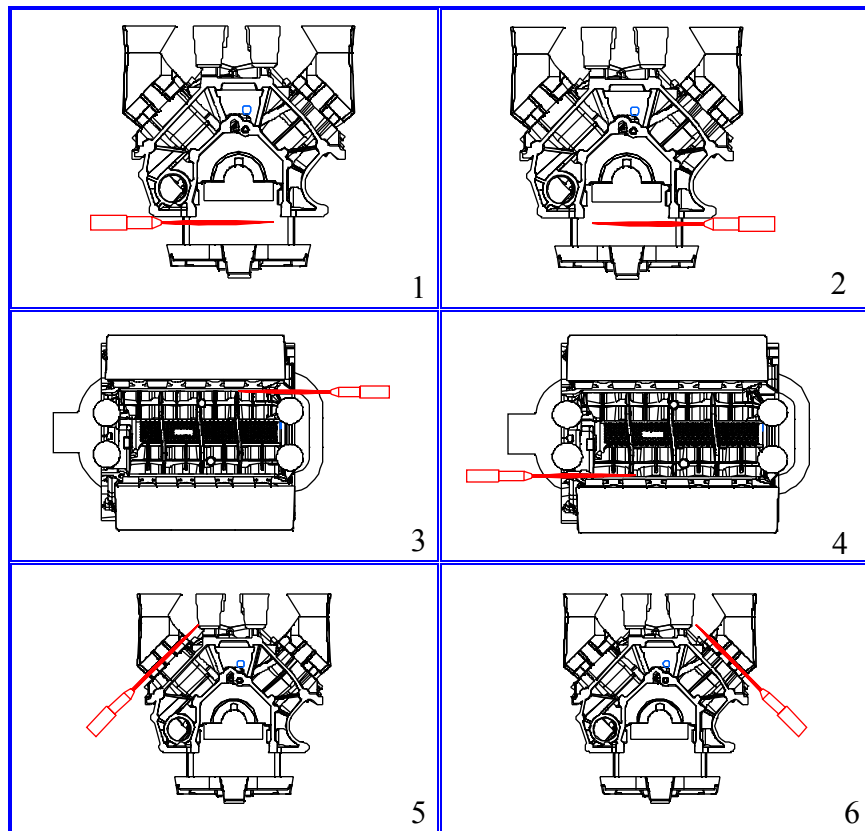


Figura 36. Pasos de requeridos para el corte de un block Ford V8 4.6 Lts mediante maquinado hidroabrasivo.

Para el caso de los Blocks, GM V8 5.3 Lts y DC V6 3.5 Lts los pasos de corte son muy similares a los de la figura 36. Primero se secciona la colada con la boquilla a todo lo largo de ésta y posteriormente la segunda sección de la colada se corta en sentido contrario (pasos 1 y 2). Después se separan las conexiones de las mazarotas pequeñas y sus posibles uniones con las mazarotas principales (pasos 3 y 4). Y por último se separan las mazarotas principales del block a todo lo largo del block (pasos 5 y 6). Cabe mencionar que para el corte del block Ford I-4 2.3 Lts, la secuencia de corte son tres pasos En un solo trayecto de izquierda a derecha la separación de la mazarota y en dos pasos la separación de la colada.

iii. Ejecución.

Para llevar acabo esta prueba, se fabricaron los fixtures de apoyo que permitieran localizar correctamente la pieza en el ángulo de corte deseado para cada producto, y que a su vez permitiera la estabilidad del block durante el proceso de corte. El fixture consiste en una estructura de aluminio ligera con apoyos que permite localizar la pieza y sumergirla en el tanque de la máquina. Con el movimiento de los ejes de la maquina se trazó el punto de inicio y final.

En todos los casos, los Blocks fueron montados de forma horizontal alineado contra la boquilla el canal de corte deseado. En la figura 37, se muestra la procedimiento de corte que se llevo acabo para los todos los Blocks. La etapa 1 se monta el block en el fixture y revisar que este bien apoyado y alineado; en la etapa 2, se sumerge el block en el tanque para un nivel deseado; en la etapa 3, se revisa que la sección a cortar este alineada al eje de la boquilla, la etapa 4, se inicia la rutina de corte con los

parámetros y trayectorias previamente programadas y por último, la etapa 5 se termina la rutina y se libera el Block de la máquina.



Figura 37. Secuencia de prueba para el corte de un Block I-4, V8 mediante maquinado hidroabrasivo.

XV. Resultados de las pruebas.

A. Corte por disco.

En la figura 38, se muestra el Block V8 4.6 Lts después del corte por disco con inserto de diamante, en la vista del corte de mazarota y corte de colada, la rugosidad parece a la de una superficie maquinada con fresadora. Así mismo, el corte es paralelo al Deck Face y/o Pan Rail sin posibilidad de sesgo ya que el disco es muy rígido.

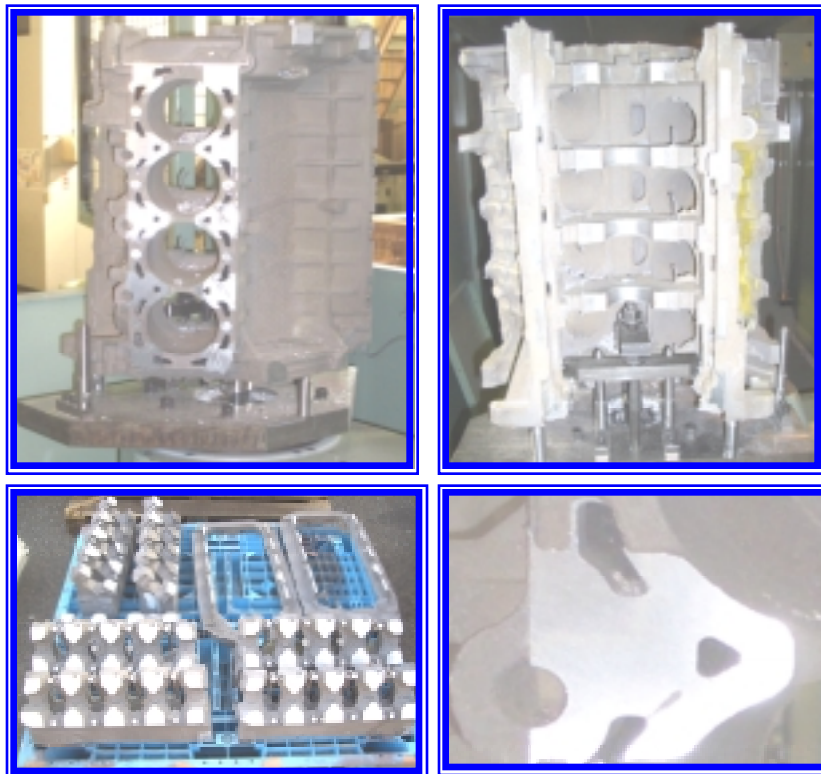


Figura 38. Cortes en block V8 Ford 4.6 Lts mediante disco con insertos de diamante.

La medición de la variación del corte fue llevada a cabo por medio de una máquina de medición que registró la dimensión contra una referencia palpando diferentes puntos tal como se ilustran en la figura 39. En la tabla 10, se

muestran los valores tomados a dos piezas cortadas del mismo producto block Ford V8 4.6, y se comparan las diferencias entre ellas. La variación neta de esta tabla se toma la diferencia máxima y representa la variación de esta prueba de corte.

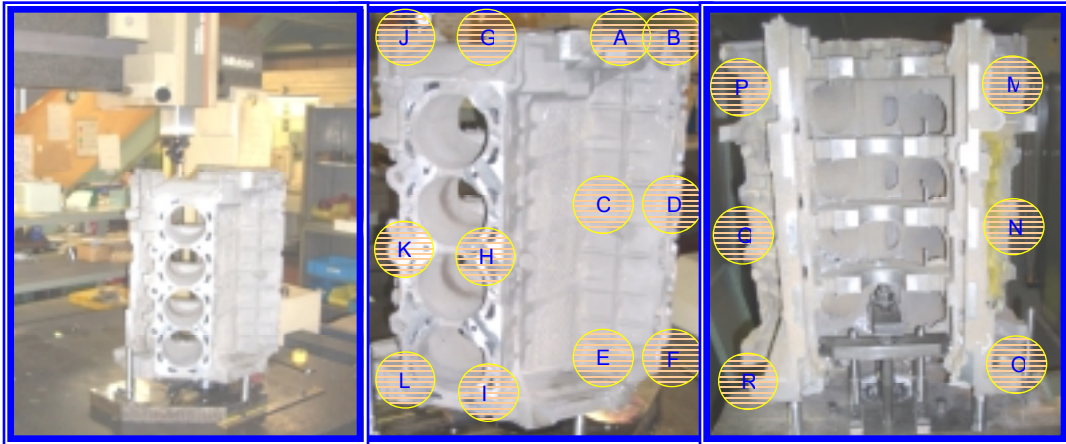


Figura 39. Medición de la variación del corte del block V8 Ford 4.6 Lts después del corte por disco de diamante.

Los datos concernientes a las condiciones de la prueba, así como las características del disco y resultados de la prueba se desglosan en la tabla 11 por producto. Se puede observar que los valores son muy semejantes entre sí, diferenciándose solamente por el tiempo que tomó cortar cada producto respectivamente. Así bien, el ruido es alto durante el proceso de aserrado por disco de diamante, por ello se requiere una cabina por seguridad que amortigüe el ruido y proteja al operador de daños oculares por el desalojo de viruta.

No se detectó la presencia de humo, ya que el sistema de atomizado de lubricación dosifica cantidades muy pequeñas, por lo que el corte es seco.

Block Ford 4.6 Medición de variación entre dos partes					
Mazarota: Cara 1 ("Y" "Z" Fijas. Medición en "X")					
	" Y "	" Z "	1ra Parte "X"	2da Parte "X"	Diferencia
Punto A	30	455	224.1685	223.9725	0.1960
Punto B	29	255	222.9215	222.7000	0.2215
Punto C	27	55	222.6095	222.3505	0.2590
Punto D	100	455	154.3196	154.1516	0.1680
Punto E	99	255	152.7865	152.6006	0.1859
Punto F	97	55	152.4921	152.4166	0.0755
Mazarota: Cara 2 ("Y" "Z" Fijas. Medición. "X")					
	" Y "	" Z "	1ra Parte "X"	2da Parte "X"	Diferencia
Punto G	37	430	526.0692	525.9537	0.1155
Punto H	35	230	526.4173	526.1869	0.2304
Punto I	30	30	525.6835	525.4891	0.1944
Punto J	105	430	594.6485	594.3862	0.2623
Punto K	103	230	594.7991	594.5861	0.2130
Punto L	100	30	593.7778	593.5996	0.1782
Colada: ("X" "Z" Fijas. Medición. "Y")					
	" X "	" Z "	1ra Parte "X"	2da Parte "X"	Diferencia
Punto M	275	420	125.9753	125.9537	0.0216
Punto N	275	240	126.3797	126.1869	0.1928
Punto O	275	35	126.5109	126.2091	0.3018
Punto P	502	420	124.6485	124.3862	0.2623
Punto Q	502	240	124.9629	124.6861	0.2768
Punto R	502	35	125.1294	124.9096	0.2198
Valor Máximo.					0.3018

Tabla 10. Datos de la medición de la variación del corte de block V8 Ford 4.6 Lts después del corte por disco de diamante.

El disco se monta al vástago del motor por medio de tornillos, y el tiempo de reemplazo de estos discos es menor a 5 minutos. No existen tantos puntos de revisión y/o ajuste como los existen en el proceso de aserrado por banda de carburo de tungsteno, solo se identificó como punto importante la revisión de la condición del disco, nivel de lubricación de corte.

Este proceso no existe calibración de guías, volantes, rodillos de soporte, alineación y tensión de banda, en cuanto a equipo se refiere, con relación a las partes de una sierra de banda. Por otro lado, no hay posibilidad de sesgo, corte pandeado por baja tensión, enterrón por dientes perdidos, reventones de banda por desgaste en cuanto al producto se refiere.

Resultados de Pruebas		Ford 4.6 Lts	GM 5.3 Lts	DC 3.5 Lts	Ford I-4 Lts
Ciclo [seg.]		130	150	130	120
Rugosidad [Ra]		3 a 4.5	3	3	3.5
Precisión [mm]		0 - 0.3	0 - 0.3	0 - 0.3	0 - 0.3
Ruido [dB]		90 – 100	90 - 100	90 - 100	90 - 100
Condiciones de corte Colada y Mazarota					
Numero de pasos		5	7	5	4
Corte por Disco	Diámetro de la herramienta [mm]:	350	350	350	350
	Ancho viruta [mm]:	4.5	5.0	4.5	4
	Espesor del Disco [mm]:	3.5	3.5	3.5	3.5
	Cantidad de dientes	70	70	70	70
Condiciones de corte	Velocidad del Motor [rpm]	5,000	5,000	5,000	5,000
	Avance [mm/seg]	30	30	30	30
	Velocidad de corte [m/min]	5,500	5,500	5,500	5,500
	Dimensión de la viruta [mm]	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051

Tabla 11. Resultados de pruebas de corte con disco con insertos de diamante.

B. Maquinado hidroabrasivo.

En las figuras 40, 41, 42 y 43, se muestran los cortes realizados por maquinado hidroabrasivo en los Blocks Ford I-4 2.3 Lts, GM V8 5.3 Lts, Ford V8 4.6 Lts y DC V6 3.5 Lts respectivamente.



Figura 40. Cortes de mazarota y colada en Block Ford I-4 2.3 Lts mediante maquinado hidroabrasivo.



Figura 41. Cortes de mazarota y colada en Block GM V8 5.3 Lts mediante maquinado hidroabrasivo.

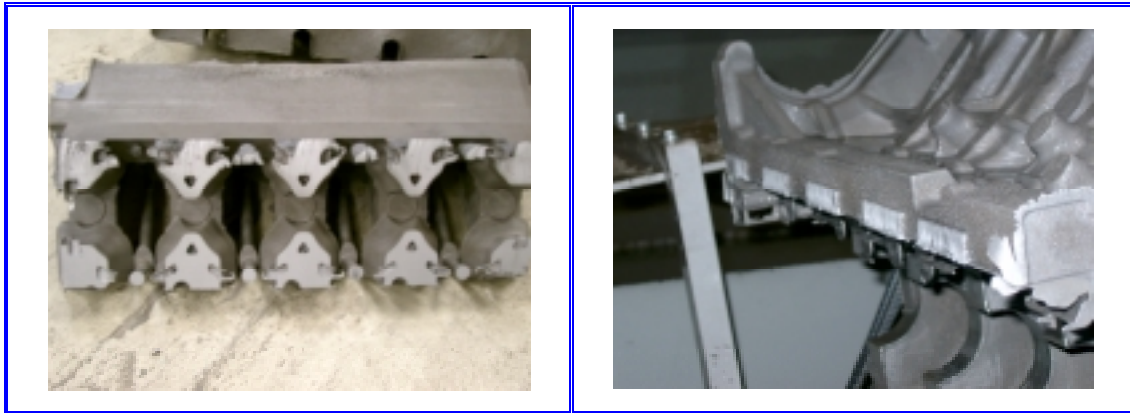


Figura 42. Cortes de mazarota y colada en Block Ford V8 4.6 Lts mediante maquinado hidroabrasivo.

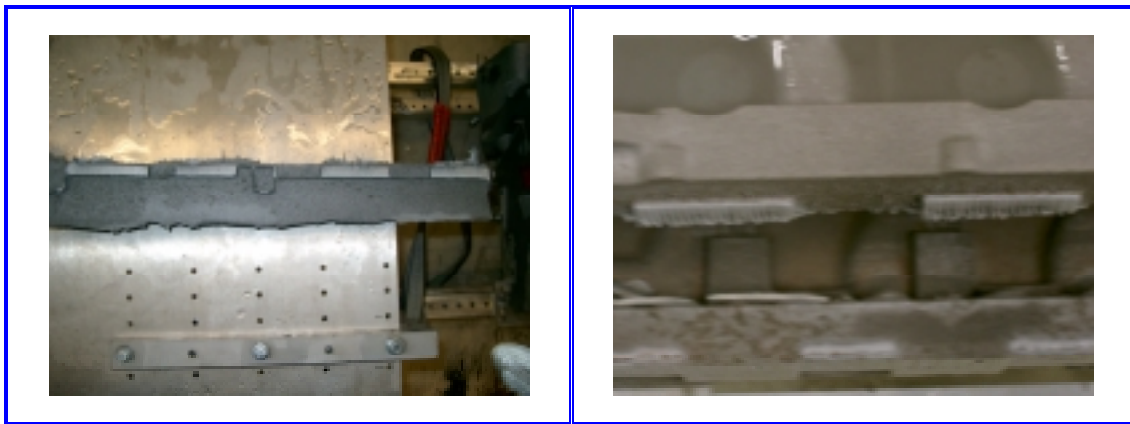


Figura 43. Cortes de colada en Block V6 DC 3.5 Lts mediante maquinado hidroabrasivo.

Existe una relación exponencial del decremento en el avance permisible para cortar un espesor determinado para diámetro de boquilla y flujo de abrasivo. Estos valores son mostrados en la tabla Figura 12 y figura 44 y son reales para el aluminio A319.

Espesor [in]	Aluminio A319		
	14/40	16/40	18/50
0.5	31.8	35.4	44
1	14.1	15.7	19.6
1.5	8.24	9.18	11.4
2	5.3	5.9	7.28
3	3.04	3.42	4.26
4	1.94	2.2	2.8
5	1.29	1.48	1.91
6	0.865	1.01	1.33
7	0.575	0.677	0.904
8	0.366	0.437	0.596
9	0.216	0.258	0.354
10	0.099	0.118	0.164

Tabla 12. Relación de avance y espesor permisible utilizando boquillas con diamante de 14, 16 y 18 milésimas de diámetro.

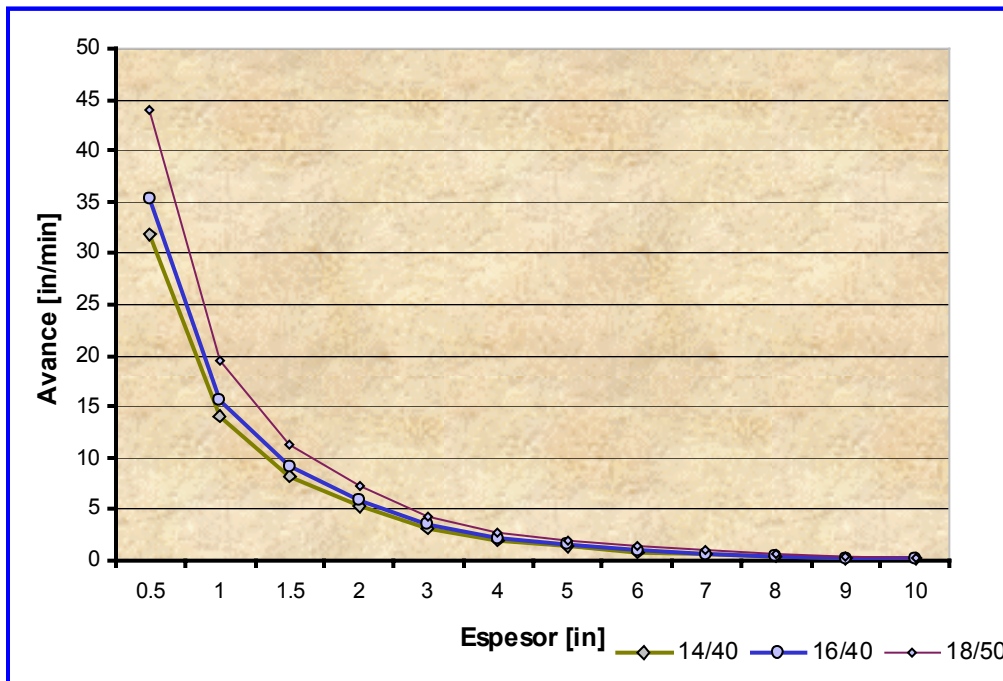


Figura 44. Relación exponencial del avance versus el incremento de espesor en Aluminio A319 para diamantes de 14, 16 y 18 milésimas de diámetro.

Para cada uno de los productos, se obtuvo el desglose de avances que permitiera cortar el espesor característico por producto tomando en cuenta la tabla 12, utilizando los datos de la columna para una boquilla de 18 milésimas de pulgada. Entonces, para cada sección a cortar de cada producto tomado los espesores y longitudes típicas se obtuvo el desglose de mostrado en la tabla 13.

Mazarotas Principales							
	Cantidad	Espesor [mm]	Longitud [mm]	Espesor [in]	Longitud [in]	Avance [in/min]	Tpo [min]
Ford 2.3 Lts	1	199	443	7.83	17.44	0.596	29.3
DC 3.5 Lts	2	158	409	6.22	16.10	1.33	24.2
GM 5.3 Lts	2	128	482	5.04	18.98	1.91	19.9
Ford 4.6 Lts	2	137	429	5.39	16.89	1.91	17.7
Mazarotas Secundarias							
	Cantidad	Espesor [mm]	Longitud [mm]	Espesor [in]	Longitud [in]	Avance [in/min]	Tpo [min]
Ford 2.3 Lts	0	0	0	0.00	0.00	0	0.0
DC 3.5 Lts	2	28	27	1.10	1.06	19.6	0.1
GM 5.3 Lts	10	35	32	1.38	1.26	19.6	0.6
Ford 4.6 Lts	4	37	35	1.46	1.38	19.6	0.3
Coladas							
	Cantidad	Espesor [mm]	Longitud [mm]	Espesor [in]	Longitud [in]	Avance [in/min]	Tpo [min]
Ford 2.3 Lts	8	12	50	0.47	1.97	44	0.4
DC 3.5 Lts	8	12	50	0.47	1.97	44	0.4
GM 5.3 Lts	8	17	68	0.67	2.68	44	0.5
Ford 4.6 Lts	10	12.5	54	0.49	2.13	44	0.5
	Ciclo [min/block]	Boquillas					
Ford 2.3 Lts	29.6	2					
DC 3.5 Lts	24.7	3					
GM 5.3 Lts	21.0	3					
Ford 4.6 Lts	18.5	3					

Tabla 13. Desglose de los avances permisibles y tiempos obtenidos con relación a los espesores utilizando una boquilla de 18 milésimas.

Los resultados de la separación de las mazarotas y coladas de todos los productos se muestran en las tablas 14 y 15 respectivamente. Como se puede observar en la tabla 14, el ciclo de corte para todas las mazarotas es muy grande debido a la poca capacidad de penetración del chorro abrasivo en espesores mayores de una pulgada, además, se presentó el efecto estriamiento o delaminación a lo largo de las separaciones, dando como resultado una rugosidad de 12.5 milésimas de milímetro que es equivalente a la rugosidad característica del corte por oxiacetileno.

Resultados de Pruebas		Ford 4.6 Lts	GM 5.3 Lts	DC 3.5 Lts	Ford I-4 Lts
Ciclo [seg.]		1062	1194	1452	1758
Rugosidad [μ mm]		12.5	12.5	12.5	12.5
Precisión [mm]		0 – 1.2	0 – 1.2	0 – 1.1	0 – 1.2
Ruido [dB]		110	110	110	110
Condiciones de corte Mazarota					
Numero de pasos		1	2	2	2
Corte Chorro de agua y Abrasivo	Diámetro de la boquilla [Milésimas]:	18	18	18	18
	Ancho de apertura [mm]:	1.8	2	2	3.5
	Espesor [mm]	137	128	158	199
	Longitud [mm]	429	482	409	443
Condiciones de corte	Presión de la bomba [PSI] x 10 ³	60	60	60	60
	Avance [in/min]	1.91	1.91	1.33	0.6
	Flujo de agua [lts/min]	0.6435	0.6435	0.6435	0.6435
	Flujo de abrasivo [lb/min]:	3.5	3.5 / 3	3.5	3.5

Tabla 14. Resultados de pruebas de corte con maquinado Hidroabrasivo en mazarota.

En la tabla 15, los avances logrados fueron mayores debido a los espesores característicos de las coladas que no son mayores a 17 milímetros, sin embargo la rugosidad resulto mayor para este avance de 44 pulgadas por minuto.

Resultados de Pruebas		Ford 4.6 Lts	GM 5.3 Lts	DC 3.5 Lts	Ford I-4 Lts
Ciclo [seg.]		30	30	24	24
Rugosidad [μmm]		18	18	18	18
Precisión [mm]		0 –0.5	0 – 0.5	0 - 0.5	0 - 0.5
Ruido [dB]		110	110	110	110
Condiciones de corte Colada					
Numero de pasos		2	2	2	2
Corte Chorro de agua y Abrasivo	Diámetro de la boquilla [Milésimas]:	18	18	18	18
	Ancho de apertura [mm]:	2	2	2	2
	Espesor [mm]	12.5	17	12	12
	Longitud [mm]	54	68	50	50
Condiciones de corte	Presión de la bomba [PSI] x 10 ³	60	60	60	60
	Avance [in/min]	44	44	44	44
	Flujo de agua [lts/min]	0.6435	0.6435	0.6435	0.6435
	Flujo de abrasivo [lb/min]:	2.4	2.4	2.4	2.4

Tabla 15. Resultados de pruebas de corte en con maquinado Hidroabrasivo en colada.

En todos los productos se cortó bajo la misma presión de la bomba, mismo diámetro de boquilla y diamante y flujo de abrasivo manteniéndolos constantes a lo largo del corte tanto para mazarotas como coladas.

Fue necesario utilizar protección para oídos y lentes, por lo que es necesario cabina de seguridad para este tipo de proceso.

En general, los avances son muy limitados para obtener una rugosidad y tolerancia aceptables especialmente en el lado del corte de las mazarotas. Esto podría mejorarse agregando un mayor número de boquillas para que corten al mismo tiempo una sola mazarota, una boquilla orientada en sentido contrario cortando de forma opuesta a otra, podrían seccionar el espesor de una mazarota a todo lo largo. Como resultado de esto, se mejoraría, además del ciclo, la calidad de la superficie cortada, aumentando el avance disminuyendo la penetración del corte

Las consideraciones de seguridad durante el mantenimiento y operación son muy importantes, para lo que es requerido un nivel de personal técnico elevado para estas funciones.

Este equipo requiere un sistema de transporte y tratamiento de lodos, sistema de transporte para el desalojo de mazarotas y coladas, resistente a la corrosión y abrasión, sistema de alimentación para el transporte de pieza y localización, sistema de descarga de pieza y sistema de seguridad e iluminación que requerirían diseñarse para ésta aplicación industrial específica.

XVI. Comparativo de costos.

Con el fin de poder comparar los costos unitarios se definió el siguiente modelo de costeo general que aplica para cada proceso.

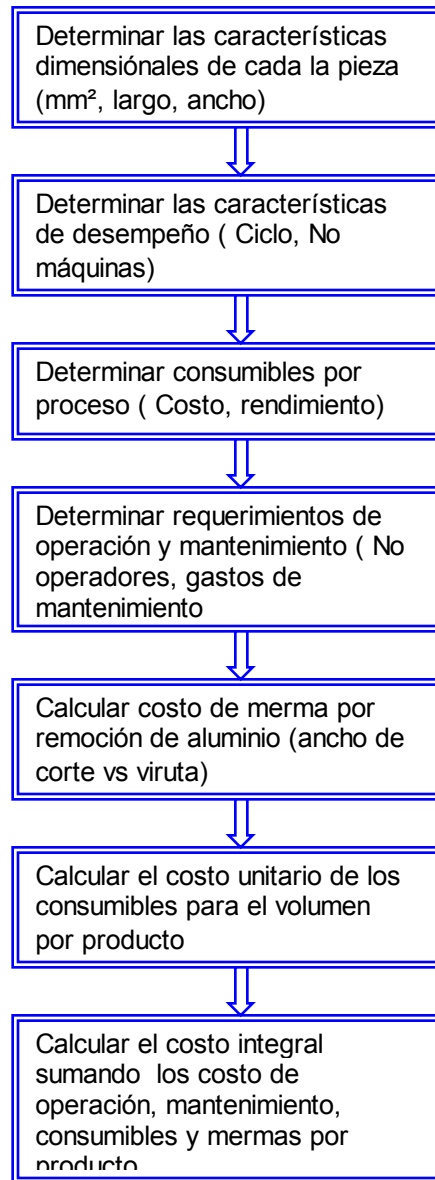


Figura 45. Modelo de costeo general aplicado para el análisis de costos .

A. Análisis de Costo del corte por producto mediante Sierra Banda.

El costo real del corte de colada y mazarota se presentan en la tabla 16 para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts respectivamente, obtenidos mediante la utilización de banda de carburo de tungsteno. Como se puede apreciar el costo mayor es el que representan los consumibles principales.

El costo por el consumo de bandas representa un 60, 50, 65 y 58 % para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, respectivamente, del costo integral por corte con banda.

El costo de operación y mantenimiento representa un 25, 33.8, 22 y 27 %. El costo de la merma de aluminio por block es insignificante, debido a que el volumen removido es muy poco gracias a que la banda de carburo de tungsteno es muy angosta.

El costo de la energía representa un 4, 6, 4 y 5.2 %, para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, respectivamente, del costo integral por corte con banda.

Análisis de Costo del corte por producto mediante Sierra Banda					
		Ford I-4	DC 3.5	GM 5.3	Ford 4.6
Información					
Áreas de corte Mazarota	[mm ²] x 10 ³	41.65	68.51	86.45	44.29
Área de Corte Colada	[mm ²] x 10 ³	8.91	5.94	23.89	11.56
Avances	mm/min	1050	950	950	980
Ciclo	Blocks/min	1	1	1	1
Producción mes	partes	28800	28800	28800	28800
Numero de Equipos		2	2	2	2
Vida Banda Mazarota	[mm ²] x 10 ⁶	47.89	45.08	33.71	30.34
Vida Banda Colada	[mm ²] x 10 ⁶	7.94	8.45	10.61	7.3
Blocks por Banda (Mazarota)		1150	658	390	685
Blocks por Banda (Colada)		373	1423	444	632
Costo de Banda	\$	250	250	250	250
Costo de Lubricante de corte	\$ / Block	0.1	0.12	0.15	0.12
Consumo de Energía	Kw/hr	40	40	40	40
Costo de Energía	\$ / Kw/hr	0.051	0.051	0.051	0.051
Costo de Operadores	\$/hr.	2.23	2.23	2.23	2.23
Numero de Operadores		3	3	4	3
Gasto de Mantenimiento	\$/mes	1250	1250	1250	1250
Costo consumible					
Banda Mazarota	\$/Block	0.217	0.380	0.641	0.365
Banda Colada	\$/Block	0.410	0.176	0.563	0.396
Lubricante	\$/Block	0.100	0.120	0.150	0.120
Energía	\$/Block	0.041	0.068	0.068	0.068
Costo de Mantenimiento	\$/Block	0.151	0.253	0.253	0.253
Costo Operación	\$/Block	0.112	0.112	0.149	0.112
Costo por merma de viruta					
Espesor del diente	mm	3	3	3	3
Espesor de remoción	mm	3.5	3.5	3.5	3.5
Costo del aluminio	\$/Kg.	0.36	0.36	0.36	0.36
Volumen removido	m ³	1.77E-07	2.61E-07	3.86E-07	1.95E-07
Densidad	Kg/m ³	0.0354	0.0354	0.0354	0.0354
Merma	\$\$/Block	2.26E-09	3.32E-09	4.92E-09	2.49E-09
Costo Total por corte con banda	\$	1.04	1.11	1.82	1.31

Tabla 16. Comparativo de costo integrado de del corte de Blocks mediante corte por banda de carburo de tungsteno.

B. Análisis de costo del corte por producto resultante mediante disco de diamante.

El costo estimado del corte de colada y mazarota presentan en la tabla 17 para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, respectivamente, mediante la utilización de disco con inserto de diamante. El costo mayor lo representa el costo de operación y mantenimiento

El costo de la merma de aluminio por block es insignificante debido a que el volumen removido es muy poco gracias a que el disco con inserto de diamante es de 4 mm. No es tan delgado como la banda pero su costo no es representativo.

El costo por el consumo de discos representa un 24.6, 17.4, 29.8 y 20 % para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, respectivamente, del costo integral por corte con disco.

El costo de operación y mantenimiento representa un 41.5, 45.5, 41.6 y 44.2 % para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, respectivamente, del costo integral por corte con disco.

El costo de la energía representa un 8.9, 9.8, 7.6 y 9.5 % para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, respectivamente, del costo integral por corte con disco.

El costo de la lubricación de corte representa un 25, 27.5, 21.2 y 26.6 % para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, respectivamente, del costo integral por corte con disco.

Análisis de costo del corte por producto mediante Disco de Diamante					
		Ford I-4	DC 3.5	GM 5.3	Ford 4.6
Información					
Áreas de corte Mazarota	[mm ²] x 10 ³	41.65	33.35	30.6	26.96
Área de Corte Colada	[mm ²] x 10 ³	8.91	5.94	23.89	11.56
Avances	mm/min	1800	1800	1800	1800
Ciclo	Blocks/min	1	1	1	1
Producción mes	partes	28800	28800	28800	28800
Numero de Equipos		2	2	2	2
Vida Disco Nuevo en Mazarota	cortes	8355	10567	11372	12907
Vida Disco Nuevo Colada	cortes	6603	12522	3351	7862
Numero de reafiladas		4	4	4	4
Costo re rectificación	\$	850	850	850	850
Blocks por Disco Total de Mazarota		33418	42266	45486	51628
Blocks por Disco Total de Colada		26412	50088	13403	31450
Costo de Disco	\$	1750	1750	1750	1750
Costo de Lubricante de corte	\$ / Block	0.1	0.12	0.15	0.12
Consumo de Energía	Kw/hr	50	50	50	50
Costo de Energía	\$ / Kw/hr	0.051	0.051	0.051	0.051
Costo de Operadores	\$/hr	2.23	2.23	2.23	2.23
Numero de Operadores		3	3	4	3
Costo de Mantenimiento	\$/mes	2500	2500	2500	2500
Costo consumible					
Disco Mazarota	\$/Block	0.052	0.041	0.038	0.034
Disco Colada	\$/Block	0.066	0.035	0.131	0.056
Lubricante	\$/Block	0.12	0.12	0.12	0.12
Energía	\$/Block	0.043	0.043	0.043	0.043
Costo de Mantenimiento	\$/Block	0.087	0.087	0.087	0.087
Costo Operación	\$/Block	0.112	0.112	0.149	0.112
Costo por merma de viruta					
Espesor del diente	mm	4	4	4	4
Espesor de remoción	mm	5	5	5	5
Costo del aluminio	\$/Kg	0.36	0.36	0.36	0.36
Volumen removido	m ³	2.53E-07	1.96E-07	2.72E-07	1.93E-07
Densidad	Kg/m ³	0.0354	0.0354	0.0354	0.0354
Merma	\$/Block	3.22E-09	2.50E-09	3.47E-09	2.45E-09
Costo Total por corte con disco	\$	0.479	0.437	0.567	0.450

Tabla 17. Comparativo de costo integrado de del corte de Blocks mediante corte por disco con inserto de diamante.

C. Análisis de costo del corte por producto resultante mediante maquinado hidroabrasivo.

Para poder llevar acabo una comparación fue necesario estimar la cantidad de boquillas y numero de máquinas necesarias para cortar cada producto a una razón de una pieza por minuto. Para ello, considerando que se puede cortar cada mazarota utilizando 4 boquillas a la vez, se logra obtener ciclos máximo por máquina de 3.5, 4.2, 5.6 y 4.7 minutos para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, respectivamente.

Mazarotas (1)	Cantidad	Ancho [mm]	Largo [mm]	Ancho [in]	Largo [in]	Avance [in/min]	Tpo [min]
Ford I-4 2.3 Lts	1	99.5	221.5	3.92	8.72	2.8	3.1
DC 3.5 Lts	2	79	204.5	3.11	8.05	4.26	3.8
GM 5.3 Lts	2	64	241	2.52	9.49	4.26	4.5
Ford 4.6 Lts	2	68.5	214.5	2.70	8.44	4.26	4.0
Mazarotas (2)	Cantidad	Ancho [mm]	Largo [mm]	Ancho [in]	Largo [in]	Avance [in/min]	Tpo [min]
Ford I-4 2.3 Lts	0	0	0	0.00	0.00	0	0.0
DC 3.5 Lts	2	28	27	1.10	1.06	19.6	0.1
GM 5.3 Lts	10	35	32	1.38	1.26	19.6	0.6
Ford 4.6 Lts	4	37	35	1.46	1.38	19.6	0.3
Coladas	Cantidad	Ancho [mm]	Largo [mm]	Ancho [in]	Largo [in]	Avance [in/min]	Tpo [min]
Ford I-4 2.3 Lts	8	12	50	0.47	1.97	44	0.4
DC 3.5 Lts	8	12	50	0.47	1.97	44	0.4
GM 5.3 Lts	8	17	68	0.67	2.68	44	0.5
Ford 4.6 Lts	10	12.5	54	0.49	2.13	44	0.5
	Ciclo		No. de boquillas			Total	
	Maquina	Requerido	Mazarota Colada + sec x Maquina		Totales	Maquinas	
	[min/block]	[min/block]					
Ford I-4 2.3 Lts	3.5	1	4	1	5	20	4
DC 3.5 Lts	4.2	1	8	1	9	36	4
GM 5.3 Lts	5.6	1	8	1	9	54	6
Ford 4.6 Lts	4.7	1	8	1	9	45	5

Tabla 18. Desglose de los avances permisibles y tiempos obtenidos con relación a los espesores para la obtención del ciclo utilizando 4 boquillas por mazarota.

En la tabla 18, se muestra los avances permisibles para esta configuración, tiempos resultantes y el cálculo de maquinas requeridas para obtener este ciclo de 1 minuto por block.

Con esta información y los datos recabados en las pruebas, es posible estimar el costo integral del corte por Maquinado Hidroabrasivo que resultaría el cortar las coladas y mazarotas a una razón de un minuto por block. En la tabla 19 se muestran los costos resultantes de este análisis para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts.

El costo por el consumo de abrasivo representa un 81.6, 84.2, 84.4 y 84.3 % para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, respectivamente, del costo integral por corte maquinado hidroabrasivo.

El costo resultante de la suma de los diamantes, boquillas y consumo de agua representa un 9.7, 10.0, 9.6, y 10.1 % para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, respectivamente, del costo integral por corte maquinado hidroabrasivo.

El costo de la energía representa un 7.3, 7.5, 7.5, y 7.8 % para los productos Ford I-4 2.3 Lts, DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, respectivamente, del costo integral por corte maquinado hidroabrasivo

Análisis de costo del corte por producto mediante Maquinado Hidroabrasivo					
		Ford I-4	DC 3.5	GM 5.3	Ford 4.6
Información					
Áreas de corte					
Mazarota	[mm ²] x 10 ³	41.65	33.35	30.6	26.96
Área de Corte Colada	[mm ²] x 10 ³	8.91	5.94	23.89	11.56
Avances Mazarota	mm/min	71.12	108.204	108.204	108.204
Avances Runner	mm/min	1117.6	1117.6	1117.6	1117.6
Ciclo	Blocks/min	1	1	1	1
Producción mes	partes	28800	28800	28800	28800
Equipos		4	4	6	5
Boquillas en mazarota		16	32	48	40
Boquillas en Colada		4	4	6	5
Vida de las Boquillas	hrs.	150	150	150	150
Costo de Boquillas	\$	215	215	215	215
Vida del diamante	hrs.	1000	1000	1000	1000
Costo del Diamante	\$	450	450	450	450
Costo Abrasivo	\$/Kg	0.38	0.38	0.38	0.38
Consumo abrasivo	kg/min	1.08	1.08	1.08	1.08
Consumo de Agua	[m ³ /min] x 10 ⁻³	6.435	6.435	6.435	6.435
Costo del Agua	\$/m ³	1.63	1.63	1.63	1.63
Consumo de Energía	Kw/hr	37	37	37	37
Costo de Energía	\$ / Kw/hr	0.051	0.051	0.051	0.051
Costo de Operadores	\$/hr	2.23	2.23	2.23	2.23
Núm. de Operadores		2	2	2	2
Gasto de Mantenimiento	\$/mes	1423.5	1423.5	1423.5	1423.5
Costo consumible					
Boquillas	\$/block	0.48	0.86	1.29	1.08
Diamantes	\$/block	0.15	0.27	0.41	0.34
Abrasivo	\$/block	7.04	12.67	19.00	15.83
Energía	\$/block	0.63	1.13	1.70	1.42
Agua	\$/block	0.21	0.38	0.57	0.47
Costo de Mantenimiento	\$/block	0.05	0.05	0.05	0.05
Costo Operación	\$/block	0.07	0.07	0.07	0.07
Costo Total por corte	\$	8.63	15.05	22.52	18.78

Tabla 19. Comparativo de costo integrado del corte de Blocks mediante Maquinado Hidroabrasivo con boquilla de 18 milésimas.

D. Análisis de costo del corte por producto resultante mediante sistema de corte híbrido.

En relación a la tabla 19, se puede observar que se requieren muchas boquillas de corte para llevar acabo el proceso de separación de mazarotas mediante este proceso debido a la baja capacidad de penetración del chorro de agua abrasiva en estos espesores; sin embargo, el avance que se logra mediante este proceso en el lado de la colada es comparable al avance que se logra mediante sierra de banda. Por ello, a continuación se desglosa el análisis de costos de un sistema híbrido en el cual, el corte de mazarota se lleva acabo mediante sierra de disco de diamante y el corte de la colada mediante maquinado hidroabrasivo.

Análisis de costo del corte por producto resultante mediante Sistema de Corte Híbrido					
		Ford I-4	DC 3.5	GM 5.3	Ford 4.6
Información					
Áreas de corte Mazarota	[mm ²] x 10 ³	41.65	33.35	30.6	26.96
Área de Corte Colada	[mm ²] x 10 ³	8.91	5.94	23.89	11.56
Avances	mm/min	1800	1800	1800	1800
Ciclo	Blocks/min	1	1	1	1
Producción mes	partes	28800	28800	28800	28800
Vida Disco Nuevo en Mazarota	cortes	8355	10567	11372	12907
Boquillas en Colada		2	2	2	2
Corte Mazarota con disco					
Costo consumible					
Disco Mazarota	\$/block	0.052	0.041	0.038	0.034
Lubricante	\$/block	0.06	0.08	0.1	0.08
Energía	\$/block	0.030	0.030	0.030	0.030
Costo de Mantenimiento	\$/block	0.087	0.087	0.087	0.087
Costo Operación	\$/block	0.062	0.062	0.099	0.062
Corte Colada con Hidroabrasivo					
Costo consumibles					
Boquillas	\$/block	0.05	0.05	0.05	0.05
Diamantes	\$/block	0.02	0.02	0.02	0.02
Abrasivo	\$/block	0.70	0.70	0.70	0.70
Energía	\$/block	0.06	0.06	0.06	0.06
Agua	\$/block	0.02	0.02	0.02	0.02
Costo de Mantenimiento	\$/block	0.05	0.05	0.05	0.05
Costo Operación	\$/block	0.05	0.05	0.05	0.05
Costo por merma de viruta					
Merma	\$	3.22E-09	2.50E-09	3.47E-09	2.45E-09
Costo Total corte Mazarota con disco		0.340	0.349	0.404	0.342
Corte Total corte Colada con Hidroabrasivo		1.13	1.13	1.13	1.13
Costo Total por corte		1.47	1.48	1.53	1.42

Tabla 20. Comparativo de costo integrado del corte de Blocks Sistema Híbrido.

XVII. Conclusiones.

Del proceso actual de sierra banda, las cintas de carburo de tungsteno son muy sensibles a la presencia arena de en el canal de corte. Este proceso, requiere mucha habilidad de operación y existen muchos elementos de calibración y ajuste involucrados. Sin embargo, la arena representa la variable más significativa en el rendimiento de las bandas, por lo que la contribución de otras variables no figura en aumentar el rendimiento preponderantemente.

La arena amengua el rendimiento de la vida útil de una banda de carburo de Tungsteno hasta un 77.8 % por lo que su remoción previa al corte u eliminación de raíz podría hacer disminuir el costo por corte por banda hasta un 23% promedio.

El proceso de corte por sierra de disco con insertos de diamante resulta ser el proceso de menor costo de manufactura, ya que el costo integral está por debajo de la mitad del proceso de corte por sierra cinta. Este proceso, no requiere tantos ajustes y no hay elementos adicionales de desgaste como los hay en el proceso de aserrado por banda. El diamante es 3.3 veces más resistente a ser rallado o penetrado que el carburo de tungsteno cuya dureza en la escala de Knoop es de 2100 mientras que la del diamante es 7000. Cabe mencionar que la dureza de la arena sílica es de 550 y el diamante resulta ser 12.7 veces mas duro que esta, mientras que el carburo de tungsteno es tan solo 3.8.

Cabe mencionar, que aun no se conozca con exactitud la vida de los discos con insertos de diamante, es posible hacer la una analogía con información técnica existente de la vida de las herramientas de maquinado con insertos de diamante versus las herramientas de carburo de tungsteno de marcas comerciarles para el maquinado de aluminio con alto contenido de silicio. De esta forma, una comparación de herramientas marca SECO *carbolov*TM se

obtiene que existe una relación de durabilidad de 2.8 a 3.3 veces mayor a la vida de diferentes tamaños de fresas con diamantes cementados versus las herramientas de diferentes grados de carburo de tungsteno cementados respectivamente.

Por otro lado, el proceso de disco asegura el paralelismo del corte, eliminando con esto, corte sesgado o pandeado y dando como resultado un proceso más robusto. La calidad de la superficie y precisión de corte está por encima a los desempeños que se logran con el proceso de aserrado con banda actualmente.

Tanto el corte de banda como por disco, para cada uno de los productos se requieren 2 maquinas para hacer los cortes de Mazarotas y Coladas a razón de 1 minuto por pieza. Cabe señalar que el utilizar el proceso de corte por disco, se disminuye el área de corte de los productos DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8 4.6 Lts, con relación al área de corte con banda, ya que es posible evadir cortar material que no da valor agregado, dando como resultado mayor flexibilidad que la lograda con banda.

El proceso de corte mediante el maquinado hidroabrasivo, no resulta ser una alternativa económica en términos de costos de manufactura por producto. El costo del abrasivo es de alto consumo, y el costo de éste, impacta en un 84% promedio del costo de total de manufactura. Aun que se pudiera disminuir el costo del abrasivo totalmente del costo integral por maquinado hidroabrasivo, el costo resultante sería aun mayor que el que se logra por banda de carburo de tungsteno.

Un arreglo complejo de celda de manufactura con diferentes mecanismos y robots se requerirían para poder integrar hasta 9 boquillas de corte y para los Blocks V6 y V8's, y sin embargo, el ciclo neto no sería menor a 4.2, 5.6 y 4.7 minutos por block para los productos DC V6 3.5 Lts, GM V8 5.3 Lts y Ford V8

4.6 Lts, respectivamente. Esto implica el suministro de más maquinas de este tipo y por ende mayor espacio.

Por otro lado, la calidad de corte no es mejor que la lograda por disco de diamante o banda de carburo de tungsteno, obteniendo tan solo con este proceso la única ventaja de su capacidad desplazar la arena en el canal de corte sin un impacto en el costo por consumibles.

El proceso por corte hidroabrasivo es aplicable para espesores pequeños donde se requiera precisión con tiempos de ciclo largos. Se puede lograr una superficie suave y precisa con avances menores a las 762 mm/min, y en paredes no mayores a 15 milímetros de espesor, semejantes a las conexiones (gates) características de las coladas de todos los productos, sin embargo, para el caso de las mazarotas, la función del espesor de estas conexiones es eliminar rechupes por contracción durante la solidificación de la fundición y por ello, reducir estos espesores no es una opción viable.

La conclusión de este trabajo es que el proceso de corte por disco con inserto de diamante es una opción económica, desde el punto del costo de manufactura, que es más flexible que la banda, ya que permite cortar a mayores avances y evadir cortar material adicional que no da valor agregado como ocurre con el proceso de sierra cinta; que es más robusto, porque el diamante tiene mayor capacidad de resistir la abrasión por la presencia de la arena sílica en el canal de corte, porque este proceso no requiere tanto elementos expuestos al desgaste, el corte es rígido y estable; características que se salen de control frecuentemente con el proceso de banda.

XVIII. Referencias.

- [1] Anonymous “**Cutting equipment**”, Welding Design & Fabrication Dec 1998; 71, 12 Wilson Applied Science & Technology p7-27
- [2] Anonymous “**Mechanical cutting**”, The Gases & Welding Distributor Nov 2002; Carrer and Thecnical Education p 44-46
- [3] Anonymous “**Thermal & mechanical cutting**”, Welding Design & Fabrication Dec 2003; 71, 12 Wilson Applied Science & Technology p15-21
- [4] Robert E. Green, “**Machinery handbook**”, Industrial press 25th Edition 1996 p349-355.
- [5] Brian J. Hogan “**Manufacturing research takes center stage**”, Manufacturing Engineering July 2003, 131, 1 ABI/Inform Global p 70-75
- [6] Dallas Stuck & Frank Tielli, “**Efficient sawing of aluminum**”, Modern Shop Machine, Nov 2002, 75, 6 Wilson Applied Science and Technology Abstract p 88-93.
- [7] Don Kahles and Michael Nikolai, “**What variables affect core erosion resistance**”, Modern Casting, May 2003, p 37-39.
- [8] Diane L Hallum, “**Sawing systems: Automation at the cutting edge**”, Forming & Fabricating Sep 1999; 6, 9 Carrer and Thecnical Education p 46-57
- [9] James R Koelsch “**Metals, manufacturing, and PCs advance sawing technology**”, Forming & Fabricating Sep 2001; 8, 9 Carrer and Technical Education p 36-44

- [10] Dave Capper, "**Material characteristics define blade choice**", Welding Design & Fabrication Feb 1998; 71, 2 Wilson Applied Science & Technology Abstract p S2-S4
- [11] Kavin Woodward, "**Saws and blades**", Metal center news; Jan 1999; 39, 1 ABI/Inform Global p 70-75
- [12] Bian Rooks, "**The softly-softly approach of robotic waterjet cutting**", Industrial Robot Volume 28, Number 1 MCB University press (2001), p40-44.
- [13] Yong-Tai Im and Daniel F. Walczyk "**A CNC cutting trajectory algorithm for profiled edge lamination tooling**", Rapid Prototyping Journal, Volume 8, Number 5 (2002), p290-299.
- [14] Bo Assarsson, "**Robotized waterjet cutting**", Industrial Robot Volume 21, Number 1 MCB University press (1994), p12-17.
- [15] Terry D. Alkire, "**Development trends of three-dimensional waterjet cutting**", Industrial Robot Volume 24, Number 1 MCB University press (1997), p24-29.
- [16] O'Brian, "**Laser beam and water jet cutting**", Welding Handbook Volume 2 Welding Process, American Welding Society 1995 p 502-529.
- [17] Patrick Hillberg, "**A vision-guided robotic water jet cutting system**", Assembly Automation Volume 16 Number 2 University press (1996), p 17-21.
- [18] Edward V. Locke and Richard A. Hella, "**Metal processing with a High Power CO2 Laser**", IEEE Journal of quantum electronics Vol. QE10, No2 February 1974 p179-185.

[19] Jean V. Owen, "**Bandsaws join the mainstream**, Manufacturing Engineering, February 1997 p28-38.

[20] Frank Tielli, "**How to get the most from carbide-tipped bandsaw blades**", Metal Working equipment news, April 2000 p1-3.

[21] Editorial Staff, "**Which saw do I need – Circular or Band**", Metal Working equipment news, April 2000 p1-5

[22] Editorial Staff, "**Saws, saws, saws**", Metal Working equipment news, April 2000 p1-5

[23] George Box, William Hunter, "**Statistics for Experimenters. An introduction to Design , Data Analysis and Model Building**", John Wiley & Sons Inc, 1993

[24] Douglas Montgomery, **Design and Analysis of Experiments**, John Wiley & Sons Inc, 1991

[25] Dallas W. Stuck, "**Chip Formation Reflects Blade Selection**", Metal Sawing Supplement to Plenton Publications, February, March 1998 p7-8

[26] Michael McCue, "**There's More to Badsawing than making Ships**", Welding Design and Fabrication, February 2002 p48-53

[27] Anonymous "**Machinable wrought aluminum alloy**", Advance Materials and process April 1998; 71, 12 Wilson Applied Science & Technology p37-38

[28] Anonymous "**Treat sawing as a profit center**", Metal Center News January 1999; 71-73.

[29] Ron Lucas "**New saws, blades slice cost, Sharpen Quality**", Saw Performance July 1998; 71, 7 Wilson Applied Science & Technology p34-39.

XIX. Tabla de Indicadores.

Tecnologías de Corte para Fundiciones para Monoblocks de Aluminio				
Indicadores	Medición	Banda	Disco	Water Jet
Dimensionales Equipo				
Largo	mm	5000	3000	3000
Ancho	mm	4800	2000	2500
Alto	mm	3000	2000	2100
Dimensionales Pieza				
Largo (máx.)	mm	1000	720	1200
Espesor (máx.)	mm	2000	160	12.5
Desempeños				
Tiempo Ciclo (min)	segundos	50	50	1092
Flexibilidad		Media	Alta	Alta
Avance (max)	mm/min	1200	1800	1100
Robustez		Baja	Alta	Alta
Scrap (Viruta generada)	gr/block	3.54	3.54	n/a
Costo Mantenimiento				
Volantes y recubrimiento de poliuretano	Frecuencia, \$	1 m, 180.0	n/a	n/a
Consumo y rectificado de guías	Frecuencia, \$	1 m, 75.0	n/a	n/a
Soportes, masas y mecanismos	Frecuencia, \$	1 m, 500	n/a	n/a
Sistema de tensión de banda	Frecuencia, \$	1 m, 1250	n/a	n/a
Unidad de hidráulica	Frecuencia, \$	1 m, 300.0	1 m, 300.0	1 m, 750
Unidad de compresión y mangueras	Frecuencia, \$	n/a	n/a	1 m,
Mangueras	Frecuencia, \$	1 m, 250	1 m, 100	1m, 550
Filtraje	Frecuencia, \$	n/a	n/a	1 m, 300
Tiempo de reparación / mtto	Frecuencia, hrs	Mes, 48	Mes, 36	Mes, 48
Costo Operación				
Cintas (min)	\$/block	0.35	n/a	n/a
Discos y rectificación de discos (min)	\$/block	n/a	0.076	n/a
Boquillas + diamantes (min)	\$/block	n/a	n/a	0.63
Lubricación de corte (min)	\$/block	0.1	0.1	n/a
Agua (min)	\$/block	n/a	n/a	0.21
Abrasivo (min)	\$/block	n/a	n/a	7.04
Energía	\$/block	.040	0.043	0.63
Tiempo de Setup (min)	min	15 banda	5 disco	2.5 boquilla
Calidad				
Rugosidad Ra (máx.)	µmm	6.3	3	18
Tolerancia (máx.)	[mm]	2	0.3	1.3
Ambientales y seguridad				
Ruido	< 80 dB	75	100	110
Inversión x máquina				
Área	m ²	24	6	7.5
Equipo + Robots + Integración	\$	850,000	450,000	380,000
Insumos (Aire, Agua, Energía, Gas, Civil)	\$	79,300	21,700	26,500

XX. Terminología

Mazarota (Riser). Volumen de material adicional en una fundición capaz de absorber las contracciones durante el proceso de solidificación del material y que después de solidificarse requiere de ser removido

Colada (Runner). Conducto por el cual es alimentado el material al paquete y que después de solidificarse requiere de ser removido.

Pan Rail. Nombre que recibe la base del monoblock donde esta suspendida la colada.

TIER 1: Denominación del lugar de proveedor en la cadena de suministro de la industria automotriz. Un proveedor con categoría Tier 1 suministra directamente a los fabricantes originales de automóviles (OEM's).

Deck Face. Nombre que recibe el cara superior del block de donde esta unida la mazarota.

WIKUS® Marca Alemana de cintas de alto desempeño fundada por Wilhelm H. Kullmann que se localiza en Spangenberg, Alemania

Conexiones (Gates). Accesos de unión de entre la fundición y la colada así como entre la fundición y la mazarota que sirven de acceso para el llenado del paquete y que después de la solidificación unen las mazarotas y la colada a la fundición.

Degating. Término en inglés que significa la acción de separar las conexiones entre las mazarotas y coladas de una fundición.

Kerf. Ancho del perfil de corte.

Gantry. Manipulador cartartesiano para el manejo de materiales. Frecuentemente es controlado por control numérico.

Canal de corte. Representa el eje paralelo al plano del block que lo divide de sus mazarotas y coladas

Fixture. Dispositivo mecánico de localización y/o sujeción para fines múltiples.