

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“Diseño innovador de maquinaria para el proceso de
reciclaje de pavimento asfáltico”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA

MI. HÉCTOR VELASCO MORALES

DIRECTORES DE TESIS:

DR. BENJAMÍN VALDEZ SALAS

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. TOMAS PRIETO BAUMANN

Mexicali, B. C. Junio del 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Jesucristo a quien debo todas mis complacencias y motivación a la vida y su proceso; A mis padres Héctor Velasco y Lucila Morales por ser mis principales forjadores de mi cualidad y virtudes, motivo de mis éxitos.

A mi esposa Linda Machado quien me ha apoyado durante todo mi estudio emocionalmente y en la edición del presente documento.

Debo también un gran aprecio a todos mis maestros que me formaron como ingeniero, así también a mis maestros de Doctorado con quienes desde mi inicio me han apoyado con buenas intenciones, agradezco a la calidad de su enseñanza y apoyo. A mis compañeros de estudio que me apoyaron en mi dirección y amigos que, durante mi desarrollo, me han ofrecido su tiempo y sincera amistad de apoyo durante mi formación.

Agradezco al Dr. Benjamín Valdez, por darme la oportunidad de unirme a la UABC y de brindarme de su tiempo para asesorarme en mi formación profesional y que el presente proyecto fuese una realidad.

Al Dr. Tomas Prieto quien me ofreció su tiempo y paciencia, para desarrollar mi proyecto y formación profesional con toda amabilidad, dándome una nueva experiencia y una nueva forma de ver las cosas fuera de lo ordinario.

RESUMEN

En la actualidad las calles de la ciudad o vías urbanas son muy importante para la trascendencia económica del Estado, sobre todo en los Estados fronterizos donde existe un continuo intercambio de mercado global, al avanzar los años el crecimiento demográfico y de mercados, obligan al desarrollo; No se puede aspirar a ser una economía de primer mundo sin infraestructura de vías, es necesario ir superando los estándares.

El tipo de autopista más popular y económico, es el de pavimento asfáltico, un material derivado de los hidrocarburos y tomando en cuenta el problema actual sobre el calentamiento global es importante considerar el factor de un desarrollo sustentable. El proceso de mantenimiento de estas autopistas, es el reciclaje de este material para su reconstrucción, en esta tesis se aborda el tema del reciclaje de pavimento asfáltico a través del proceso en caliente; Donde existe maquinaria que al tiempo que se va recuperando el material asfáltico, lo mezcla con material virgen, este proceso es realizado inmediatamente después de rasgar el material dañado de las calles; El problema que se presenta en este tipo de proceso, es que algunos contratistas, calientan el asfalto por encima de la temperatura límite, creando humos tóxicos para el ambiente y las personas, además de dañar el material asfáltico, porque al elevarlo a más de 200°C, pierde sus propiedades mecánicas. Otro problema común es que al utilizar sierras para los cortes de la carpeta asfáltica por debajo de los 50 milímetros, ocasiona grietas que dañan la infraestructura a corto y largo plazo, en la presente tesis se desarrolló un análisis de experimentos por medio de un sistema embebido de la marca *National instruments®*, para poder determinar el comportamiento de la transferencia de calor sobre el asfalto; El objetivo de estos experimentos, es conocer el fenómeno y determinar cuál es la forma más apropiada de realizar la operación, determinando el tiempo necesario que se requiere para transferir el calor sobre la superficie del asfalto y poder asegurar una temperatura necesaria para rasgar un determinado espesor. Esta información nos permite no quebrar la estructura por falta calor y no elevar la temperatura por encima de su límite, Evitando la pérdida de sus propiedades mecánicas.

Otro análisis es la búsqueda de las diferentes tecnologías que existen en la actualidad, para determinar las ventajas y desventajas en su diseño, como también identificar los procesos que son utilizados para elaborar este tipo de obras, esta información será analizada para determinar cuáles

son las mejores estrategias y mecanismos de la maquinaria para el mantenimiento de las carpetas asfálticas en caliente, en términos de calidad, operación y presupuesto. Tomando en cuenta que, para llevar a cabo una buena obra, no solo basta con tener la mejor tecnología. Se investigarán los factores que independientemente de la maquinaria, puedan afectar a la elaboración de una obra de reciclaje de asfalto en caliente. Estos factores y otros serán enlistados en la presente tesis.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS	12
1. Introducción	13
2. Problemática.....	14
2.1 La Situación del País.....	14
2.2 La Situación local.....	18
3. Tecnología sustentable	22
4. Estado del arte	25
4.1 Tratamiento superficial de reciclaje de pavimento asfaltico en frio	26
4.2 Tratamiento superficial de reciclaje de pavimento asfaltico en caliente.....	32
4.3 Características de las tecnológicas modernas	37
4.3.1 Tecnología desarrollada por Martec	39
4.3.2 Tecnología desarrollada por Freetech.....	51
4.3.3 Tecnología desarrollada por Ecopave.....	65
4.3.3.1 Variaciones de proceso	73
4.3.4 Tecnología desarrollada por Green Arm	75
4.3.5 Tecnología desarrollada por Wirtgen Group	82
5. Comparación de tecnologías con una estación de corte contra varias estaciones de corte	89
6. Procedimientos que determinan una obra de mantenimiento de RAC.....	91
7. Desarrollo de pruebas de transferencia de calor.....	94
7.1 Desarrollo de muestras asfálticas	96
7.2 Desarrollo de tecnología para análisis de transferencia	101
7.2.1 Desarrollo de tecnología 1	101
7.2.2 Desarrollo de tecnología 2	106
8. Diseño y resultado de experimentos.....	108
9. Desarrollo y diseño de la maquinaria.....	119
CONCLUSIÓN.....	135
REFERENCIAS.....	138
ANEXO 1 (Martec Tijuana)	147

ANEXO 2 (Freetech mecanismos)	153
ANEXO 3 (Ecopave mecanismos)	156
ANEXO 4 (Wirtgen mecanismos)	158
ANEXO 5 (Desarrollo de muestras asfálticas)	163
ANEXO 6 (Diseño del horno)	166
ANEXO 7 (Diseño del circuito de adquisición de datos 1)	167
ANEXO 8 (Diseño del circuito de adquisición de datos 2)	175
ANEXO 9 (Obra y máquina utilizada en Mexicali)	183
ANEXO 10 (Planos del Mecanismo)	185
ANEXO 11 (Memoria de cálculo)	186

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Inversión con respecto al PIB en infraestructura.....	14
Figura 2. Egreso a carreteras eficientes, seguras y suficientes	15
Figura 3. Bulevar Venustiano Carranza donde aplicaron una carpeta de concreto y asfalto.....	16
Figura 4. Porcentaje de calles pavimentadas por país.....	17
Figura 5. Distribución de carreteras por división política.....	17
Figura 6. Distribución de la red de la infraestructura de carretera.....	18
Figura 7. Porción de la red total de calles en Baja California pavimentadas y no pavimentadas.	19
Figura 8. Estructura de una vía urbana y trasferencia de carga	20
Figura 9. Daños irregularidad superficial, grietas y bache respectivamente	20
Figura 10. Demolición completa de la carpeta asfáltica.....	21
Figura 11. comparativo de precios al alza para materiales de la construcción.....	23
Figura 12. Emisiones de CO2	24
Figura 13. Fresado de pavimento para la remoción de asfalto	26
Figura 14. Esquema en 3ra dimensión de fresado de pavimento.....	26
Figura 15. Arreglo común de un proceso de pavimentación en frio.....	27
Figura 16. Variaciones de los modelos de fresadora de la marca Wirtgen.....	28
Figura 17. Fresadora con barredoras en los procesos en frio.....	28
Figura 18. Dimensiones de la máquina fresadora barredora.....	28
Figura 19. Planta productora de asfalto	29
Figura 20. Fresadora barrenadora marca Caterpillar	29
Figura 21. Proceso de reciclaje en frio en sitio	30
Figura 22. Proceso en frio con la máquina WR4200 de la máquina Wirtgen	30
Figura 23. Comparación de maquinaria que se sustituye con la WR4200	30
Figura 24. Máquina WR 4200 para trabajo en frio.....	31
Figura 25. Dimensiones de la WR 4200	31
Figura 26. Rodillos con punta de tungsteno utilizados para aserrar el asfalto.....	33
Figura 27. Dedos escarificadores para rasgar el pavimento asfáltico en un proceso en caliente	33
Figura 28. Gráfica de análisis para asistir al mantenimiento de calles en el momento apropiado	34
Figura 29. Máquina RX 4500 para reciclaje en caliente de la empresa Wirtgen.....	35
Figura 30. Baches baja profundidad, agrietamiento segmentado y grietas longitudinales.....	37
Figura 31. Equipo comúnmente utilizado en todos los procesos.....	38
Figura 32. Procesos actualmente empleados en obra de mantenimiento a calles.....	38
Figura 33. AR2000 durante una obra de mantenimiento.....	39
Figura 34. Máquinas utilizadas por Martec para el mantenimiento del RAC	40
Figura 35. Cámara de combustión de Martec	40
Figura 36. Vista inferior de la cámara de calentamiento de la máquina AR2000	41
Figura 37. Diseño del pre calentador del AR2000.....	41

Figura 38. Pre calentador AR2000 en obra.....	42
Figura 39. Pre calentador/fresadora AR2000.....	42
Figura 40. Rodillos del pre calentador/fresador AR2000	43
Figura 41. Pre calentador/fresadora AR2000.....	43
Figura 42. Post calentador/Secadora/Mezcladora AR2000	44
Figura 43. Gusanos y trasportador de AR2000.....	44
Figura 44. Máquina recogiendo el bulto de asfalto recuperado.....	45
Figura 45. Velocidad promedio del AR2000 en un proyecto en la India	46
Figura 46. Medición de temperaturas en diferentes puntos del proceso.....	46
Figura 47. Compactación del AR2000 para ser transportado a otro sitio	47
Figura 48. Gráfica del comportamiento la transferencia de calor a diferentes profundidades	48
Figura 49. Porcentaje de material reciclado para las obras en china	51
Figura 50. Equipo para el mantenimiento superficial de asfaltos en caliente de origen chino.....	52
Figura 51. Pre Calentador HM16 de Freetech	52
Figura 52. Transporte de HM16.....	53
Figura 53. Máquina HM16 paneles desplegables	54
Figura 54. Máquina TR168 tractor oruga	54
Figura 55. RM6800 máquina escarificadora de Freetech	55
Figura 56. Detalles del RM680, Calentador, escarificadores y gusanos, de izq. a derecha.....	55
Figura 57. Aspersores del RM680 de Freetech.....	56
Figura 58. Escarificadores del RM680	56
Figura 59. Formador del bulto y calentador a la salida del RM680	56
Figura 60. TR165 Oruga tractor para agregar mezcla asfáltica	57
Figura 61. Tolva móvil del TR165, para agregar mezcla asfáltica a la obra	57
Figura 62. TR165 Tractor oruga para aportar una nueva mezcla asfáltica al bulto recuperado ...	58
Figura 63. EM6500 Mezclador con tracción de Freetech.....	58
Figura 64. EM6500 Elevador y mezclador de Freetech	59
Figura 65. Freetech realizando una obra bajo temperaturas muy frías con éxito	60
Figura 66. Máquina japonesa HITO	61
Figura 67. Comparación del Método HITO japonés y HIR de Martec	61
Figura 68. Mecanismo de fresador de rodillo	63
Figura 69. Toma de muestras asfálticas para verificar las condiciones y propiedades del material	64
Figura 70. Equipo para el mantenimiento superficial de asfaltos en caliente de origen chino.....	66
Figura 71. Tren de maquinaria con 3 estaciones.....	66
Figura 72. Pre calentador de Ecopave.....	67
Figura 73. Calentador y cortador de Ecopave.....	67
Figura 74. Mezclador de color verde de Ecopave.....	68
Figura 75. Arreglo convencional para una obra de Ecopave	69
Figura 76. Incinerador de humo.....	69

Figura 77. Esquema de proceso para 2 estaciones de corte	70
Figura 78. Ecopave trabajando de noche en Aeropuerto de Canadá	71
Figura 79. Esquema de trabajo para proceso de 3 estaciones (Fyvie K. , 2014)	71
Figura 80. Transporte del Ecopave 400 por un tráiler convencional (Ecopave, 2018)	72
Figura 81. Compactacion de Ecopave 400	72
Figura 82. Arreglo convencional	74
Figura 83. Arreglo para temperatura muy baja.....	74
Figura 84. Arreglo baja temperatura y mayor profundidad de 50mm	74
Figura 85. Comparación entre el asfalto poroso y el convencional	75
Figura 86. Filtración de agua hacia zonas verdes	76
Figura 87. Muestra tomada después de una obra.....	76
Figura 88. Tren de tecnología HITONE de parte de Green ARM.....	76
Figura 89. Pre calentador HITONE	77
Figura 90. Concepto del proceso de calentamiento de HITONE.....	77
Figura 91. Calentador/cortador HITONE	78
Figura 92. concepto de trabajo del Calentador/cortador de HITONE	78
Figura 93. Separador HITONE	79
Figura 94. separador con criba de HITONE	79
Figura 95. Mezclador de asfalto de HITONE	80
Figura 96. Operación esquemática del mezclador de asfaltos	80
Figura 97. Temperaturas de operación.....	81
Figura 98. Una de las 5 plantas del grupo Wirtgen.....	82
Figura 99. Áreas de Mercado de Wirtgen group.....	83
Figura 100. Tren de obra de Wirtgen.....	83
Figura 101. Pre calentador HM4500 de Wirtgen.....	84
Figura 102. HM4500 compactado	85
Figura 103. Remixer 4500 de Wirtgen	86
Figura 104. Diferencias entre los modelos Remix 4500 y Remix-plus 4500 de Wirtgen	87
Figura 105. Remix 4500 forma de transportación	87
Figura 106. Comparación del AR2000 y el Ecopave 400 para una obra de 50 mm de profundidad	90
Figura 107. AR2000, Máquinas que se requieren agregar para un corte a 100 mm.....	90
Figura 108. Ecopave 400 Máquinas que se requieren agregar para un corte a 100 mm	90
Figura 109. Esquema de la decisión para el mantenimiento de calles.....	92
Figura 110. Arreglo conceptual para el sistema de adquisición de datos	95
Figura 111. Zona de calentamiento del horno para las pruebas.....	95
Figura 112. Diseño general del horno.....	96
Figura 113. Regiones geográficas para cementos asfálticos.....	97
Figura 114. Aislamiento lateral de las muestras asfálticas con 3 sensores RDT	98
Figura 115. Desprendimiento de los agregados a 100°C	98

Figura 116. Aislamiento de la cara inferior de la muestra asfáltica.....	98
Figura 117. Colocación de la muestra asfáltica en el horno	99
Figura 118. Temperatura de la superficie de la calle a temperatura ambiental	100
Figura 119. Aislamiento de las paredes del horno.....	100
Figura 120. Diseño de accesorios para aislamiento de la cámara.....	101
Figura 121. Sensores de platino PT100	102
Figura 122. Arreglo para la conversión de señal de los RTD hacia el adquisidor de datos DATAQ®.....	102
Figura 123. Gráfica comparativa de los sensores RTD	104
Figura 124. Resultados para las primeras pruebas de transferencia	104
Figura 125. Instrumento embebido MyRIO® de National Instrument.....	106
Figura 126. Comparación de la electrónica entre el diseño 2 con el previo	107
Figura 127. Pruebas de calentamiento con el nuevo sistema de MyRIO®	107
Figura 128. Pantalla diseñada en LabVIEW® para captura y comprensión de información de pruebas	108
Figura 129. Gráficas de comportamiento de la temperatura contra segundos a 25 mm.....	110
Figura 130. Gráfica de pruebas a 25 milímetros de profundidad	111
Figura 131. Gráficas de comportamiento de la temperatura contra segundos a 16 mm.....	112
Figura 132. Gráfica de pruebas a 16 mm de profundidad.....	113
Figura 133. Gráficas de comportamiento a 16 mm de temperatura a mayor intensidad de calor	114
Figura 134. Gráfica de pruebas a 16 mm con alta intensidad.....	115
Figura 135. Gráficas de comportamiento a 15, 30, 45 y 60 mm de profundidad	116
Figura 136. Arreglo de maquinaria propuesta	120
Figura 137. Vista general de la máquina diseñada	120
Figura 138. Estructura de la cama de calentamiento	121
Figura 139. Cama de calentamiento vista general	121
Figura 140. Versión de la cama de calentamiento sin banda transportadora.....	122
Figura 141. Vista isométrica de la primera estación.....	122
Figura 142. Cama de calentamiento compactada	123
Figura 143. Ubicación de los escarificadores	124
Figura 144. Dedos escarificadores.....	124
Figura 145. Estructura de los dedos escarificadores abierta y compactadas	125
Figura 146. Estructura de escarificadores acoplada a la cama.....	125
Figura 147. Ubicación de los rodillos de gusano.....	126
Figura 148. Rodillos de gusanos extendidos y compactos	126
Figura 149. Estructura de rodillos gusanos en soportes.....	127
Figura 150. Sistema de calentamiento, escarificación y gusanos	127
Figura 151. Soportes de pistones hidráulicos	128
Figura 152. Vista inferior de las estructuras compactas y abiertas.....	128

Figura 153. Vista inferior con las estructuras compactadas	129
Figura 154. Ejes de neumáticos	129
Figura 155. Pistón y motor hidráulico	130
Figura 156. Ejes frontales desmontable	130
Figura 157. Máquina compactada y sin ejes frontales.....	131
Figura 158. Equipos adicionales	131
Figura 159. Estructura principal de la maquinaria.....	132
Figura 160. Sub ensambles generales de la máquina.....	133
Figura 161. Tren de 3 estaciones de corte.....	134

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de Egreso a carretera	15
Tabla 2. Uso anual de RAP y pavimento asfaltico virgen	23
Tabla 3. Comparación entre el Reciclaje en caliente en sitio y 2 versiones del frio	36
Tabla 4. Consumo de energía entre diferentes métodos	36
Tabla 5. Comparación de emisiones entre Martec y los sistemas infrarrojos.....	41
Tabla 6. Velocidad de operación de AR2000 en una obra en Italia	45
Tabla 7. Datos exportados del DATAQ® a Excel.....	103
Tabla 8. Datos convertidos de voltaje a temperatura.....	103
Tabla 9. Tiempo en minutos para pruebas a 25 mm de profundidad.....	111
Tabla 10. Tiempo en minutos para pruebas a 16 mm de profundidad.....	112
Tabla 11. Pruebas a 16 mm a intensidad de calor.....	114
Tabla 12. Diferencias de tiempo para la transferencia entre sensores	117

1. Introducción

En la actualidad las calles de la ciudad o vías urbanas son importantes para la trascendencia de la economía local y nacional, sobre todo en los Estados fronterizos donde existe un continuo intercambio de mercado global a través de esta infraestructura, al avanzar los años el crecimiento demográfico y los sectores económicos, nos obligan a desarrollarla, no se puede aspirar a ser una economía de primer mundo con infraestructura decadente, se necesita ir superando los estándares actuales.

Debemos considerar que las calles vienen a ser la infraestructura para otras infraestructuras, porque una vez construidas, es más fácil proporcionar otro servicio y esto genera actividad económica. Debemos tener en cuenta que, en México, el 80% de las cargas se mueven en autotransporte y el 96% de los pasajeros se desplaza por los mismos medios. (Armenta, Noviembre 27, 2013).

Las calles logran que una sociedad pueda comunicarse más rápido, para atender las necesidades básicas de salud, educación y trabajo, el crecimiento demográfico debe ser atendido en proporción para mantener una calidad de vida que favorezca a la sociedad y a su nación.

Este crecimiento debe ser además sustentable, de manera que el crecimiento o desarrollo de esta infraestructura no afecte otros factores, el más sensible es el ambiental, debe existir un equilibrio que no dañe el futuro de las próximas generaciones.

2. Problemática

2.1 La Situación del País

Los países en América latina deben invertir al menos 5% en infraestructura de su Producto Interno Bruto **PIB** para dar el salto a la competitividad, señalado por el Banco de Desarrollo de América Latina **CAF**. De acuerdo con el foro económico mundial, México se ubica en el lugar 68 de 144 países, en el índice de competitividad de infraestructura; Por debajo de países como Barbados (22), Panamá (37), Chile (37), Uruguay (49), Trinidad y Tobago (55) y conforme a la clasificación de este foro, México ocupa el lugar 50 en carreteras. (STC, 2015, Abril 29).

El presupuesto de egreso de la federación mexicana refleja que de 1990 al 2010 la inversión en infraestructura en México ha aumentado, podemos ver que en la figura 1 en 1990 se tenía considerado el 2.8% de inversión con respecto al PIB y para el 2010 se ha incrementado al 4.9%, aunque en los últimos años por los acontecimientos económicos y políticos del país este porcentaje ha reducido al 2.8%. (Patiño, 2017, Septiembre 14).

En los últimos 7 años el gasto en egreso programado para carreteras; Donde podemos encontrar el rubro de conservación de carreteras, se ha mantenido dentro de un promedio de los 40,000 millones de pesos, lo podemos ver en la tabla 1 y figura 2.

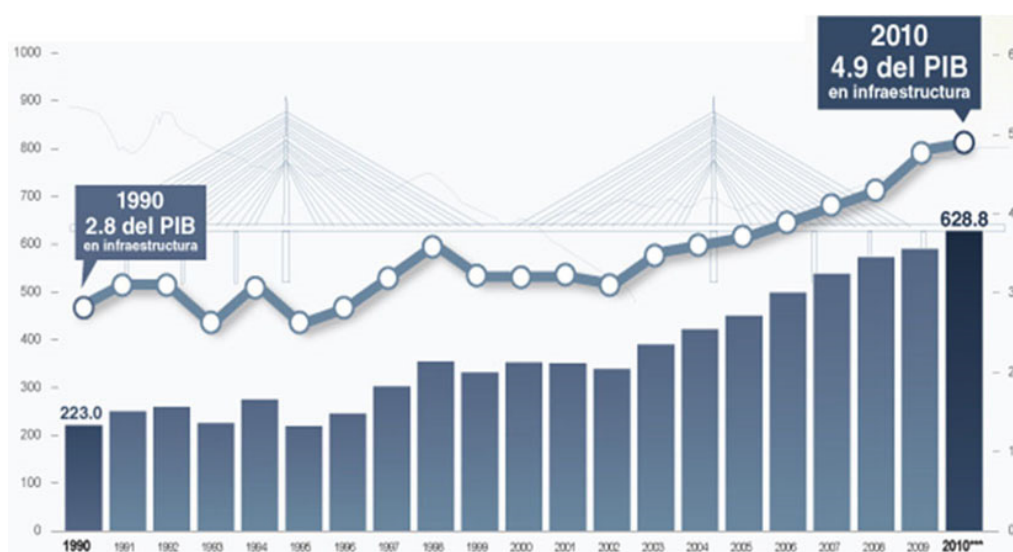


Figura 1. Inversión con respecto al PIB en infraestructura (Presidencia de la República, 2011, 27 Julio)

2012	\$ 39,979,687,276.00	\$ 85,544,035,497.00
2013	\$ 43,878,394,073.00	\$ 86,243,898,861.00
2014	\$ 48,279,806,531.00	\$ 118,832,379,900.00
2015	\$ 46,484,112,097.00	\$ 126,146,236,133.00
2016	\$ 46,211,670,764.00	\$ 105,217,734,544.00
2017	\$ 29,272,214,719.00	\$ 84,627,745,420.00
2018	\$ 36,466,543,809.00	\$ 84,548,590,749.00

Tabla 1. Datos de Egreso a carretera (SHCP, 2018, 24 Enero)

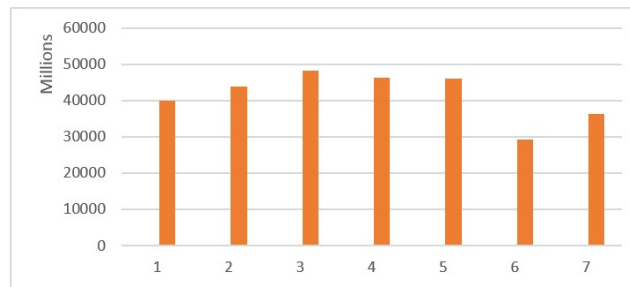


Figura 2. Egreso a carreteras eficientes, seguras y suficientes (SHCP, 2018, 24 Enero)

Aunque hay calles de concreto, la más económica y común entre las calles del mundo es el asfalto, un material termoplástico, el cual es muy complejo desde el punto de vista químico; Es obtenido como residuo en el proceso de refinación del petróleo crudo, sin embargo, este es un material de suma importancia por sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad, durabilidad y sobre todo, por su bajo costo, ya que es el residuo en el proceso de refinación del petróleo, (Rogelio Rodríguez V. C., 2001). Es importante mencionar que los pavimentos existentes en nuestro país son en la mayoría de asfalto, aunque existen alrededor de 4,500 kilómetros de pavimento rígido es decir de concreto. (Pérez, 3 de Octubre 2013).

Los pavimentos de concreto son utilizados donde existen cargas muy elevadas, donde el asfalto tendría un daño muy frecuente. El concreto y el pavimento tiene su momento en la toma de decisión de elaboración de las calles y el concreto tiene la ventaja de resistir más carga, pero es una infraestructura con un costo muy elevado, en lugares muy cálidos se debe de utilizar un concreto especial; Además el mantenimiento a carreteras de concreto en comparación con las de asfalto, son más costosas. Es por esa razón, que el pavimento asfáltico predomina en un bajo costo, tanto es su construcción, como en el mantenimiento.

Aun así, el concreto puede ser utilizado en tramos donde usualmente hay altos o paradas; Debido a que en estos puntos cuando transita equipo pesado, como los camiones de carga, al frenar generan esfuerzos muy elevados que pueden dañar el asfalto y después de este tramo se puede seguir colocando pavimentos de asfalto. Un ejemplo de este caso es el Bulevar Venustiano Carranza en Mexicali B.C. a la altura del parque industrial Pimsa II. Como podemos apreciarlo en la figura 3.

En EUA tienen el 63% de su red pavimentada, el 90% en Europa, 43.5% en China, 39.9% en Canadá, en la figura 4, podemos ver un mapa con los porcentajes de calles pavimentadas por país. (ChartsBin, 2011).



Figura 3. Bulevar Venustiano Carranza donde aplicaron una carpeta de concreto y asfalto

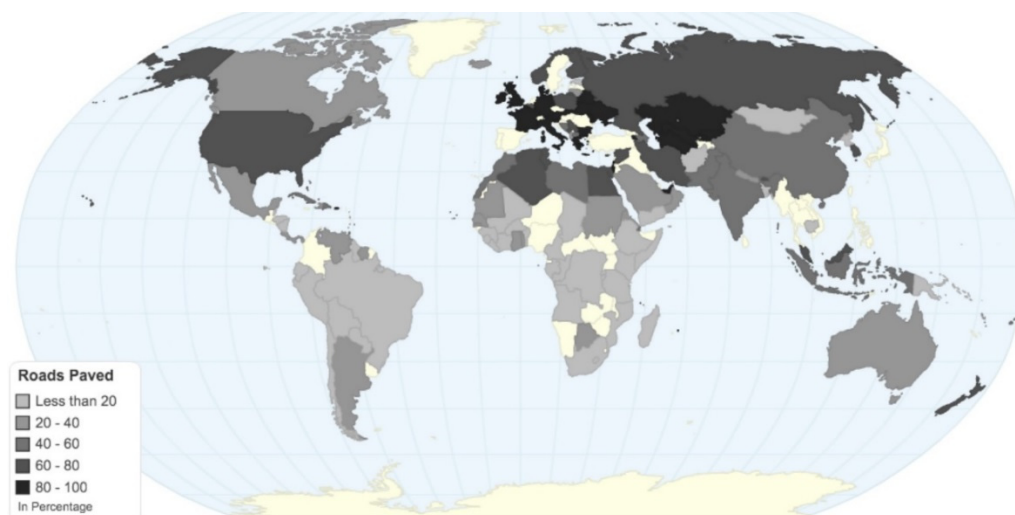


Figura 4. Porcentaje de calles pavimentadas por país (ChartsBin, 2011)

La infraestructura de las calles de nuestro país, está constituida por un total de 444,102.81 kilómetros de carretera. (gob.mx, s.f.). Dentro de este total de la red de caminos o vías, estas divisiones están asignadas a los diferentes niveles de poder gubernamental en el país, que es el federal, estatal y municipal; Podemos ver en la figura 5, una cartográfica donde están las huellas de este tipo de asignación. Y en la figura 6 podemos ver el desglose de las clasificaciones de la red, dividida por su función.

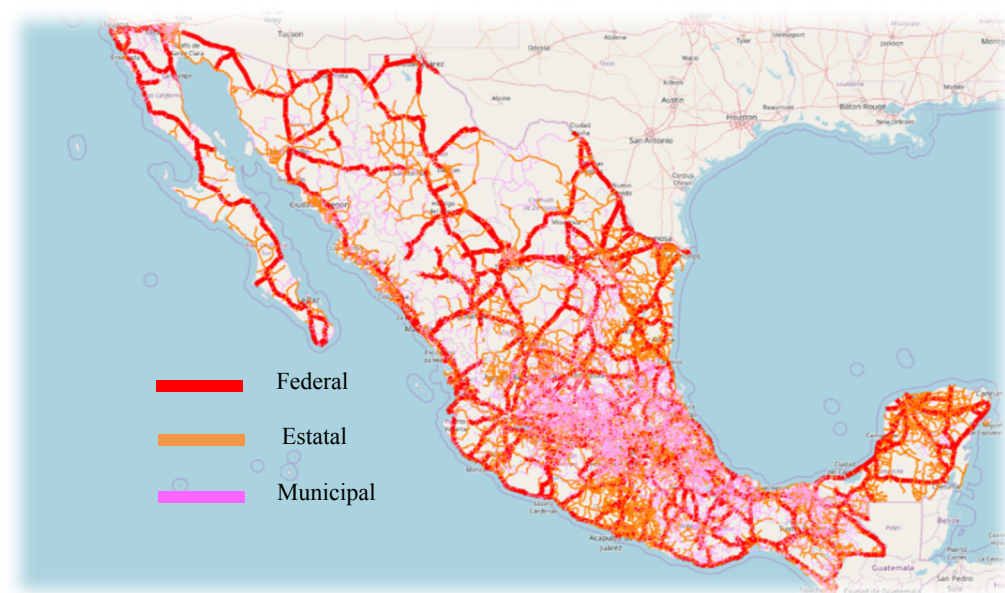


Figura 5. Distribución de carreteras por división política

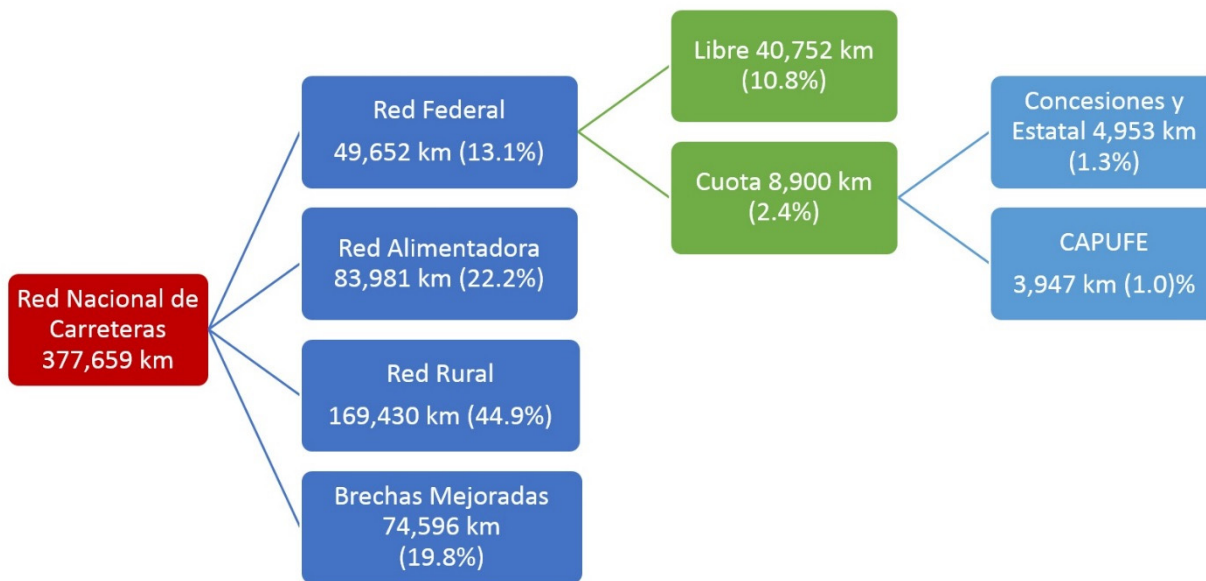


Figura 6. Distribución de la red de la infraestructura de carretera (SCT, 2013).

Actualmente en México de los 444,102.81 kilómetros de carretera de toda la red disponibles se cuentan con 180,606 kilómetros de carreteras pavimentadas, (IMT, 27, 27 Junio), estas representan el 40% de toda la red. Y de este porcentaje la situación es la siguiente: el 53 % de la red tiene más de 30 años y solamente 16% tiene menos de 15 años; 21% soporta tránsitos diarios de más de 5,000 vehículos y solamente 61% se encuentran en estado de regular a bueno, es evidente que los pavimentos que tiene más de 30 años se hicieron con criterios de diseño, especificaciones y materiales, diferentes a los exigidos hoy en día. (Pérez, 3 de Octubre 2013).

2.2 La Situación local

De toda la red de carretera a nivel nacional, la red alimentadora y rural, pertenecen a la responsabilidad de los Estados y Municipios, la función de estas vías son de carácter social y en materia de infraestructura carretera se logra la comunicación permanente entre los centros de población con los centros de consumo y de producción, esto a nivel rural y urbano; Acceso de amplios grupos de población campesina a servicios básicos de salud y educación; Esto genera mayores oportunidades de empleo y promueve el desarrollo de las regiones con mayor rezago. En virtud de que las inversiones se orientan a la realización de obras para atender aquellas zonas y localidades más alejadas y por lo tanto, las más desprotegidas y de mayor marginación, esto

cumple con el propósito de hacer más seguro y eficiente el movimiento de bienes y personas que circulan a través de estas vías, además se tendrán beneficios para los usuarios al lograrse mayores velocidades de desplazamiento, lo que contribuye a la disminución de los costos de operación vehicular y los tiempo de recorrido. Todo esto detona el desarrollo regional, genera empleo y bienestar social, factores indispensables para la productividad, competitividad y crecimiento nacional. Entre la red de carretera de alimentación y rural suman un total de 253,411 kilómetros, que representan el total de 67.1 % de toda la red nacional. (SCT, 2013).

Con el fin de medir la magnitud de la situación nacional se realizó una investigación local para analizar la problemática a este nivel; En Baja California se tiene el primer lugar en referencia a todos los demás Estados con 916 compañías de manufactura extranjera que representan 308,150 empleos; Las exportaciones del Estado representan el 10.6% del total del país, tiene el 2do lugar como uno de los Estados con mayor exportación, con 5 municipios y un total de 3 315 766 habitantes; Mexicali y Tijuana están dentro de las 10 ciudades más grandes de México, con una población con edad promedio de 26 años, 51 Universidades, con 100 parques industriales, 2 aeropuertos, 7 cruces fronterizos, (SEDECO, 2017, Mayo), cuenta con 4,400 kilómetros de calles los cuales representan el 1.8% de la infraestructura carretera de la red alimentadora y rural. Para apreciar gráficamente estos valores podemos ver la figura 7.

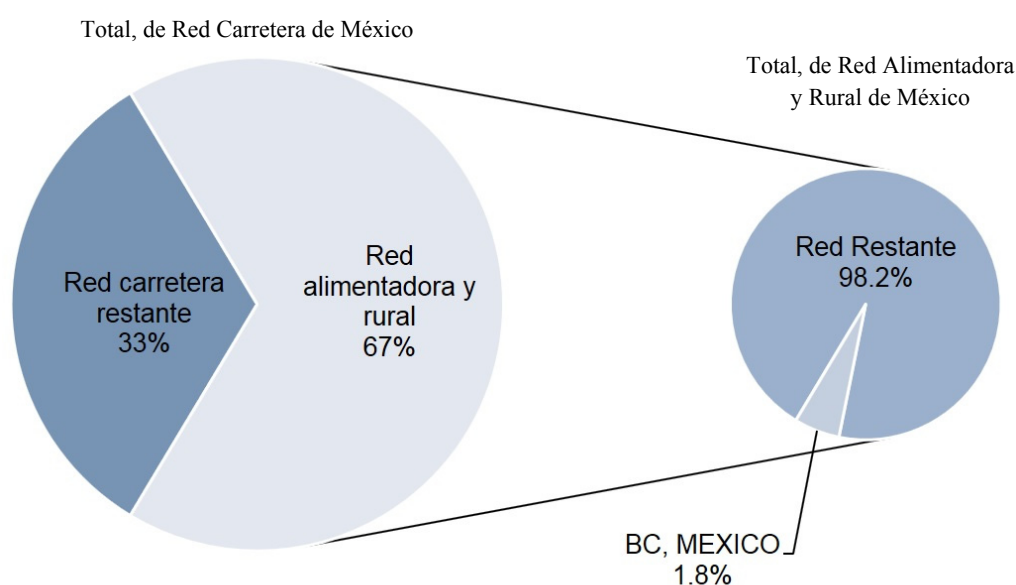


Figura 7. Porción de la red total de calles en Baja California pavimentadas y no pavimentadas

En Baja California para el 2014 de los 4,400 kilómetros contábamos con 2,413 kilómetros de calles pavimentadas que son el 55% del total de su red. (SCT, n.d.).

El material más utilizado en calles urbanas es el pavimento asfáltico y está sujeto a 3 factores importantes: el medio ambiente, el continuo tráfico y el envejecimiento natural, estos producen un deterioro en la superficie del pavimento y va reduciendo los niveles de seguridad y confort del tráfico. Para tener una idea general, las calles tienen una estructura de sólidos y por capas, estas las podemos ver en la figura 8 y 9, la parte que más sufre deterioro es la superficie.



Figura 8. Estructura de una vía urbana y transferencia de carga (Wirtgen, 2004)

Una calle puede tener una lista larga de tipos de fallas, pero entre las más comunes pueden ser grietas pronunciadas, baches y fallas por rodada (irregularidad en la rectitud de la superficie). Figura 9, El tipo de daño define el tipo de mantenimiento que se requiere, por ejemplo, en cualquiera de las anteriores a niveles muy pronunciados la carpeta asfáltica tiene que ser demolida por completo. Ver figura 10.



Figura 9. Daños irregularidad superficial, grietas y bache respectivamente

Para conocer los costos que implica la demolición completa de la carpeta asfáltica se realizó una entrevista en 2015 con Rene Rojas, coordinador de mantenimiento en Mexicali, quien es encargado de la conservación de las calles y afirma que con el actual equipo con el que contamos, tenemos la capacidad de dar cobertura de mantenimiento de conservación a calles de Baja California a solo el 10% del total, con estos datos podemos corroborar el grado de importancia para este país, en lograr mayores avances para continuar con la cobertura de esta infraestructura. En anexo 9 podemos ver la tecnología que utilizamos en Baja California.



Figura 10. Demolición completa de la carpeta asfáltica

En un proyecto realizado en Mexicali, Baja California, el coordinador de mantenimiento nos afirma que, en un proyecto realizado en el Bulevar Venustiano Carranza en cruce con la calzada independencia, para poder desechar un tramo de calle de 200 metros de largo por 9 metros de ancho por 5 centímetros de carpeta asfáltica de grosor, se requería acarrear 90 metros cúbicos de material asfáltico al centro de disposición localizado en Hipólito Rentería, el costo para este trabajo sería de \$283,000 pesos. Una vez desechado la carpeta asfáltica, es necesario colocar una carpeta asfáltica con solo material virgen, el costo sería de un promedio de \$2,500 por metro cubico y para poder cubrir este mismo tramo de 90 metros cúbicos serían \$225,000 de pesos.

Esta actividad resulta en un costo muy alto, por lo que actualmente es necesario idear la mejor forma de reciclar el asfalto en vez de solo dejarlo en un centro de acopio.

Solamente en Mexicali se cuenta con un rezago del 27% de pavimentación, el otro 73% de las calles cuenta con el asfalto y de este 73% el 60% requiere algún tipo de mantenimiento de forma urgente. (Molina, 2017, 23 de Abril).

3. Tecnología sustentable

La legislación con el tiempo dificulta la práctica de los métodos tradicionales, por ejemplo: la obtención de la materia prima, normalmente no se produce en el lugar donde se construyen las calles, además el almacenamiento temporal durante la construcción está limitado en las ciudades y donde puede ser almacenada, los costos van en aumento, además los desechos de los materiales envejecidos de la superficie de las calles pueden generar contaminación en su traslado.

Actualmente el precio de los materiales está incrementando, es indispensable cambiar de estrategia, no es viable desechar el asfalto de las calles en un centro de acopio. En la figura 11 podemos ver como los precios de 4 materiales de construcción están en aumento y el asfalto es el más alto de los 4. Si utilizamos el 50% de Pavimento Asfáltico Recuperado (**RAP** por sus siglas en inglés), se dejaría de gastar tanto en costos y se utilizaría menos energías para generar material asfáltico. Debemos de pensar en la tecnología que reduzca este problema hacia un pensamiento sustentable. El principal objetivo de esta tecnología sustentable es la administración eficiente y racional de los recursos, que mejore el bienestar de la población actual, sin comprometer la calidad de la vida de las generaciones futuras “Brundtland, 1987”, vivimos un tiempo donde debemos reducir el uso de los hidrocarburos y en algunos casos estrictos debemos pensar a futuro en dejar de usarlos. Es por esto que esta tecnología propone no solo utilizar material asfáltico virgen, en Europa se producen aproximadamente 90 millones de toneladas de Pavimento Asfáltico Recuperado **RAP** y en EUA es de 100 millones de toneladas, solo en el año 2010 en EUA se estima que el reciclaje permitió no utilizar 20.5 millones de barriles (NAPA, 2018), los detalles los podemos ver en la tabla 2.

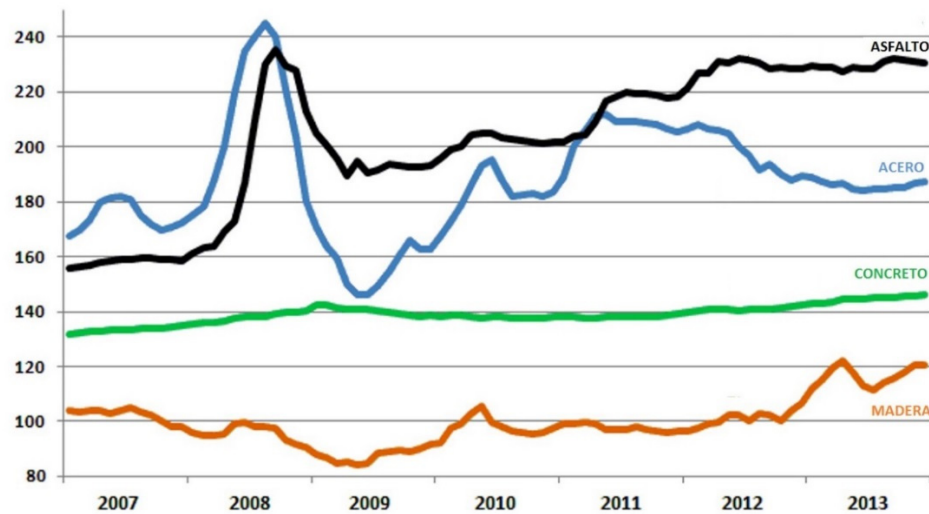


Figura 11. comparativo de precios al alza para materiales de la construcción (Concrete, 2014, February)

	País	RAP toneladas	Pavimento
1	EUROPA	90 millones	333 millones
2	EUA	100 millones	500 millones
3	México	No se conoce	1.6 millones

Tabla 2. Uso anual de RAP y pavimento asfáltico virgen (Bolzan, 2011)

Hoy en día el reciclaje es una práctica que se está popularizando en los países, así que la necesidad de reciclar para el desarrollo sustentable, debe ser una operación no solo para beneficiar el factor económico sino también para el ambiental y social.

En el factor económico tenemos que el uso del RAP en los procesos de mantenimiento reduce el costo de inversión y la ventaja de los pavimentos asfálticos, es que son reciclables en su totalidad.

Entre los beneficios económicos se encuentran los siguientes:

- Técnicas de rehabilitación de pavimentos más económicos.
- Calles con larga duración con el mismo material asfáltico.
- Pavimentos que requieran poco mantenimiento.
- Pavimentos diseñados para soportar volúmenes de carga que permitan el desarrollo industrial y económico del país
- Menos usos de fondos gubernamentales.

En el factor ambiental, existe una gran disminución de emisiones de CO₂, porque se deja de generar material innecesario; En una planta de mezclas asfálticas existen emisiones tanto directas como indirectas. Estas emisiones se muestran en la figura 12.

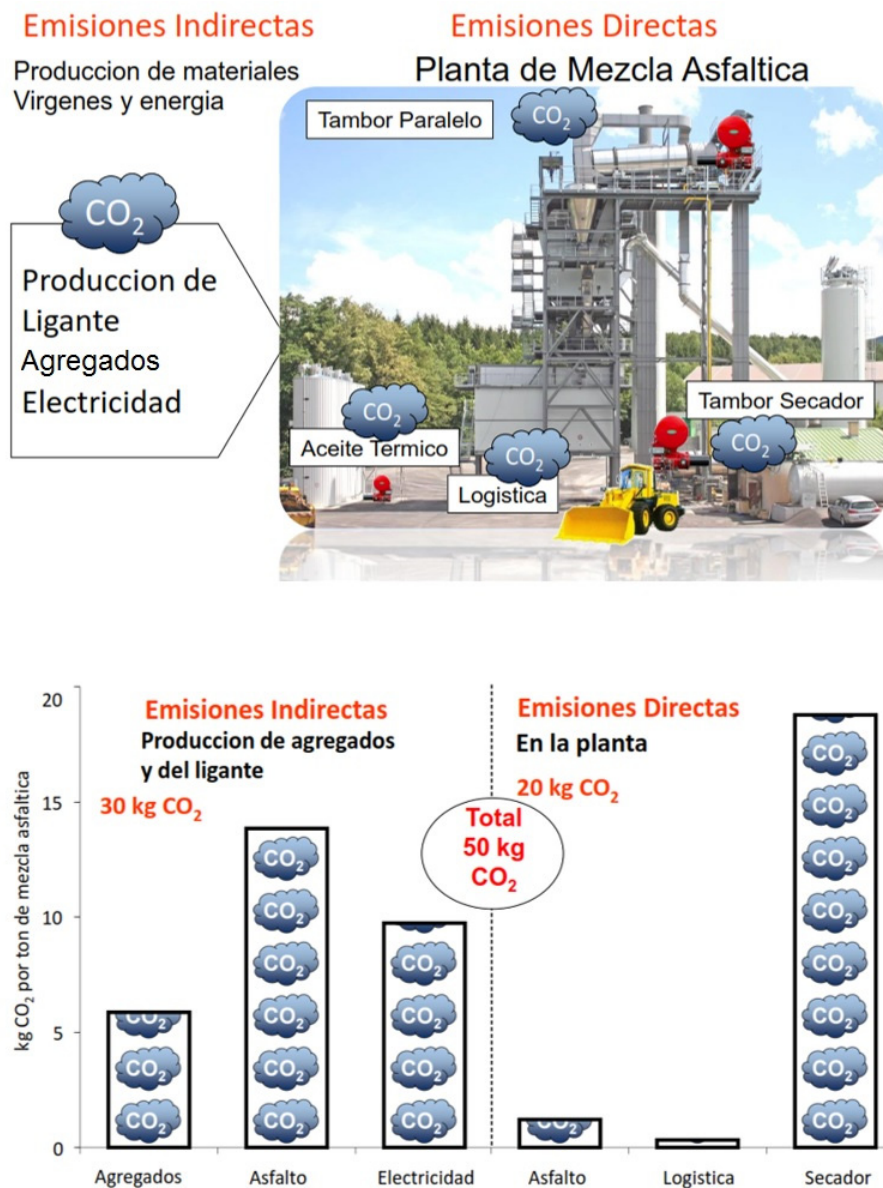


Figura 12. Emisiones de CO₂ (Galvis, 2014)

Entre los beneficios ambientales se encuentran los siguientes:

- Reducción de ruido por rodado.
- Reducción de CO₂ en todos los procesos necesarios para generar el material asfáltico.
- Automóviles operando bajo mejores condiciones y generando menos contaminación.

En lo social el crecimiento de esta infraestructura permite a la sociedad elevar su calidad de vida, porque proporciona una comodidad a sus actividades cotidianas, además de que permite una facilidad para desarrollar sus actividades importantes, como ir al trabajo o llevar a los hijos a la escuela y no detener sus actividades por la lluvia.

Beneficios sociales:

- Pavimentos que sean seguros al derrape en clima húmedo y en seco.
- Pavimentos que reduzcan accidentes y muertes.
- Apertura al tráfico rápido cuando se reparan.
- Calles no generan lodo o lagunas.
- Pavimentos asfálticos donde se puede demarcan zonas (Minusválidos, ciclismo, paso escolar, etc.).
- Disminuir el polvo de calles no pavimentadas.
- Ahorro de gasolina y llantas.

4. Estado del arte

Para poder reciclar la carpeta asfáltica es necesario conocer los procesos actuales; Existe una variedad y conforme al paso de los años la tecnología ha ido evolucionando.

Existen actualmente dos tecnologías muy utilizadas en esta época y son los tratamientos superficiales de carpetas asfálticas en sitio en frío y en caliente. A continuación, se describirán las tecnologías, sus ventajas, desventajas y los criterios de cuando se debe aplicar cada tecnología y de ello se seleccionó la que tiene mayor impacto en los beneficios económicos que favorezcan al Estado y su sociedad.

4.1 Tratamiento superficial de reciclaje de pavimento asfáltico en frío

En este proceso de reciclaje no se generan altas temperaturas, principalmente consta de fresar o rasgar la superficie dañada del asfalto de hasta 33 centímetros de profundidad sin necesidad de calentar previamente la carpeta asfáltica. (ver figura 13 y 14) en este proceso los materiales recuperados de la carpeta asfáltica deteriorada, no cumplen con las especificaciones del proyecto original; Se fragmenta la carpeta asfáltica y se mezclan en una central de fabricación de material, con el asfalto virgen, se agrega betún nuevo y/o agente rejuvenecedor en las proporciones adecuadas, para producir una nueva mezcla en caliente que cumpla con los requerimientos de calidad, resistencia y durabilidad exigido para el tipo de capa en que será utilizada. (Ibarra, 2003) ; El asfalto dañado que se recupera, conserva todavía parte de sus propiedades, porque solo requiere de 1% a 3% de betún adicional, mientras que un nuevo hormigón asfáltico puede necesitar más del 6% (Quingles, 1997), el uso del 50% de RAP en una mezcla nueva ahorra US\$4.05 por cada tonelada. (Brock, 1997). El principal problema o punto crítico del reciclado en frío se centra en la dificultad de compactar la mezcla durante la obra.

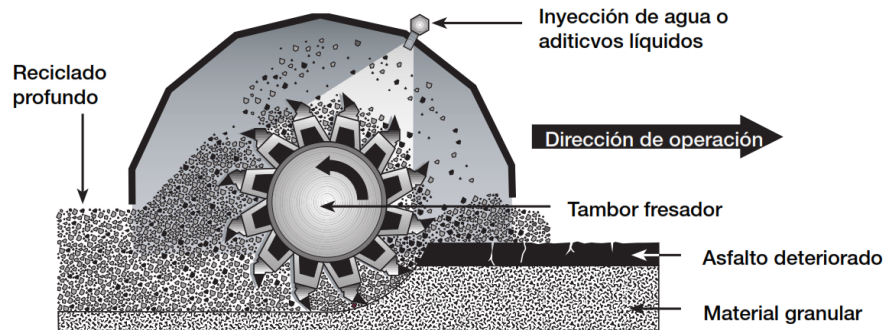


Figura 13. Fresado de pavimento para la remoción de asfalto (Wirtgen, 2004)



Figura 14. Esquema en 3ra dimensión de fresado de pavimento (Wirtgen, 2004)

Este material RAP, es directamente reutilizado y se mezcla con la emulsión; Esta mezcla se realiza sin ningún tratamiento de calor y los grupos de partículas que forman el RAP no se adhieren bien a la emulsión. El resultado es una mezcla de aspecto áspero, obtenido gracias a las múltiples caras de fractura, y a la heterogeneidad que presentan las partículas del RAP, que tiene como principal consecuencia, densidades muy bajas y resistencias también muy bajas debido a la mala compactación. (Moya, 2004, June 28), además al colocar la mezcla en frio, la emulsión tarda en secarse y los proyectos de pavimentación son de tiempos más prolongados, que los de reciclado en caliente. En la figura 15 podemos observar la maquinaria típicamente utilizada para un proceso en frio, la máquina más destacada que define a este proceso es la fresadora barrenadora, esta máquina puede aserrar el asfalto estando frio, esta máquina se destaca por su alta capacidad de poder realizar cortes profundos de hasta 33 centímetros, este tipo de proceso se requiere cuando en definitiva se requiere remover por completo la carpeta asfáltica; Dentro del proceso de esta operación todo lo que la máquina fragmenta, debe ser dirigido a una planta de producción de asfalto, (figura 19) de esta manera, se puede incluir el material recuperado dentro de la mezcla asfáltica virgen, después esta mezcla es llevada de vuelta hasta la máquina pavimentadora, donde la mezcla llega en frio o también en caliente para su utilización ya que es una variante del proceso. En la figura 16, 17, 18 y 20, podemos ver unas imágenes de la máquina antes mencionada en diferentes presentaciones o modelos.



Figura 15. Arreglo común de un proceso de pavimentación en frio

En esencia todas las máquinas fresadoras en sus diferentes variaciones tienen la misma operación, pero varían en capacidades y la modernidad de sus controles eléctrico-electrónico.

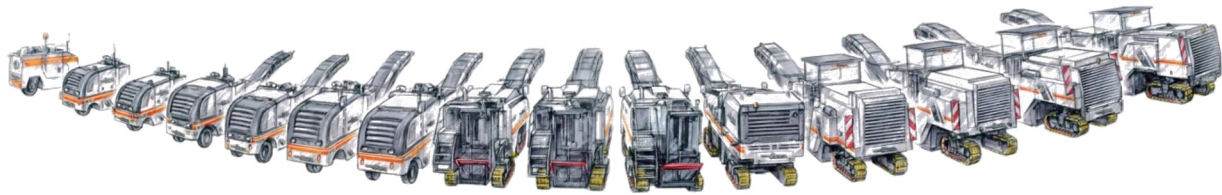


Figura 16. Variaciones de los modelos de fresadora de la marca Wirtgen (Wirtgen, 2018 A)



Figura 17. Fresadora con barredoras en los procesos en frío (Wirtgen, 2018 B)

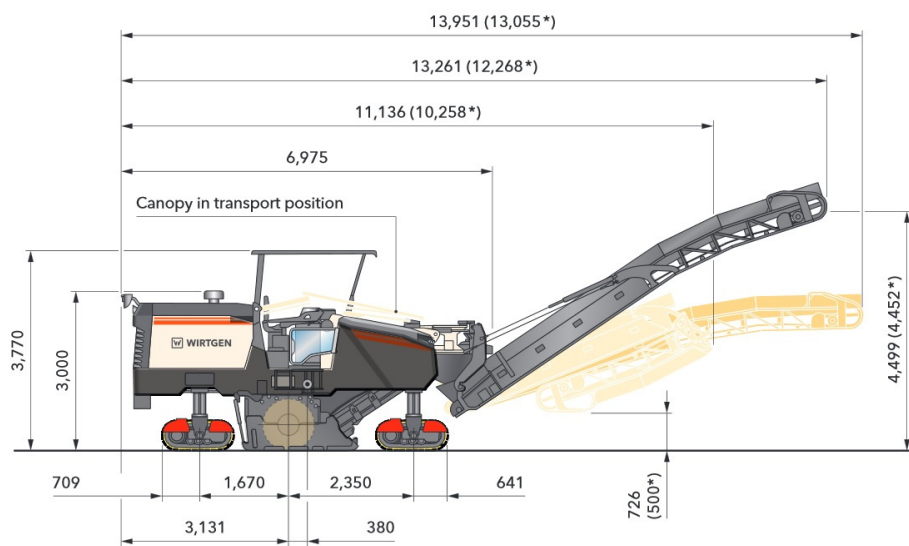


Figura 18. Dimensiones de la máquina fresadora barredora (Wirtgen, 2018 B)



Figura 19. Planta productora de asfalto (Wirtgen, 2018 C)



Figura 20. Fresadora barrenadora marca Caterpillar

Una variante de este proceso, es el diseño de la mezcla asfáltica completamente en frío, es decir aparte de aserrar la carpeta asfáltica sin calentamiento, también se agrega esta mezcla directamente a la máquina pavimentadora, para colocar este material recuperado en la carpeta asfáltica, sin tener que enviar el material directo a la planta de producción de asfalto. En la figura 21 podemos ver la maquinaria utilizada para este proceso. Se utiliza la misma máquina, solo que el diseño de la mezcla asfáltica permite que una vez removida y mezclada por la pavimentadora, sea colocada de inmediato.



Figura 21. Proceso de reciclaje en frío en sitio (Wirtgen, 2017)

Actualmente existe otro proceso más moderno en donde la máquina pavimentadora del proceso anterior es removida y sustituida por una máquina donde se incluye esta operación, esto sin dejar de ser un proceso en frío; La tecnología es de origen alemán, figura 22. Este proceso precede al anteriormente descrito, reduciendo el proceso con un mínimo de maquinaria utilizada. En la figura 23 podemos apreciar el esquema de la maquinaria que normalmente se utiliza en comparación, con esta máquina, que incluye varias de las funciones en estos procesos.



Figura 22. Proceso en frío con la máquina WR4200 de la máquina Wirtgen

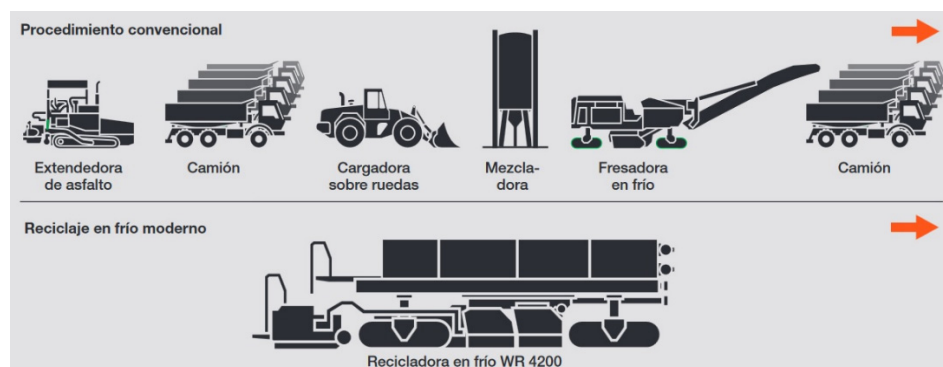


Figura 23. Comparación de maquinaria que se sustituye con la WR4200 (Wirtgen, 2011 D)



Figura 24. Máquina WR 4200 para trabajo en frío (Wirtgen, 2011 D)

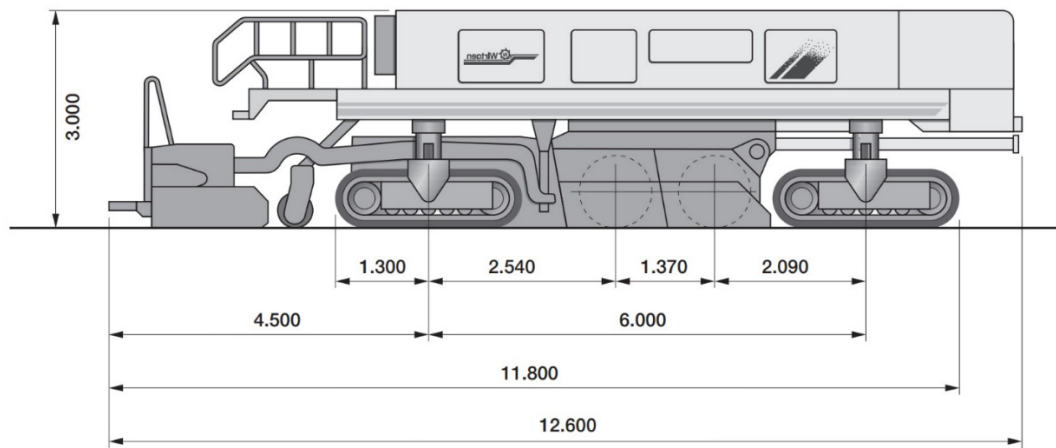


Figura 25. Dimensiones de la WR 4200 (Wirtgen, 2011 D)

Criterios para los procesos de tratamiento de superficies en frío.

Existen muchos criterios, pero entre los más destacados se enlistan los siguientes:

Ventajas

- Cuando una carpeta asfáltica tiene una altura en exceso, debido a trabajos anteriores, puede afectar en los límites de alturas de los puentes y entre más gruesa se va generando la carpeta asfáltica, podemos crear colapsos entre la altura de los camiones con los puentes, en estos casos es necesario remover por completo la capa asfáltica con una máquina fresadora.
- Cuando una calle está muy deteriorada, con baches muy pronunciados, grietas muy abiertas, utilizar esta máquina es la única vía, debido a su capacidad de poder realizar cortes

muy profundos. Aun así, hay ocasiones donde una calle extremadamente dañada, requiere de ser demolida con maquinaria de construcción como un trascabo.

- No se requiere de calor para agregar la mezcla asfáltica de nuevo a la superficie de la calle.

Desventajas

- No hay una compactación muy buena, es decir cuando existe calentamiento en el proceso, los pétreos dentro de la mezcla asfáltica quedan más ligados entre sí, creando una estructura más sólida y de mayor duración y en este proceso en frío no sucede igual.
- Cuando se efectúan cortes es necesario remover el grosor total de la capa superficial, de otra manera se podría generar grietas, y considerando que se debe tener mucha precaución de no generar grietas en las capas más bajas de la estructura de la calle, porque estas grietas en las estructuras más bajas en días posteriores a la obra presentan un efecto y el resultado de esto, terminar reflejándose en la superficie de nuevo.
- Los costos que implican realizar todos los trabajos necesarios como transporte, planta tratadora de asfaltos, etc. Generan elevados presupuestos en comparación con los de tratamiento en caliente que se analizaran posteriormente.
- Las emisiones implicadas en todos sus procesos son más elevadas que los procesos en caliente.

4.2 Tratamiento superficial de reciclaje de pavimento asfáltico en caliente

A diferencia de los procesos en frío, en este tipo de proceso, se requiere de calentar la carpeta asfáltica antes de desprender sus agregados. Al igual que el reciclaje en frío también se utiliza el 100% del material recuperado; Solo que en este tipo de proceso tenemos la ventaja de poder realizar un mantenimiento superficial, sin dañar los pétreos o agregados de la carpeta asfáltica, debido a que el calentamiento de la capa asfáltica permite desprender los agregados en el asfalto con mayor facilidad, incluso no sería necesario aserrar el asfalto con el clásico rodillo de puntas de tungsteno, (figura 26) pudiendo utilizarse unos dedos escarificadores, figura 27.

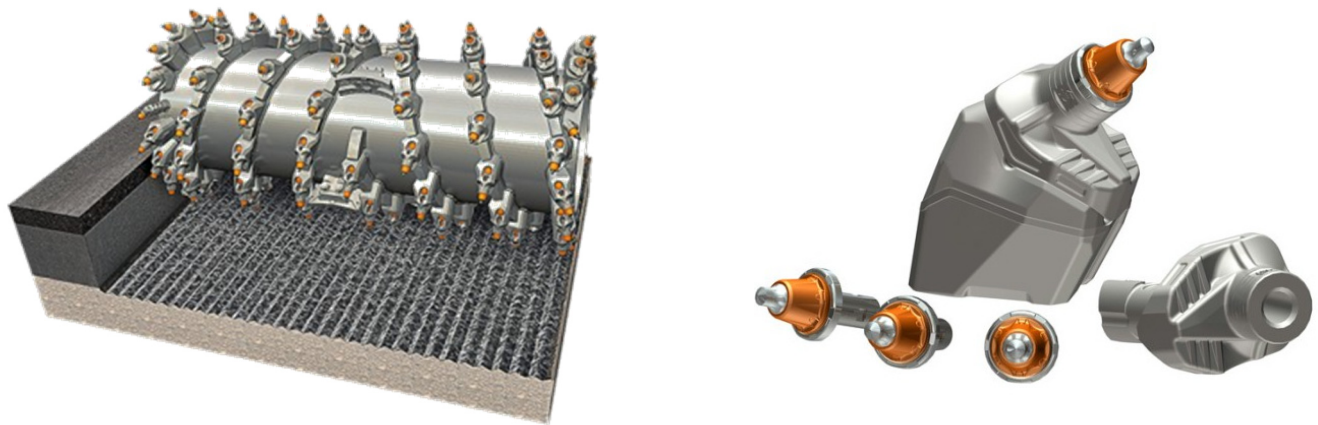


Figura 26. Rodillos con punta de tungsteno utilizados para aserrar el asfalto (Wirtgen, 2018 E)



Figura 27. Dedos escarificadores para rasgar el pavimento asfáltico en un proceso en caliente (BENEDETTI, n.d.)

Los proyectos se realizan más rápido, debido a que la temperatura en caliente esta entre 200 y 330 grados Fahrenheit (95 y 145 grados Celsius) por esto seca más rápido la mezcla de pavimento y se da una mejor unión de sus componentes. (Bolzan, 2011).

Actualmente la tecnología para el reciclaje de pavimento en caliente ha tenido una evolución tecnológica desde los años 30's con el método Marshall y Hveem; En 1984 se desarrolla el método

WASHTO que son un conjunto de normas para realizar las mezclas, en 1987 tenemos el método AAMAS y en 1993 SUPERPAVE. (Padilla, 2004).

La ventaja con este tipo de tratamiento superficial, es que se puede alargar la vida de una carpeta asfáltica, dándole un mantenimiento de conservaciones en el momento adecuado, con una profundidad de 50 milímetros, pero no podemos dejar que la calle se deteriore demasiado, porque una calle muy dañada no podría tener este tipo de mantenimiento. Para esto el Banco mundial tiene un estudio realizado donde afirma que una carpeta asfáltica requiere de un mantenimiento superficial en la 1ra disminución del 40% de su calidad original, una vez pasando este punto, por cada \$1.00 USD no invertido en la primera disminución del 40% de la calidad, costara de \$4.00 a \$5.00 USD, si se espera hasta que el pavimento haya perdido el 80% de su calidad original. Ver figura 28.

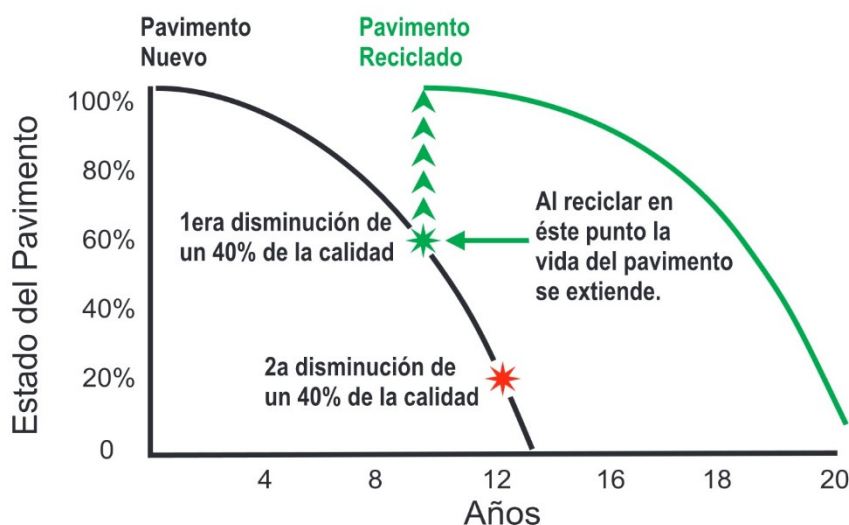


Figura 28. Gráfica de análisis para asistir al mantenimiento de calles en el momento apropiado (Martec , n.d.)

Partiendo desde este criterio, tenemos un punto de referencia muy importante, porque resulta muy económico dar el mantenimiento a una calle cuando es el momento apropiado, ahorrando costos muy significativos y dando una larga vida a la calle.

Se ha demostrado que una obra de mantenimiento de Reciclaje de Asfaltos en Caliente (RAC) tiene un beneficio satisfactorio para la calidad de la calle, dejándola igual o en mejores condiciones que antes de la obra; Esta prueba se llevó a cabo en Canadá y consistió en darle mantenimiento a

un tramo de 17.88 kilómetros de calle, por medio del RAC y después de 5 años se extrajeron muestras asfálticas para verificar su calidad, estas determinaron la calidad de la obra como satisfactoria y determinaron que aún tenía vida determinada para otros 5 o 7 años. (Sharma V., 2015).

Incluso la empresa WIRTGEN con una amplia variedad de máquinas de procesos en frío y con experiencia en obras de reciclaje en frío desde 1980, tiene una variante de máquina para procesos en caliente; Es la máquina RX 4500 la podemos ver en la figura 29. Dentro de la documentación técnica, la empresa afirma que realizar reciclaje de carpeta asfáltica en caliente es el tipo de saneamiento más económico y ecológico para las capas superiores de asfalto siempre y cuando la capacidad del portante de la capa inferior estuviera intacta. (Wirtgen, 2018 F).



Figura 29. Máquina RX 4500 para reciclaje en caliente de la empresa Wirtgen (Wirtgen, 2018 G)

El potencial de ahorro mediante el reciclaje en caliente es impactante. Comparado con los métodos de reciclaje en frío, es posible economizar aproximadamente un 85% del gasto de circulación de camiones, así como cerca de un 70% de material asfáltico nuevo. Un ejemplo típico sería la reparación de una calzada de 4 metros de ancho y 10 kilómetros de longitud, equivalente a 40,000 metros cuadrados. Partiendo de un peso de la capa superior de 100 kg/m^2 , el método convencional requiere de unos 400 viajes en camión: 200 para transportar el material fresado y 200 para acarrear el asfalto nuevo. En el proceso en caliente considerando una adición estándar de unos 30 kg/m^2 , únicamente se requiere un total de 60 camiones cargados de material nuevo, o sea 340 menos que en el procedimiento tradicional. (Wirtgen, 2018 F).

La demanda de energía para el acarreo de materiales de construcción es mínima; no se producen gasto de almacenamiento ni de eliminación de material fresado.

En las tablas 3 y 4 podemos ver una comparación realizada entre los diferentes sistemas de reciclaje antes mencionados y el Reciclaje en caliente en sitio.

	Reciclado en caliente en sitio	Reciclado en frío en sitio + asfalto reciclado en caliente desde la planta	Reciclado en frío + asfalto reciclado y colocado en frío en sitio
Material pétreo existente a ser reciclado	Se mantiene intacto	El pétreo es destruido	El pétreo es destruido
Asfalto aglutinante requerido	Disminuye; debido a que los agregados existentes se mantienen	Aumenta; debido a que los elementos son destruidos en un tamaño más pequeño de partícula	Emulsión de asfalto + Ligante
Diseño de la mezcla	Se mantiene el diseño original	Se tiene que rediseñar	Se tiene que rediseñar
Frecuencia de entrega de camiones	Disminuye; solo se requiere un envío	Aumenta; 2 envíos necesarios	Disminuye; un solo envío
Durabilidad de la superficie de la calle	Buena	Buena	Pobre
Consumo total de Energía	.35	--	1

Tabla 3. Comparación entre el Reciclaje en caliente en sitio y 2 versiones del frío (Hosokawa H. G. A., 2007)

Tipo de obra	Profundidad del corte	Consumo de Energía (MJ/Tonelada)
Agregar una carpeta Asfáltica	50 mm Asfalto virgen	680
Fresar y volver a cubrir con asfalto	40 mm Fresado en frío + 50 mm Mezcla asfáltica	819
Reciclaje de asfalto en caliente	50 mm asfalto recuperado	570

Tabla 4. Consumo de energía entre diferentes métodos (Ronald T., 2008, July 31)

En términos económicos, energéticos y ambientales se puede concluir que el mejor método para dar mantenimiento a las superficies de las carpetas asfálticas, es el método de Reciclaje de Asfaltos en Caliente, **RAC**;

La desventaja es que no se puede realizar un mantenimiento cuando la calle está muy dañada. Una calle es seleccionada cuanto tiene cierto nivel de daños, algunos de ellos serían baches de baja profundidad, agrietamiento en segmento y grietas longitudinales. Algunas de estas fallas las podemos ver en la figura 30. Una vez seleccionada una calle con este tipo de problemas, se deben realizar otro tipo de pruebas, como son la prueba de perfil de la superficie, analizar si la sub base

tiene fallas; Grietas muy gruesas; Bajo contenido de agregados bituminosos, aunque en algunos casos este tipo de fallas pueden ser corregidas con procesos previo, para después proceder al proceso de tratamiento de reciclaje en caliente.



Figura 30. Baches baja profundidad, agrietamiento segmentado y grietas longitudinales

4.3 Características de las tecnológicas modernas

Se realizó una investigación de las tecnologías existente para observar su funcionalidad y capacidades, con el fin de realizar una lista de ventajas y desventajas, así como retomar cualquier concepto e ideas que sirvan de apoyo para desarrollar el mecanismo que se va a proponer en esta tesis.

Existen 5 tecnologías, sus países de origen son Canadá, China, Japón y Alemania sin ningún orden específico; Actualmente son las máquinas más utilizadas en la obra de mantenimiento a superficies de RAC. En la figura 31 podemos ver 4 procesos que son utilizados comúnmente por todas las tecnologías. Al final de cada tecnología utilizan una pavimentadora convencional, que es la encargada de verter tanto el pavimento asfáltico recuperado y el adicional; Un compactador de rodillos que comprime el material asfáltico y un compactador de neumáticos; Además el tractor para abastecer material asfáltico a los respectivos equipos que en descripciones posteriores serán mencionados; Estos equipos serán mostrados en los procesos de cada empresa, pero no serán descritos para efectos prácticos de la investigación. En la figura 32 podemos ver una comparación de todas las tecnologías que serán descritas y el orden en que acomodan sus equipos para generar una obra de mantenimiento RAC.



Figura 31. Equipo comúnmente utilizado en todos los procesos

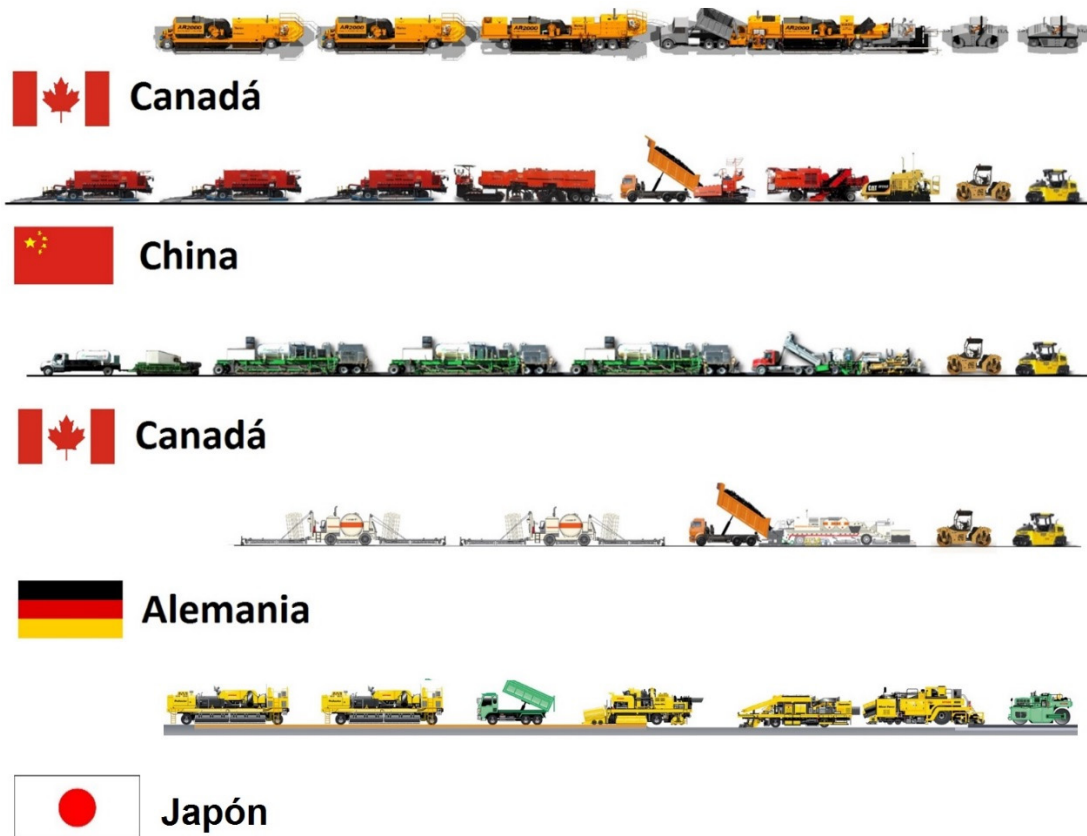


Figura 32. Procesos actualmente empleados en obra de mantenimiento a calles

A continuación, una descripción para cada una de las tecnologías contemplando sus características, objetivos y operación durante el proceso de mantenimiento de RAC.

4.3.1 Tecnología desarrollada por Martec



Martec es una empresa donde sus oficinas principales están en West Pender Vancouver, British Columbia, Canadá, es una empresa dedicada a las obras de mantenimiento de RAC, así mismo, es propietaria de la patente de su propia maquinaria para este servicio, han tenido la oportunidad de ofrecer sus servicios de mantenimiento a otros países como México, Costa Rica, Estados Unidos, Japón, Italia, India y China. En 2009 recibieron el premio en la categoría de Reciclaje en sitio, por parte de la Asociación de Recuperación y Reciclaje de Asfaltos, por la conclusión a una de las obras más grandes en recuperación de asfaltos del momento. Actualmente tiene 23 años de experiencia en los servicios de mantenimiento de calles.

Recicladora AR2000

El equipo utilizado es un conjunto de equipos que trabajan de manera conjunta, se utilizan 2 máquinas pre calentadoras idénticas, después le sigue una máquina que calienta y fragmenta, posterior se utiliza una máquina que calienta, seca y mezcla el asfalto recuperado. En la figura 33 podemos ver el equipo durante un servicio. Actualmente esta máquina es de tercera generación, es decir es la versión 3 de otros modelos que han ido evolucionando.



Figura 33. AR2000 durante una obra de mantenimiento (Martec, 2010)

Descripción del proceso a detalle

En la siguiente figura 34 podemos ver el arreglo que utiliza Martec para poder desarrollar los mantenimientos de RAC.



Figura 34. Máquinas utilizadas por Martec para el mantenimiento del RAC (Martec, 2018)

Lo que destaca en este proceso, que no tienen los demás, es el sistema de calentamiento patentado por ellos (US4561800,1985 en la tabla 5 podemos analizar su eficiencia) que consiste en generar el calentamiento de la carpeta asfáltica a través del flujo del aire, previamente calentado con un infrarrojo de bajo nivel. El aire es calentado hasta cerca de los 700°C en una cámara de combustión de diésel, figura 35, el aire es soplado sobre la superficie del asfalto a través de muchos orificios que tiene la cámara en la parte inferior hacia la calle, figura 36, el aire a su vez es re direccionado de vuelta a la cámara de combustión para ser calentado de nuevo y reducir las pérdidas de temperatura en el aire, este sistema está incorporado en todas sus máquinas.

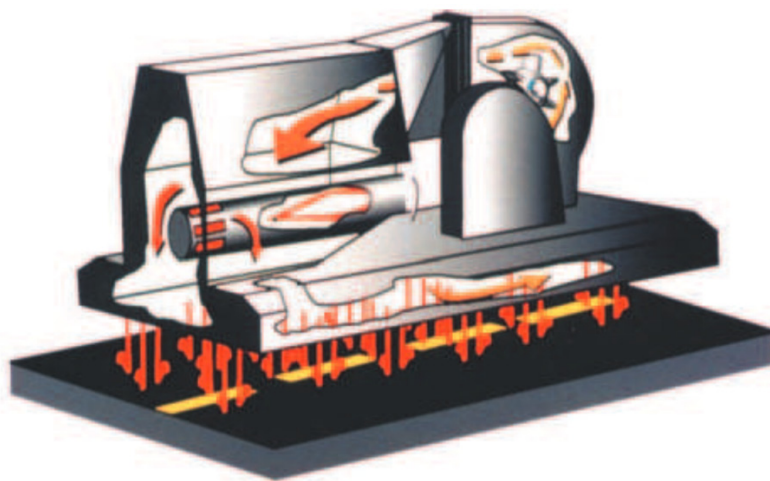


Figura 35. Cámara de combustión de Martec (Martec, 2018)



Figura 36. Vista inferior de la cámara de calentamiento de la máquina AR2000 (Martec, 2018)

Contaminante	Unidad	MARTEC AR2000	Sistemas con Infrarrojos	Emisiones planta de asfalto (1990)
CO ₂	(Kg/ton)	0.0085	0.29	0.019
NO _x	(Kg/ton)	0.0014	0.015	0.018
SO _x	(Kg/ton)	0.0017	---	0.146
Particular	(Kg/ton)	0.0009	0.002	---
Total Hidrocarbonos	(Kg/ton)	0.0007	0.013	0.014

Tabla 5. Comparación de emisiones entre Martec y los sistemas infrarrojos (Joharifard, 2005)

Pre calentador



Figura 37. Diseño del pre calentador del AR2000 (Martec, 2018)

La intención de tener 2 pre calentadores en fila durante su proceso, es poder calentar la carpeta asfáltica a un nivel bajo de calentamiento por infrarrojo, con el propósito de ablandar el material;

La pérdida de calor es mínima en el proceso, debido a que el aire recircula a la cámara de combustión, en vez de fugarse al exterior; La ventaja es que el aire en la cámara de combustión, contiene bajo nivel de oxígeno, logrando que el asfalto reduzca su nivel de oxidación durante el calentamiento, solo se permite un 10% de entrada de aire del exterior.

Un sistema computarizado permite que el operador controle la flama en la combustión, para poder mantener la temperatura deseada. En la figura 37 y 38 podemos ver el diseño de esta máquina.



Figura 38. Pre calentador AR2000 en obra

Pre calentador/fresadora



Figura 39. Pre calentador/fresadora AR2000 (Martec, 2018)

La intención de esta máquina es calentar como parte de la tercera etapa de calentamiento, esta provista con la misma cámara de combustión de los pre calentadores; Posterior en su mismo diseño está equipado con un rodillo fresador, utilizado para rasgar el asfalto, estos rodillos pueden ser

abiertos a un ancho de 3.3 a 3.9 metros, (Hosokawa H. G. A., 2007) el diseño está preparado para rasgar de 0 a 50 milímetros de profundidad, las puntas de la fresadora son de tungsteno y pueden ser intercambiables para su remplazo inmediato. ver figura 40. El sistema de manejo tanto de esta unidad como la de todos sus equipos es hidráulico. En esta máquina se colocaron unos tanques para los aditivos y el rejuvenecedor, a través de una computadora se controla la cantidad de aditivo y rejuvenecedor aplicado a las mezclas, contiene un tanque de propano para controlar la viscosidad de los agregados. El rejuvenecedor es aplicado al bulto acumulado de asfalto rasgado por el equipo. La máquina contiene un motor Caterpillar de 300 kW y todo el control está diseñado a 24 VDC.

En la figura 39, 40 y 41 podemos ver el diseño de esta máquina y en operación de mantenimiento a una obra de RAC.



Figura 40. Rodillos del pre calentador/fresador AR2000



Figura 41. Pre calentador/fresadora AR2000

Post Calentador/Secadora/Mezcladora



Figura 42. Post calentador/Secadora/Mezcladora AR2000 (Martec, 2018)

Esta máquina tiene la función de recibir el material recuperado por la parte de abajo, recogiendo el bulto formado en la operación anterior, ver figura 44, además en la parte frontal está provisto de un contenedor para poder recibir material virgen, ver figura 42, en un punto la máquina mezcla ambos materiales tanto el virgen como el recuperado, esta mezcla es controlada por un dispositivo electrónico y monitoreado por el operador; Este contenedor puede ser removido para propósitos de transportar la máquina a su sitio de operación.

Además, contiene el mismo sistema de calentamiento que las máquinas anteriores, con el propósito de calentar la mezcla a la temperatura necesaria.

Contiene 2 sistemas de gusanos, unos frontales y unos en la parte trasera, la función de los frontales es esparcir el bulto del asfalto recuperado de la anterior operación para que la plancha de aire caliente seque la humedad del asfalto y eleve su temperatura, en el caso de los gusanos traseros se encargan de volverlo a un bulto para que este pase a un transportador. Ver figura 43. Este lleva el material recuperado a un mezclador para revolverlo con el material virgen, su velocidad puede ser ajustada. Este mezclador tiene la capacidad para procesar 300 toneladas por hora, mezcla los materiales entre 15 a 30 segundos.

Todo el sistema de movimiento es hidráulico, conectados a un motor Caterpillar de 246 kW todo el control eléctrico es operado a 24VDC.



Figura 43. Gusanos y transportador de AR2000 (Martec, 2018)



Figura 44. Máquina recogiendo el bulto de asfalto recuperado (Martec, 2018)

La empresa afirma que su tren de maquinaria puede avanzar a un ritmo de 3 a 6 m/min, aunque la velocidad de operación depende de muchos factores, puede variar según la temperatura ambiental, la humedad del asfalto, la profundidad de corte requerido, logística para proveer el asfalto nuevo que se requiere agregarse al proceso del reciclado, obstáculos de acero, como alcantarillas, tráfico vehicular (Stephen Lee T. S., 1999, November 12-13). En la tabla 6, podemos ver la velocidad que se tuvo para una obra realizada en Italia en diferentes días, teniendo un promedio de velocidad de 2.7 m/min y en el caso de la India en una obra en el año 2007 su velocidad promedio fue de 4.22 m/min, en la figura 45 lo podemos observar.

Día	Longitud reciclada	Promedio de velocidad de trabajo (mts/min)
Agosto 27, 2004	900	2.6
Agosto 30, 2004	525	2.3
Agosto 31, 2004	880	2.6
Septiembre 1, 2004	545	2.9
Septiembre 2, 2004	750	2.7
Septiembre 3, 2004	1220	3.1
Septiembre 4, 2004	420	2.6

Tabla 6. Velocidad de operación de AR2000 en una obra en Italia (Hosokawa H. G. A., 2005)

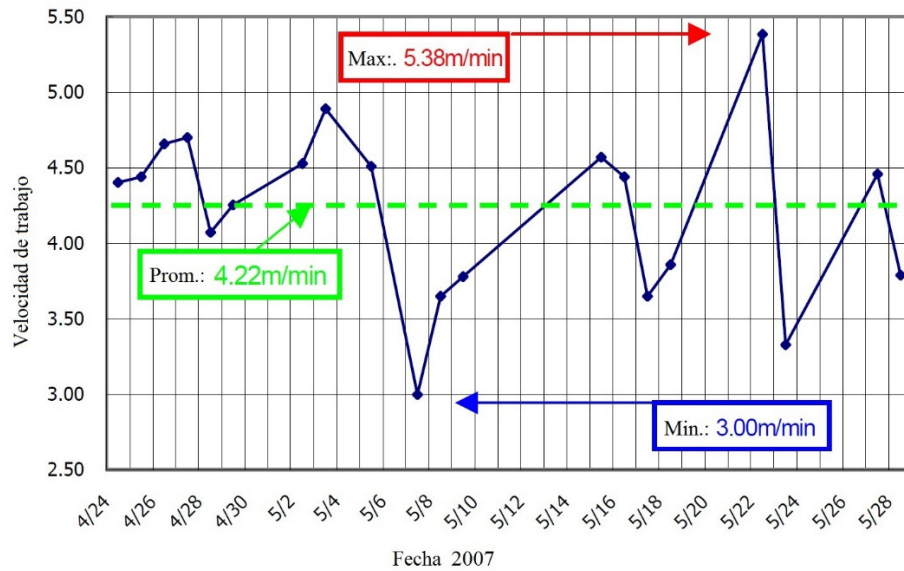


Figura 45. Velocidad promedio del AR2000 en un proyecto en la India (Hosokawa H. G. A., 2005)

Un parámetro importante para asegurar la compactación del asfalto es el control de la temperatura en su proceso, a esta máquina les agregaron sensores de radiación de temperatura. La máquina tuvo una obra en Italia, India, China y su temperatura a lo largo del tren fue documentada para asegurar la calidad del proceso, este dato los podemos analizar en la figura 46.

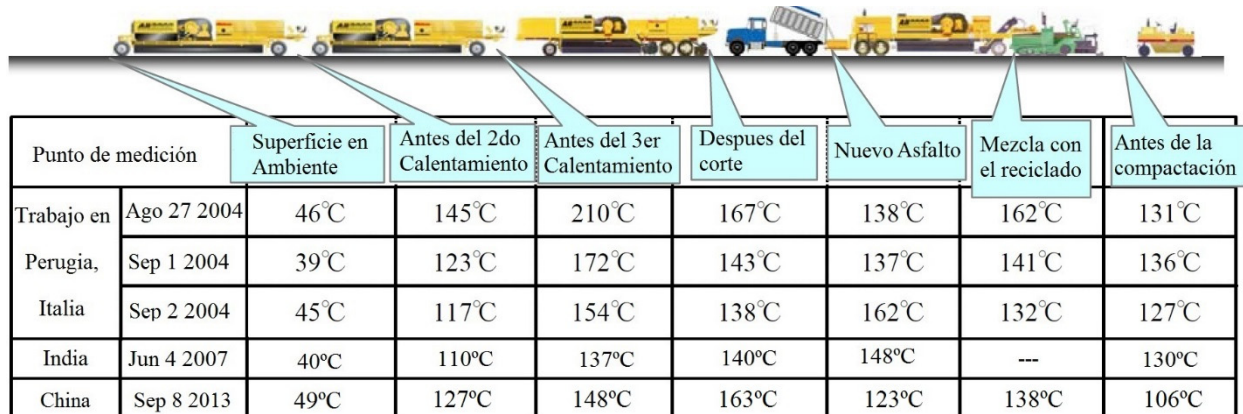


Figura 46. Medición de temperaturas en diferentes puntos del proceso (Hosokawa H. G. A., 2005), (Hosokawa H. G. A., 2007), (Xiaoling Zou, 2014, July)

Para transportar el AR2000 tiene ciertas adaptaciones y mecanismos, que ayudan a compactar las dimensiones de la máquina, en la figura 47 podemos ver esta compactación.



Figura 47. Compactación del AR2000 para ser transportado a otro sitio

Las máquinas del proceso que genera el AR2000, desarrollan un trabajo comprobado, que las calidades de sus proyectos han pasado numerosas pruebas de calidad, como la prueba Marshall para determinar la composición final del material asfáltico recuperado, verificación de los grados de compactación, evaluaciones de la graduación del pavimento para determinar la distribución del tamaño de los agregados en el asfalto, entre otras.

Ventajas

- Al tener un sistema de calentamiento por medio de una flama que calienta un flujo de aire inducido, no provoca que el asfalto sea oxidado a una temperatura mayor a los 200°C y la generación de humos es mínima.
- La generación de contaminación con respecto a los sistemas de calentamiento a través de infrarrojos es menor.
- El corte se realiza en una sola operación a una profundidad de 0 a 50mm.
- El costo de operación de los calentadores por medio de diésel es menor que los infrarrojos que usan gas LP, aunque este parámetro, está variando constantemente, según el precio de ambos recursos.
- Al no tener tanques de gas LP como los de sistema infrarrojo son más seguros.

- Al tener 3 máquinas pre calentadoras a baja temperatura en comparación con los infrarrojos. Se pueden realizar trabajos en bajas temperaturas ambientales, Martec desarrollo una obra en Ottawa a 6°C con vientos ligeros. (Stephen Lee R. T., 1998, November).

Desventajas

- El clima es una condición que debe ser planeado para este tipo de proceso, porque a bajas temperaturas y corrientes de aire, se desfavorece el calentamiento del asfalto, aunque puede ser compensado bajando la velocidad de las máquinas, pero al mismo tiempo empieza a subir el gasto del combustible diésel, utilizado por las máquinas.
- Existen ocasiones donde se requiere reciclar profundidades mayores a los 50 mm, para este requerimiento, sería necesario que el AR2000 coloque otro tren de máquinas; El problema es que el tren completo del conjunto de esta maquinaria es de 84 metros, este tendría que crecer el doble y el costo para esto sería elevado.

En un evento que tuvo lugar en la ciudad de Tijuana (Ver Anexo 1), se visitó a una compañía que realiza obras de mantenimiento RAC con las máquinas AR2000; En diciembre del 2016, se tuvo una entrevista con el supervisor de operación de las máquinas y nos confirmó que han tenido la necesidad de reciclar a una profundidad de 70 milímetros, pero la máquina tiene problemas de capacidades, porque está diseñada para procesar un volumen programado a 50 milímetros de profundidad, por esta razón tienen que dejar que las máquinas mantengan un ritmo diferente de velocidad para poder compensar este ajuste de volumen que no está considerado en el diseño de las máquinas y esto es debido a que la transferencia de calor se dificulta a mayor profundidad. Ver gráfica de comportamiento según investigación (Ronald Terrel, 1997, March) en figura 48.

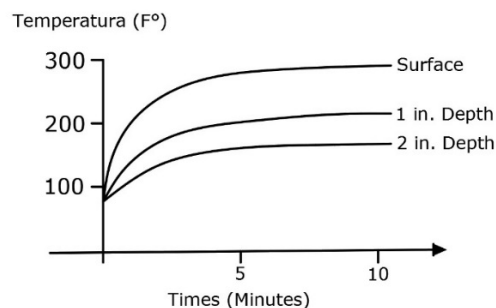


Figura 48. Gráfica del comportamiento la transferencia de calor a diferentes profundidades

En las normas del departamento de transporte e infraestructura de Canadá, no permite que las obras realicen cortes mayores a los 50 milímetros en una sola operación, por riesgo de fracturar la estructura de las calles. Han existido avances para esta tecnología en varios países, pero se considera que Canadá, es la zona donde surgieron grandes avances para esta tecnología. (Ronald T., 2008, July 31).

No basta solo el diseño de una buena máquina, también deben considerarse todos los factores que involucran para realizar una buena obra, en el capítulo 6, se enlistan estas consideraciones que se han hecho parte de las buenas prácticas para este tipo de obra; Aunque AR2000 es una buena tecnología, sino consideramos estos factores podría llegarse al fracaso; Así como ocurrió en Mexicali, en el 2008, donde se contrató por parte del gobierno los servicios de esta máquina catalogada como la seleccionada por ser la más avanzada en el mundo. Al final el resultado de la obra fue un fracaso, solo se pudo cumplir con el 40% de la obra, y la justificación por parte de las autoridades fue el resultado adverso del clima frío, tramos de calles que no contaban con el espesor requerido para el trabajo efectivo de esta máquina. El resultado del trabajo fue el desprendimiento de asfalto de las calles y desniveles. (Rovirosa, 2009, Mayo). Hasta el momento no se ha vuelto a trabajar con esta maquinaria cuyo dueño la empresa Ecopavements está desarrollando trabajos en Tijuana. Y esto no se debió al mal diseño de la máquina, sino a la falta de análisis previos, que son necesarios para evaluar las condiciones de la calle, que va a ser sujeta al mantenimiento de RAC.

El gobierno de California, EUA, CALTRAN realizó un proyecto con la maquinaria AR2000 en 2010 y realizaron un reporte de los resultados obtenidos por estas máquinas, el documento describe lo siguiente: (Moussavi, 2011, August 4).

- Debido a la baja temperatura se tuvo un ritmo de velocidad bajo de 1.5 mts/min.
- La temperatura del agente rejuvenecedor era insuficiente.
- Se tuvieron dificultades con la bomba que suministra los agentes de rejuvenecimiento a la fresadora, se requería estar realizando frecuentes ajustes al mecanismo.
- Los pre calentadores se necesitaban estar ajustando en ocasiones muy frecuentes, hasta alcanzar la temperatura deseada.
- Frecuentes problemas con la máquina de mezclado de asfalto.

- La temperatura final, detrás del pavimentador estaba por debajo de lo deseable.
- La superficie de la carpeta asfáltica no era deseable, debido a que la falta de temperatura no permitía un buen resultado sobre la calidad de la carpeta asfáltica.
- El aporte de la emulsión y el agente rejuvenecedor era excesivo.
- En general la máquina le tomaba mucho tiempo para realizar el trabajo, que las máquinas convencionales, el tamaño de la maquinaria era excesivo.
- Las máquinas requieren más espacio de estacionamiento que las máquinas convencionales.
- El tiempo para movilizar el equipo de obra en obra es considerable.
- Debido a estos problemas solo se les dio tratamiento a 6 carriles de los 20 que se tenían planeado.

Es difícil saber si la tecnología de calentamiento que tiene Martec puede ser calificada como la mejor, comparada con la tecnología de calentamiento por medio de infrarrojos.

Los sistemas de calentamiento por infrarrojo, se ven beneficiados por la capacidad de generar mayor calor para compensar la baja temperatura del asfalto, en una baja temperatura ambiental; Existen proyectos donde se requiere realizar la obra a temperaturas bajo 0°C; Además se puede controlar la intensidad de calor, en los proyectos donde la temperatura es cálida; Se han realizado estudios donde se comparan los resultados de otros sistemas de RAC con infrarrojos, por medio de Gas LP y el utilizado por el AR2000 y los resultados en la calidad de la carpeta asfáltica al final de la obra para ambas tecnológicas, son satisfactorias; Los infrarrojos aunque producen una temperatura muy elevada en ambientes cálidos y ocasiona la oxidación del asfalto, son compensadas con rejuvenecedores. (Ronald Terrel, 1997, March).

Debido a la gran variación de condiciones ambientales, tráfico, estándares de diseño de estructuras y materiales, estado del deterioro y otros factores, es difícil determinar una solución universal, de RAC que pueda ser implementada en cualquier parte del mundo. (Xiaoling Zou, 2014, July).

4.3.2 Tecnología desarrollada por Freetech



Con el fin de aprovechar los avances tecnológicos que realizan otras naciones tenemos el ejemplo de la tecnología desarrollada en China. Este país se ha caracterizado por su despegue tecnológico, aprovechando cualquier oportunidad en la negociación para realizar transferencia de tecnología hacia su país. Por ejemplo: China deseaba realizar la compra de cientos de aeronaves A320 y negocio con Airbus, con la condición de que los aviones comprados se ensamblaran en Tianjin. (Zuckerman, 2017, May 27). Tiempo después, el 5 de mayo de 2017, el avión de tecnología completamente chino, el COMAC C919 realiza su primer vuelo. (Agencia EFE, 2017, Nov 10).

Lo mismo ocurrió en el área de reciclaje de asfaltos; En 1989 se completó la primera carretera en Shanghái, desde entonces China ha tenido un despegue en el crecimiento de sus carreteras, para el final del 2013 se han construido 104,500km de carreteras y actualmente el mantenimiento a carreteras está en una situación urgente. Diferentes procesos fueron empleados durante varios años por el gobierno chino para probar los diferentes sistemas de mantenimiento de las calles de China. Estos vieron que el mejor método para el reciclaje de asfaltos en términos económico y ambientales era el RAC; Empresas extranjeras como Martec con su máquina AR2000 (Joharifard, 2005), la empresa Wirtgen con su máquina Remixer 4500 (Wirtgen, 2016 D) estuvieron realizando proyectos de obra en China. Mientras tanto en 2012 el ministro de transporte de China, realizo un anuncio para aumentar el uso del material reciclado para las calles. ver figura 49.

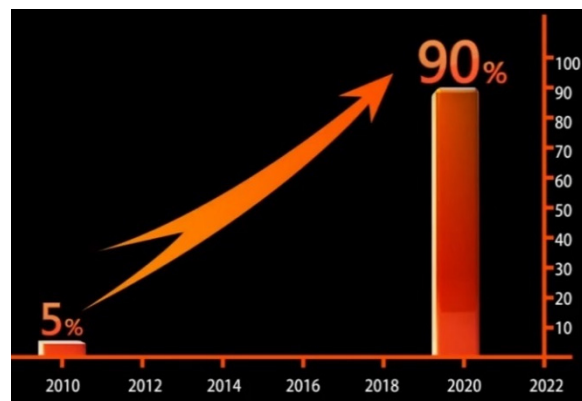


Figura 49. Porcentaje de material reciclado para las obras en china (Freetech, 2014)

En China existe una empresa de capital privado chino, con el nombre de Freetech, en 1997 desarrollan su primer equipo para el mantenimiento superficial de RAC e inician sus operaciones de mantenimiento a calles en 2001; En el 2009 el ministro de transporte de China, certifica a la empresa, reconociendo su aplicación de estándares internacionales durante sus obras.

El departamento de investigación de Freetech se unió a una de las mejores universidades de China en Tianjin y en el 2009 Freetech invirtió en un centro de investigación para el RAC, a partir de esto, la empresa enfoca sus esfuerzos en 3 objetivos principales: Servicio de mantenimiento a calles, desarrollo e investigación y fabricación de equipos. (Freetech Recycling, 2017, September 4).

Todas las necesidades tecnológicas que iban surgiendo durante el desarrollo de las obras, eran comunicados al departamento de desarrollo e investigación y estos a su vez daban respuestas al departamento de diseño de equipo y manufactura, para mejorar los equipos o desarrollar equipos nuevos. En el 2012 la comisión de reformas y desarrollo de China en Jiangsu junto con el departamento de transporte de Jiangsu, apoyaron a Freetech para establecer un laboratorio de ingeniería para desarrollo de equipos enfocados para el mantenimiento de carreteras.

Para el 2013 la empresa vendió acciones al público (BEA securities, 2013, June 14) y construyen una segunda nave para la fabricación de equipos, iniciando la venta de sus equipos en todo China. Del 2009 al 2018 esta empresa ha acumulado más de 200 patentes y ha iniciado la venta de su equipo a otros países en Asia. En la figura 50 podemos ver el equipo utilizado por Freetech.



Figura 50. Equipo para el mantenimiento superficial de asfaltos en caliente de origen chino (Freetech, 2014)

Pre Calentador HM16



Figura 51. Pre Calentador HM16 de Freetech (Freetech, 2014)

- Esta máquina se utiliza para precalentar el pavimento entre los 160°C a 180°C, seguida de otras 2 más, durante el proceso; su tracción móvil es hidráulica.
- Tiene 2 camas de calentamiento de infrarrojos y cada cama está protegida con una cobertura para evitar las pérdidas de calor y lograr una mejor penetración del calor en el asfalto.
- Las extensiones de sus camas son de 4.5 metros y la cama frontal puede girar para realizar curvas; La intensidad del calor puede controlarse.

La estrategia de esta maquinaria es calentar la superficie del asfalto a baja intensidad, pero con 3 pre calentadoras, dando tiempo a que el calor se transfiera a 50 milímetros, a una temperatura de 120°C. La máquina tiene la facilidad de replegar sus camas de calentamiento para poder ser transportado, en la figura 52, podemos ver cómo es transportado por medio de un tráiler y cuando este llega a su destino empieza a desplegar sus camas de calentamiento. Figura 53



Figura 52. Transporte de HM16 (Fretech, 2014)



Figura 53. Máquina HM16 paneles desplegables (Freotech, 2014)



Figura 54. Máquina TR168 tractor oruga (Freotech, 2014)

Después de los pre calentadores tenemos una tractor oruga. Que podemos ver en la figura 54. Esta es la tracción para la máquina RM6800 (figura 55), su fuerza lo genera un motor diesel, con la capacidad de poder realizar obras sobre pendientes.

Máquina escarificadora RM6800



Figura 55. RM6800 máquina escarificadora de Freetech (Freetech, 2014)

La máquina RM6800 vista en la figura 55 esta provista de un calentador pequeño; Seguido de este, están dispuestos unos escarificadores, que son accionados por unos pistones neumáticos que controlan la profundidad del corte, figura 58, después le siguen unos gusanos que acumulan el asfalto desprendido y lo acumulan en forma de trapezoide; Estos detalles se aprecian mejor en la figura 56. Entre los escarificadores y los gusanos existen unos aspersores que aportan el bitumen necesario para rejuvenecer el asfalto recuperado, figura 57, al final está dispuesto un calentador para dar una figura uniforme al bulto, además de volverlo a calentarlo. Este equipamiento lo podemos ver al final del RM6800 conectado en la parte inferior-trasera de la máquina, lo podemos ver pintado de color blanco en la figura 55 y 59.

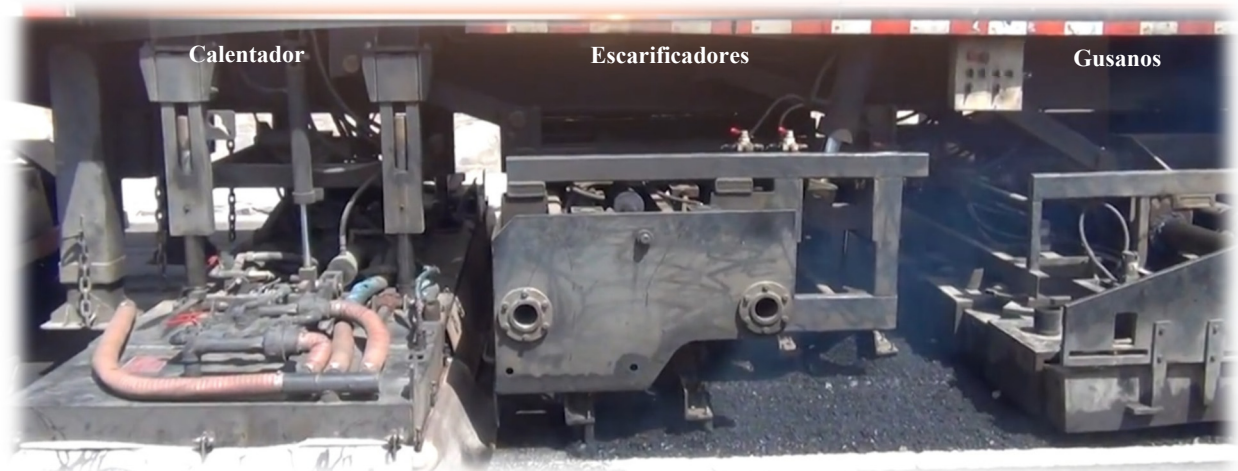


Figura 56. Detalles del RM680, Calentador, escarificadores y gusanos, de izq. a derecha (Freetech, 2014)

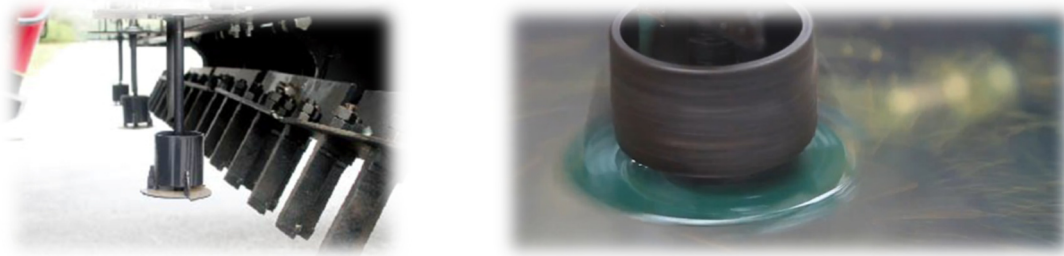


Figura 57. Aspersores del RM680 de Freetech (Freetech, 2014)



Figura 58. Escarificadores del RM680 (Freetech, 2014)

Los aspersores de bitumen son controlados automáticamente para proveer el porcentaje calculado para la mezcla asfáltica, además están en función de la velocidad de la máquina. La máquina tiene un sistema de nivelación de altura automática para asegurar el corte a la misma profundidad.



Figura 59. Formador del bulto y calentador a la salida del RM680 (Freetech, 2014)

Agregado de Asfalto.



Figura 60. TR165 Oruga tractor para agregar mezcla asfáltica (Freemove, 2014)

Después tenemos al TR165 de la figura 60, que recibe material asfáltico que se desea agregar a la obra, tiene unas tolvas que reciben la nueva mezcla asfáltica; Esta tolva tiene la capacidad de abrir y cerrar su apertura, para evitar acumulamientos. Figura 61.



Figura 61. Tolva móvil del TR165, para agregar mezcla asfáltica a la obra (Freemove, 2014)

El TR165 agrega la nueva mezcla asfáltica al bulto acumulado por la parte de abajo, como se aprecia en la figura 62. Existen 2 versiones, esta oruga TR165 puede acoplarse al EM6500 como se ve en la figura 62 o puede estar separado; En esta versión separada el EM6500 tiene su propio sistema motorizado como se aprecia en la figura 63.



Figura 62. TR165 Tractor oruga para aportar una nueva mezcla asfáltica al bulto recuperado (Fretech, 2014)

Mezclador de asfalto



Figura 63. EM6500 Mezclador con tracción de Fretech (Fretech, 2014)

El EM6500 tiene la función de recoger el bulto del asfalto recuperado junto con el aporte de asfalto nuevo que hizo previamente el TR165 y los mezcla en un compartimiento que tiene disponible. Tiene un sistema de tracción a través de un hidráulico. Los detalles de estos mecanismos los podemos ver en la figura 64. Una vez que recoge el bulto, tiene una cama corta de calentamiento de baja intensidad. Para asegurarse que la temperatura este correcta para que ligue la nueva carpeta asfáltica que provee la máquina pavimentadora.



Figura 64. EM6500 Elevador y mezclador de Freetech (Freetech, 2014)

Todo el tren de freetech tiene una velocidad variable que va de los 4 a 6 m/min. (Highways Today, 2017). Como se explicó anteriormente dependiendo de las condiciones de cada proyecto, la velocidad puede variar. Freetech fue asignado para realizar un proyecto para la carretera Qixia in Nanjing donde la temperatura estaba a 0°C y fuertes vientos, otro proyecto en Lianyungang a una temperatura de -10°C. Los proyectos fueron evaluados después de la obra, con pruebas de densidad de compactación, valores de deflexión, entre otros más; Todas las pruebas fueron aprobadas. Ver figura 65. (Highways Today, 2017).

Fretech ha alcanzado una aceptación en los parámetros de su país; Oficialmente se publicó por la prensa China una monografía sobre “investigación y aplicación de la tecnología para el RAC” escrito por el Sr. Sze Wai Pan, presidente y accionista mayoritario de la empresa, fue editado por autoridades de la industria y en 2016 fue el mejor recomendado de 10 libros para el premio en la categoría Ciencia y Tecnología del transporte. (Business Wire, 2016, November 21).

Ha generado tanto material de investigación y desarrollo, que abrió una escuela de especialización en enero del 2014 donde cuentan con 30 expertos en el tema. Enfocados en la investigación de ciencia y tecnología para los materiales asfálticos y equipos para el reciclaje. Además de ofrecer maestrías especializadas en asfaltos. (Fretech, 2014).

En anexo 2 se observan los detalles del mecanismo de las máquinas.



Figura 65. Freetech realizando una obra bajo temperaturas muy frías con éxito (Highways Today, 2017)

Ventajas

- El sistema infrarrojo de Freetech permite realizar trabajos en climas de baja temperatura y en una obra con clima cálido, pueden bajar la temperatura; Parte de su estrategia es tener baja intensidad de calor con 3 pre calentadores, para trasferir 120°C a una profundidad de 50 milímetros, cuidando de que la superficie no eleve su temperatura por encima de los 180°C.
- El sistema de corte es por medio de dedos escarificadores, lo cual hace suponer que es un sistema anticuado, pero realizando investigaciones también se encontró que en Japón existe un sistema de reciclaje similar, donde se realizó un estudio para comparar el sistema HITO japonés contra el de AR2000, el sistema japonés HITO, utiliza dedos escarificadores y con el mismo sistema de calentamiento que el AR2000, por medio de una flama que calienta una corriente de aire. Lo podemos ver en la figura 66 y su sistema completo del tren de máquinas lo podemos ver en la figura 67.

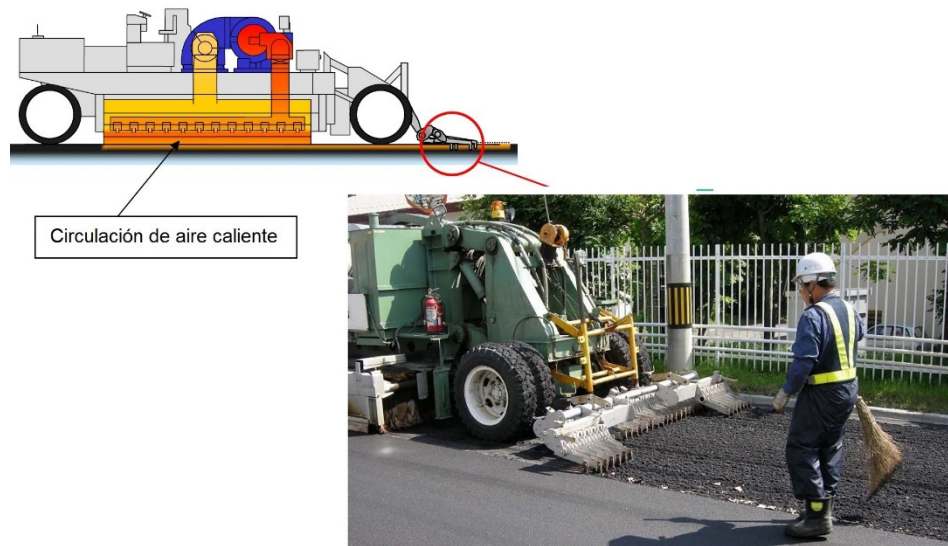


Figura 66. Máquina japonesa HITO (Green ARM, 2002)

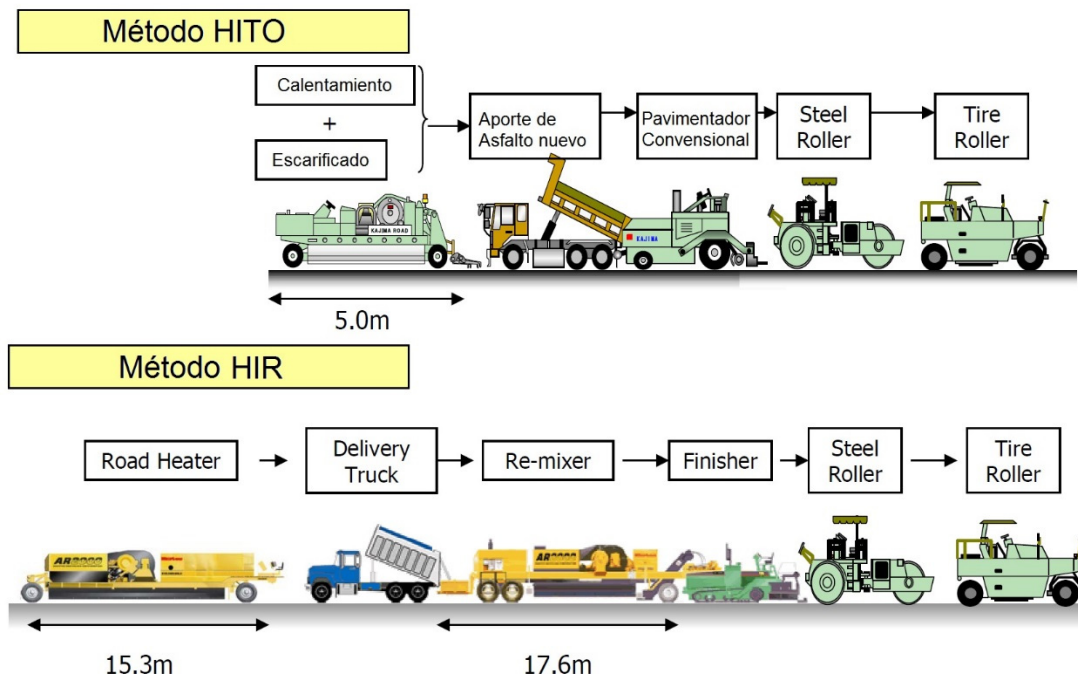


Figura 67. Comparación del Método HITO japonés y HIR de Martec (Green ARM, 2015)

El reporte muestra algunos resultados comparando el sistema HITO que es un sistema donde la estrategia de mantenimiento es escarificar 20 milímetros y colocar una capa de

otros 20 milímetros de nueva mezcla asfáltica contra el de Martec que en este caso en particular fresaba 30 milímetros y agregaba 20 milímetros de nueva mezcla asfáltica.

El reporte, documenta que el sistema HITO contra el de AR2000 reduce los costos en un 17%, y produce 7% menos CO₂. (Green ARM, 2015).

El contar con escarificadores reduce bastante el mecanismo en comparación con los rodillos fresadores con punta de tungsteno, donde su sistema es muy complejo en comparación y tienen que ser impulsados motrizmente; Este sistema es bueno para los sistemas de reciclaje en frío, porque el material asfáltico está muy rígido, motivo por el cual, el agregado que es el pétreo o la roca en vez de desprenderlo lo fractura, cuando se realiza la obra aplicando calor, no lo fractura, porque el material es suavizado con el calor, esto hace que no sea necesario aplicar la fuerza de un rodillo con puntas de tungsteno. En la figura 68 podemos ver el mecanismo que debe ser considerado para tener la capacidad de fresar con un rodillo con puntas de tungsteno y este solo para un rodillo y para el caso de la máquina de RAC se requieren 3 rodillos, para poder ampliar la longitud del corte o acortar la longitud. Haciendo de esto un mecanismo muy complejo e innecesario en comparación de los escarificadores.

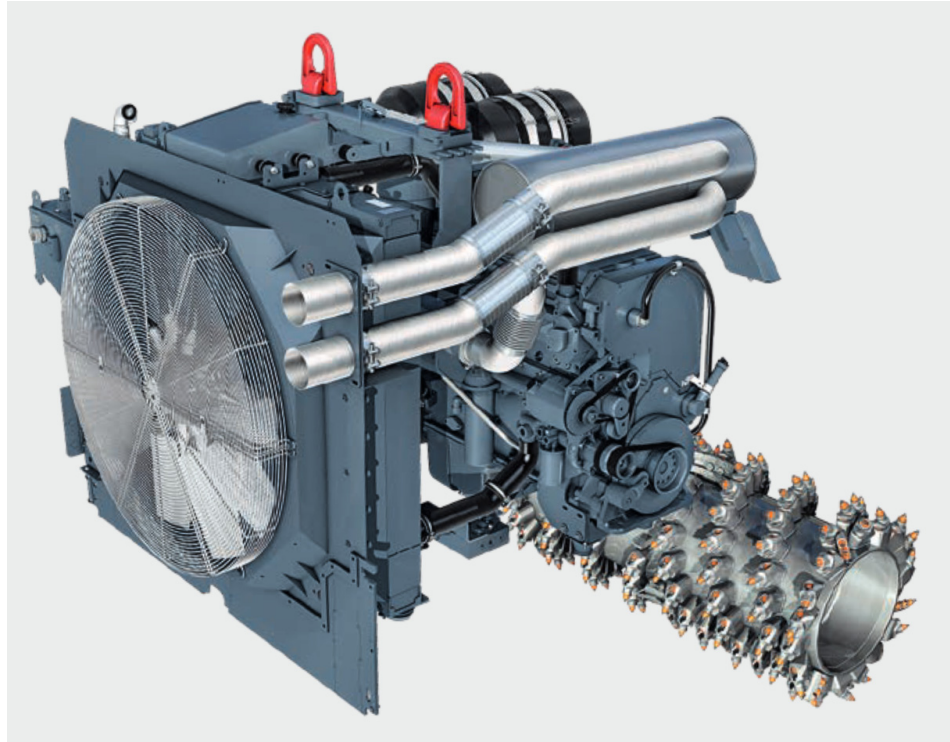


Figura 68. Mecanismo de fresador de rodillo (Wirtgen, 2017)

- Al tener tractores orugas con bandas motrices, la superficie de estas, distribuyen su peso en el asfalto y tiene más fuerza para subir pendientes, además de que el desgaste de neumáticos es reducido.
- Una de las grandes ventajas de la empresa, es que además de fabricar sus propias máquinas, crearon alianzas muy fuertes entre el Estado y la educación; Su principal estrategia fue no solo fabricar las máquinas, sino realizar las obras de mantenimiento, asegurándose de que todos los procesos necesarios, para asegurar la calidad, fuesen llevados a cabo, por ejemplo antes de una obra requieren de varios estudios entre ellos la extracción de muestras; ver figura 69, Esto ha logrado que la empresa asegure que sus proyectos sean un éxito; En otros países el gobierno rentan los equipos y las empresas privadas solo se comprometen en proveer el equipo en buenas condiciones, pero no le interesa si su cliente conoce todos los procedimientos que van más allá de solo operar la maquinaria y el Estado ignora dichos procedimientos. A diferencia de Freetech, tuvo un compromiso con su nación y creó un centro de investigación y tecnología, para cubrir todo el campo del conocimiento referentes al tema, existiendo una sinergia de trabajo entre el gobierno y la empresa; Actualmente esta

empresa atiende el 80% de los proyectos de mantenimiento de todo China. (Public Service Excellence, 2018).



Figura 69. Toma de muestras asfálticas para verificar las condiciones y propiedades del material (Public Service Excellence, 2018)

Desventajas

- Se requiere de un sistema de control muy considerable de la temperatura de las camas de infrarrojos, para no elevar el asfalto por encima de su límite que ronda a los 200°C.
- Es difícil determinar los resultados de manera imparcial ya que actualmente no se ha realizado ningún proyecto en América, donde exista un estudio realizado por parte de otra institución que no sea Freetech, para poder corroborar la información que brinda tanto la empresa como el gobierno chino.

4.3.3 Tecnología desarrollada por Ecopave



Ecopave System Inc. Es una empresa dedicada al diseño y manufactura de maquinaria para el RAC de nombre Ecopaver 400, a su vez una segunda empresa de nombre ARC Asphalt Recycling Inc. Es un contratista dedicado a las obras de mantenimiento de superficies asfálticas.

Esta empresa fue establecida en 1985 por Al Rorinson, un contratista que operaba en las obras de mantenimiento de las calles, pero en obras donde se agregaba 100% de asfalto virgen. Rorinson se dio cuenta que el 50% del costo de la obra estaba concentrado en los agregados del material asfáltico, por lo que se dio a la tarea de diseñar una máquina capaz de reciclar los materiales existentes de las calles y con el tiempo abrió una segunda empresa que fue Ecopave, actualmente es el propietario tanto de ARC Asphalt Recycling Inc. y Ecopave System Inc.

El prototipo de esta idea era realizar una maquinaria de multi-estaciones y el equipo fue desarrollado en William Lake British Columbia.

La ventaja de llevar a cabo las obras con sus propias máquinas, los condujo a perfeccionarlas, hoy en día son un éxito, la maquinaria además es vendida en el mundo a países como Suiza, Estados Unidos, México, Corea, Dubái (Martins Victor, 2018).

La empresa tiene 30 años en operación y una de las obras más importantes fue el mantenimiento del Aeropuerto Internacional a las afueras de Kelowna, British Columbia en 2012. Probablemente sea la primera vez en la historia que una empresa repavimenta completamente un aeropuerto utilizando el método de RAC. Afirma Rorinson.

Otros contratistas habían ofertado esta obra a un costo de \$6.3 millones de USD, pero se salían del presupuesto por encima del 40%. Así que la empresa que ganó el contrato fue ARC Asphalt Recycling Inc. Quienes completaron la obra por \$2.893 Millones de USD. (Fyvie K. , 2014)

Otro proyecto importante para la aceptación de este método fue la repavimentación del Rocky Mountain Parks. Se necesitaba conservar la armonía ecológica sin destruir, contaminar y evitar la

clausura al turismo, por lo que el método del RAC fue la primera opción, además de que la empresa elaboro los proyectos en un horario nocturno.

Por estos y otros éxitos, esta empresa se convirtió en pionera en esta área, además estableció el estándar para el desarrollo de esta tecnología a nivel mundial.

Después de estos proyectos, Estados Unidos los contrato para proyectos similares para la fuerza aérea y el Parque Nacional de Yellowstone.

Fue premiado ganador el 2008 como el contratista del mejor proyecto realizado en 2008, nominado en el 2012 y vuelto a premiar en el 2013. En la figura 70 podemos ver un arreglo ordinario que utilizan para realizar un proyecto de reciclaje a 50 milímetros de profundidad. (Wiley, 2013, April 14).



Figura 70. Equipo para el mantenimiento superficial de asfaltos en caliente de origen chino

La estrategia de esta empresa es realizar varios cortes a menor profundidad para llegar a los 50 milímetros, la empresa afirma que la transferencia de calor es más rápida a menor profundidad; Por esta razón no realizan el corte en una sola operación, esto permite no sobrecalentar el asfalto ni fracturarlo. En la figura 71 podemos ver un arreglo de 3 cortes de 16.6 mm.



Figura 71. Tren de maquinaria con 3 estaciones (Wiley, 2013, April 14)

Pre Calentador



Figura 72. Pre calentador de Ecopave (Ecopave, 2018)

El pre calentador es utilizado para ablandar el material antes de que inicien los cortes. Su ancho de cobertura en operación de la cama de calentamiento es de 3 a 4 metros de ancho, provisto de infrarrojos a través de gas LP con un tanque de 5000 litros, la medida total de esta máquina para ser transportada es de (Largo, Ancho y alto) 10 x 3.1 x 3.9 metros y tiene un peso de 8,200 kilogramos. Esta máquina la podemos ver en la figura 72

Calentador y cortador.



Figura 73. Calentador y cortador de Ecopave (Ecopave, 2018)

Este calentador es una máquina que además de elevar la temperatura del asfalto, realiza el corte con una sierra de rodillos con puntas de tungsteno, tiene una operación de trabajo de 3 a 4 metros,

puede operar un corte de 0 a 60 milímetros, está provisto de un sistema de calentamiento por medio de infrarrojos a través de gal LP. Tiene un motor Caterpillar C9 375 HP-US EPA Tier 3; La máquina tiene un peso de 37,000 kilogramos y el peso en la parte frontal se distribuye a 16,000 kg y en la trasera a 21,500 kg, está provisto de un sistema de filtración de emisiones con una capacidad de 3000 cfm, Ver figura 76, además está provisto por un tanque que contiene una sustancia rejuvenecedora la cual es provista al material recuperado por medio de una computadora marca Dan Foss y su dimensión compactada para transportación es de (Largo, Ancho y alto) 17 x 3.2 x 4 metros. La máquina la podemos ver en la vista lateral en la figura 73.

Mezcladora



Figura 74. Mezclador de color verde de Ecopave (Ecopave, 2018)

La mezcladora es la máquina encargada de recoger el bulto que dejan las máquinas que desprenden el asfalto recuperado, además en la parte frontal está provisto de una tolva para poder recibir mezcla asfáltica nueva por medio de un troque y en la parte trasera tiene un dispensador que vierte la mezcla asfáltica a un pavimentador ordinario. Tiene un sistema computarizado con un procesador Dan Foss para agregar la sustancia rejuvenecedora; Contiene un motor Caterpillar 275 HP C7; Para poder realizar la mezcla entre el asfalto nuevo y el recuperado, tiene 2 gusanos de aspas en el interior, sus medidas en operación son de 4 x 10 metros y sus medidas de transporte son de 3.2 x 10 metros. La unidad es arrastrada por el tráiler que aporta el asfalto.

La tolva tiene una capacidad de recibir 6000 kilogramos y el mezclador tiene una capacidad de procesar 200 toneladas por hora.

La operación convencional de esta empresa con sus máquinas es un pre calentador y 2 estaciones de corte como se puede apreciar en la figura 75.



Figura 75. Arreglo convencional para una obra de Ecopave (Ecopave, 2018)



Figura 76. Incinerador de humo (Ecopave, 2018)

La operación para este tipo de arreglo consiste en pre calentar la carpeta asfáltica con la máquina pre calentadora, seguido de otra máquina que también calienta el asfalto y realiza un desprendimiento a 25 milímetros de profundidad y reúne el asfalto desprendido en un bulto de 120°C (Wiley, 2013, April 14) al centro de la máquina, después una tercera máquina avanza mientras una banda transportadora levanta el bulto del asfalto recuperado que genera la máquina anterior y prosigue su avance, calentando por encima del primer corte y vuelve a cortar otros 25 milímetros de profundidad para acumular un corte de 50 milímetros, después el mezclador recoge ambos bultos de las 2 máquinas previas, para mezclarlo con nueva mezcla asfáltica que provee una troca, al final el mezclador vierte toda la mezcla a un pavimentador convencional. Ver en figura 75 y 77. El anexo 3 se pueden observar los detalles de los mecanismos.

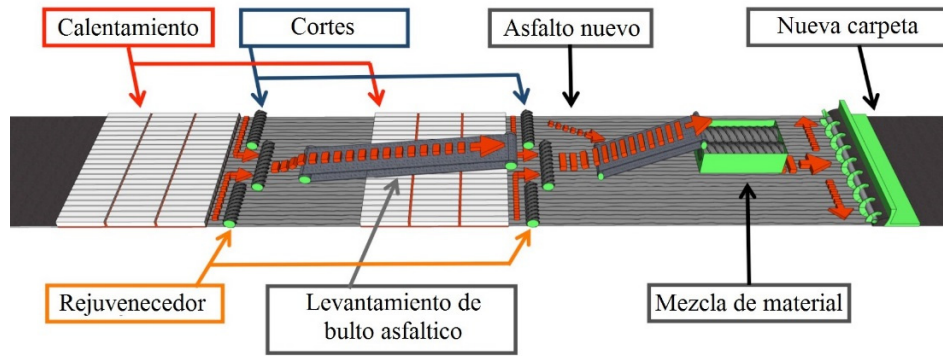


Figura 77. Esquema de proceso para 2 estaciones de corte (Ecopave, 2018)

Ventajas

- El tener contemplado realizar los cortes en diferentes estaciones, permite una mayor flexibilidad para que el proceso sea modificado y poder compensar factores como el clima. Por ejemplo, cuando realizaron el proyecto de reciclaje para el Aeropuerto Internacional en British Colombia en 2012, el Estado les requirió iniciar por las tardes y toda la noche hasta la madrugada (5:55am); ver figura 78, Esto los obligo realizar cortes más pequeños con 3 estaciones de calentamiento y corte, el contratista decidió trabajar 7 días a la semana, el resultado fue el siguiente:

La primera etapa del día 9 de junio al 4 de Julio del 2012 se requirieron de 20 turnos donde 6 y medio turnos fueron perdidos por mala condición climática, la velocidad promedio del tren fue de 3.05 m/min y para la segunda etapa, el clima mejoro a un promedio de 32 a 37°C teniendo una carpeta más seca, se requirieron 15 turnos con ningún turno perdido por mala condición climática y la velocidad promedio de la operación aumento a 4.06 m/min. En la figura 78 y 79, podemos ver el arreglo de la maquinaria donde no se requirió del pre calentador sino de agregar una máquina más que calienta y corta, así que el corte se dividió a 16.6 milímetros por máquina. (Wiley, 2013, April 14)



Figura 78. Ecopave trabajando de noche en Aeropuerto de Canadá (Wiley, 2013, April 14)

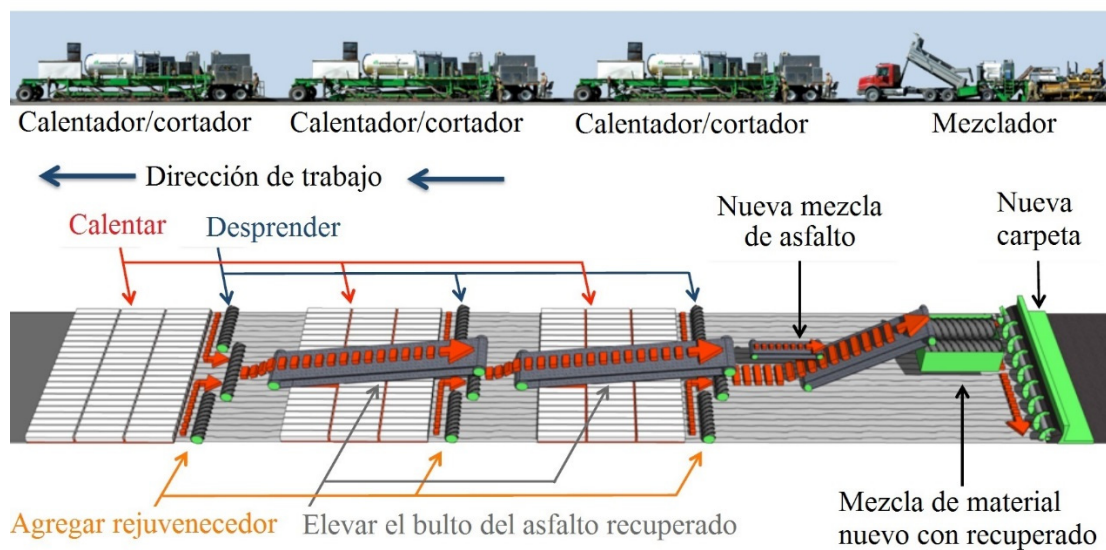


Figura 79. Esquema de trabajo para proceso de 3 estaciones (Fyvie K. , 2014)

El esquema de tres estaciones ayudo al proceso a volver más rápida la operación, porque no necesita transferir calor hasta los 50 milímetros de profundidad y el proceso de precalentamiento no fue necesario para esta obra.

Cada estación de maquinaria de calentador/corte esta alrededor de \$2,000,000 de USD. (Ecopave, 2018); Cada estación están diseñadas con un sistema de compactación, para poder ser transportadas de obra en obra con facilidad, por medio de un tráiler. Como se puede ver en la figura 80 y 81.



Figura 80. Transporte del Ecopave 400 por un tráiler convencional (Ecopave, 2018)



Figura 81. Compactacion de Ecopave 400 (Ecopave, 2018)

- Otra ventaja es que, al realizar cortes en varias etapas, permite que la empresa contratista, pueda realizar un arreglo de maquinaria conveniente, para asegurar la buena calidad en la transferencia de calor en el asfalto y no quebrar la estructura de las calles por la falta de transferencia de calor inducida. En el capítulo 4.4.3.1 se pueden apreciar los diferentes tipos de arreglos utilizado por la empresa.

Desventajas

- Una de las desventajas de utilizar infrarrojos es el intenso calor que genera, que debe ser compensado con sensores de temperatura que regulen la intensidad del calor, para no generar altas emisiones, este también lo compensa con un sistema de colector de humos que dirigen todo a un incinerador. (Figura 76)
- Al realizar cortes de muy poca profundidad, hace innecesario tener un sistema de corte por medio de rodillos con puntas de tungsteno con demasiada fuerza, para solo tener que desprender una profundidad muy corta, si se agregan escarificadores, el sistema podría reducirse, eliminando el sistema motriz y la complejidad del mecanismo.

4.3.3.1 Variaciones de proceso

Existen varios factores que hacen que un proyecto sea distinto de cualquier otro y va desde el clima en un área específica, las condiciones de tráfico y la estrategia de mantenimiento. Una calle puede tener baja calidad de material asfáltico o muy buena calidad y las estrategias varían, por ejemplo, Ecopave tiene 3 estrategias estandarizadas. (Wiley, 2013, April 14). A excepción de algunas situaciones como la ocurrida para realizar la obra en el Aeropuerto Internacional en British Colombia donde el arreglo de la maquinaria estuvo fuera de estas 3 estrategias.

- 1^{ra} estrategia: mantenimiento a 50 mm de profundidad.
Se requieren de 2 estaciones de calentamiento y corte.
- 2^{da} estrategia: mantenimiento a 100 mm de profundidad.
Se requiere de 50mm con 2 estaciones de corte y 50 mm de carpeta asfáltica con material nuevo.
- 3^{ra} estrategia: mantenimiento a 150 mm de profundidad.
Se requiere de 50 mm de fresado, 50 mm con 2 estaciones de corte y 50 mm de carpeta asfáltica nueva.

Por estas y otras razones, hace que la estrategia del contratista pueda variar; A continuación, algunas de los arreglos utilizados por ARC Asphalt Recycling Inc.



Figura 82. Arreglo convencional

En la figura 82 podemos ver un arreglo muy utilizado, cuando todos los parámetros están dentro de lo normal, sobre todo la temperatura ambiente deseable y la profundidad de tratamiento de 50mm.



Figura 83. Arreglo para temperatura muy baja

El arreglo en la figura 83 es necesario cuando el cliente desea que los proyectos se realicen de noche y donde la temperatura ambiente es muy baja.



Figura 84. Arreglo baja temperatura y mayor profundidad de 50mm

El arreglo de la figura 84 es necesario cuando la temperatura es baja, o se requiere de un corte superior a los 50 mm.

Esta flexibilidad en el proceso puede lograrse, cuando se cuenta con estaciones de maquinaria que realizan los cortes en diferentes etapas; Cuando la maquinaria realiza un solo corte en una sola de sus máquinas, es arriesgado cortar debajo de los 50 milímetros de profundidad, porque a mayor profundidad la transferencia de calor es más lenta, por este motivo para este tipo de procesos donde solo existe un corte, el tren de maquinaria debe duplicarse y esto hace que el arreglo de las máquinas tenga una longitud muy extensa y la maniobra para utilizar demasiada maquinaria aumenta la necesidad de los recursos humanos, materiales, emisiones y energías.

4.3.4 Tecnología desarrollada por Green Arm



Existe una tecnología desarrollada en Japón con la patente JP4024293 donde tiene un método de reciclaje en caliente y criban el material asfáltico que recuperan para poder agregar una capa inferior de alta densidad (pétreo de tamaño chico) y en la parte superior un material más grande (Pétreo de tamaño más grande) que genere una porosidad en la superficie, esto logra que las calles absorben el agua mucho más rápido, con el fin de que en épocas de lluvia el agua no se acumule en la superficie, porque se filtra en el asfalto y esta agua a su vez se filtra hasta llegar a las orillas de la calle, para ser dirigida hacia el drenaje o una zona verde. En la figura 85 podemos ver el resultado de un trabajo elaborado en Okinawa, en el National Highway Route 77. (Hosokawa, 2008, April 24).



Figura 85. Comparación entre el asfalto poroso y el convencional (Hosokawa, 2008, April 24)

La idea principal es que el agua no sea un peligro para los vehículos que circulan y que el agua sea re direccionada hacia zonas verdes o direccionada al sistema de drenaje, ver figura 86. La estrategia es dejar 35 milímetros de profundidad de asfalto poroso en la superficie y seguido 35 milímetros de asfalto denso hacia el interior. Como se muestra en la figura 87.

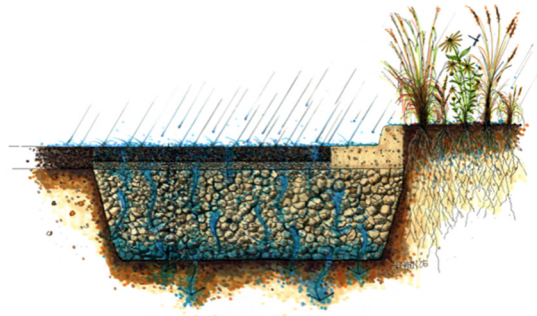


Figura 86. Filtración de agua hacia zonas verdes (StoneSet, 2013, August)



Figura 87. Muestra tomada después de una obra (Hosokawa, 2008, April 24)

El tren de máquina lo podemos ver en la figura 88 donde muestra todo lo necesario para la construcción. El tipo de calentamiento es igual al de AR2000 porque comparten la misma patente en colaboración con Martec.



Figura 88. Tren de tecnología HITONE de parte de Green ARM (Green ARM, 2008, November 11)

El pre calentador



Figura 89. Pre calentador HITONE (Green ARM, 2008, November 31)

El pre calentador tiene la capacidad de regular la temperatura, el sistema de calentamiento tiene la patente japonesa (no. 2005-363989), tiene un peso de 22,300 kilogramos, esta propulsado por un motor Isuzu 6HK1XQA de 184 KW, puede realizar giros mínimos de 11.1 metros; Las medidas para ser transportado son de (largo x ancho x alto) 11 x 3 x 3.15 metros, ancho de operación de 3 a 4.6 metros; El largo de la cama de calentamiento es de 6 metros. La abertura entre las llantas es de 1.5 metros, tiene un tanque hidráulico de 240 litros, un tanque de diésel de 1,600 litros y un tanque de agua de 200 litros.

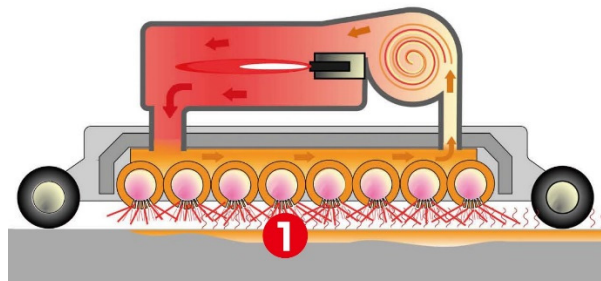


Figura 90. Concepto del proceso de calentamiento de HITONE (Green ARM, 2008, November 11)

Como podemos ver en la figura 90 el calentamiento se da a través de una flama por combustión por medio de diésel igual que el sistema de Martec con el AR2000.

Calentador/cortador



Figura 91. Calentador/cortador HITONE (Green ARM, 2008, November 11)

La máquina de la figura 91, vuelve a calentar el asfalto y realiza un corte único en la carpeta asfáltica; Está provisto de una tolva que puede recibir nueva mezcla asfáltica para el proceso, la máquina tiene un peso de 28,170 kilogramos, es impulsado por un motor ISUZU 6HK1XQA de 202 KW, las medidas para su transportación son de (largo x ancho x alto) 12.2 x 3 x 3.4 metros, su operación en ancho puede ser ajustada de 3 a 4.6 metros. El sistema de calentamiento tiene 3 metros de largo y es ajustable en lo ancho de 2.8 a 4.5 metros, el sistema de fragmentador puede ajustarse de 2.5 a 4.4 metros y su profundidad puede variar de 0 a 50 milímetros. Tiene un tanque hidráulico con capacidad de 500 litros y un tanque de diésel de 900 litros.

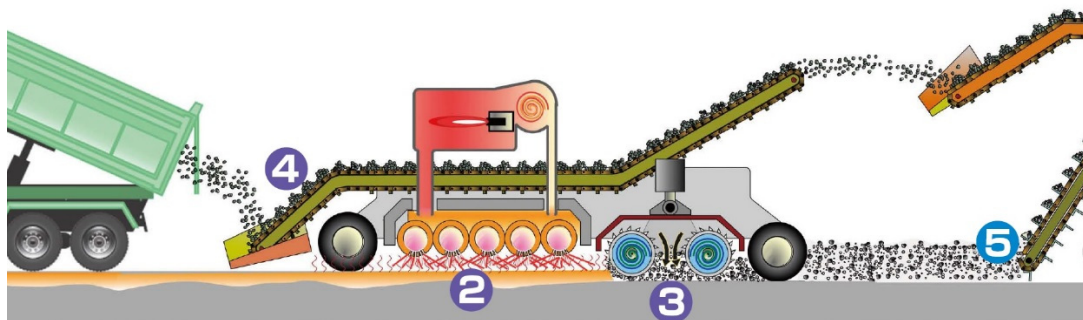


Figura 92. concepto de trabajo del Calentador/cortador de HITONE (Green ARM, 2008, November 11)

En la figura 92 podemos ver como esta máquina recibe nueva mezcla asfáltica por su tolva frontal (4) mientras sigue calentado el asfalto (2), después unos cortadores de rodillo con puntas de tungsteno cortan 50 milímetros de asfalto, este lo va abultando por en medio de sus ruedas para proveer a la siguiente máquina el asfalto recuperado por la parte de abajo y el nuevo asfalto por la parte de arriba, por medio de una banda transportadora.

Separador



Figura 93. Separador HITONE (Green ARM, 2008, November 11)

El separador de la figura 93, es la máquina que distingue a este proceso de los demás, en su interior tiene una criba que separa el material asfáltico por tamaño de pétreo, la máquina tiene un peso de 29,500 kilogramos y es propulsado por un motor Caterpillar C9 de 205 KW, el tamaño de transportación de la máquina es de (largo x ancho x alto) 12.5 x 3.2 x 3.3 metros, tiene una abertura interior entre sus llantas de 1.5 metros; Tiene un tanque de aceite hidráulico de 520 litros y un tanque de diésel de 450 litros.

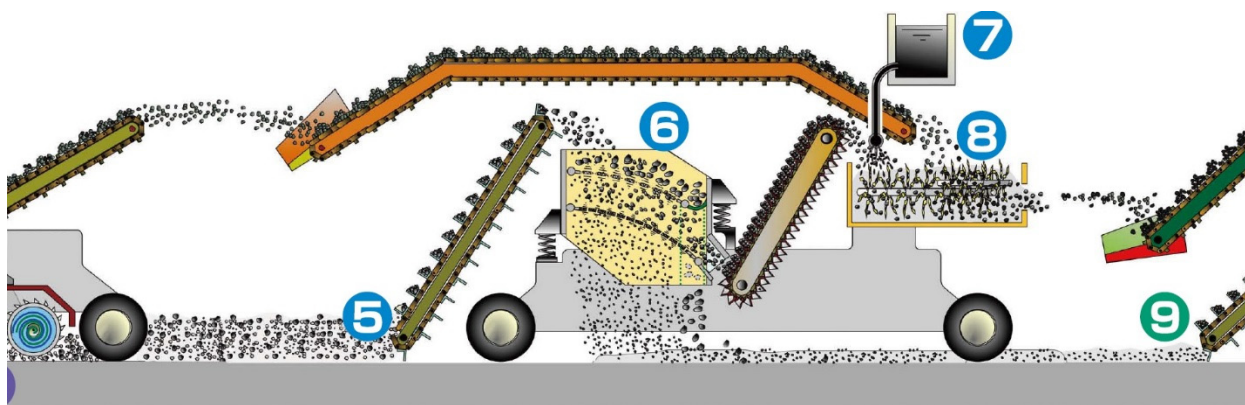


Figura 94. separador con criba de HITONE (Green ARM, 2008, November 11)

Como podemos ver en la figura 94 el material lo recoge desde el suelo por medio de una banda transportadora (5) y lo deposita en una criba (6) el material de menor tamaño pasa directamente al suelo y el material más grande pasa a otra banda transportadora, donde se le agrega un rejuvenecedor y es mezclado en un compartimento (8) después provee este material a la siguiente máquina.

Mezclador asfáltico



Figura 95. Mezclador de asfalto de HITONE (Green ARM, 2008, November 11)

Esta máquina de la figura 95, recibe 2 materiales asfálticos en 2 tamaños diferentes, para después disponerlos en 2 capas sobre la carpeta asfáltica actual, una de alta densidad y otra porosa. La máquina tiene un peso de 29,500 kilogramos y es impulsada a través de un motor Caterpillar C9 de 205 KW, su tamaño de transportación es de (largo x ancho x alto) 12,5 x 3.2 x 3.4 metros, la abertura entre sus llantas interiores son de 1.5 metros; Tiene un tanque de aceite hidráulica de 520 litros y un tanque de diésel de 450 litros.

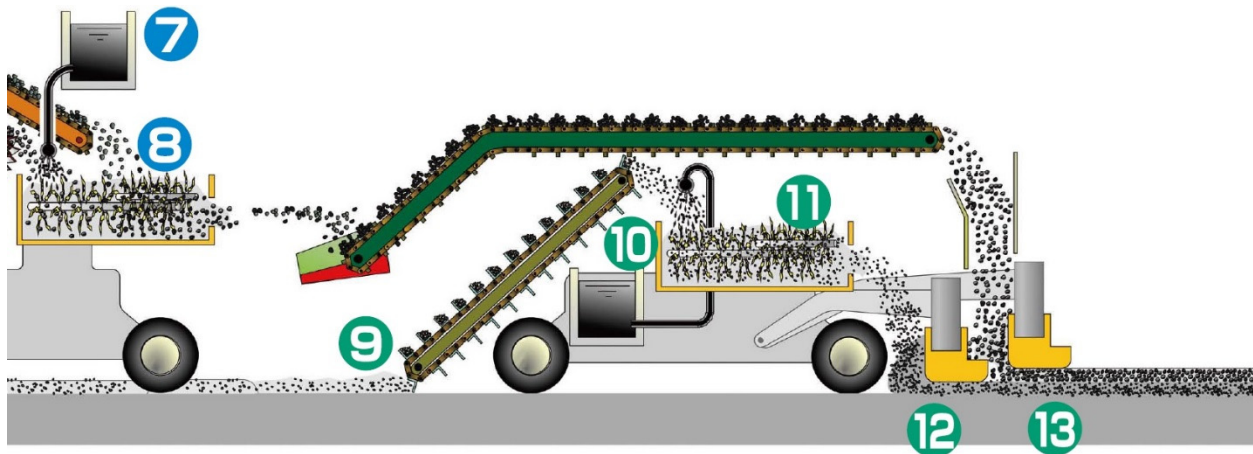


Figura 96. Operación esquemática del mezclador de asfaltos (Green ARM, 2008, November 11)

La máquina de la figura 96, recibe el material de menor tamaño desde el suelo, a través de una banda transportadora (9) y lo dispone en un compartimento donde le agrega un rejuvenecedor (10) y es mezclado por unas espas (11) al final es depositado como la primer capa de alta densidad sobre la calle actual y por la parte superior recibe el material asfáltico de mayor tamaño en una banda transportadora que viaja sobre la parte superior de la máquina y lo deposita en su segundo

compartimento donde después agrega como la segunda capa asfáltica donde su característica es que tiene un grado de porosidad por donde puede filtrar el agua.

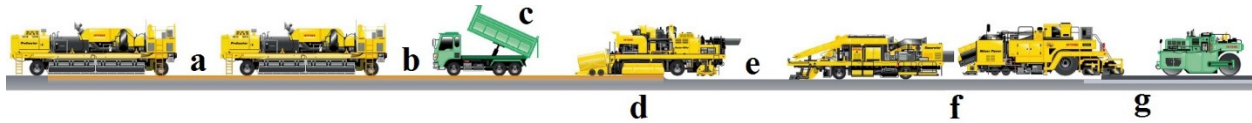


Figura 97. Temperaturas de operación (Hosokawa H. G. A., 2006, August)

En la figura 97 podemos ver las temperaturas de operación que se realizaron en Okinawa, para el Aeropuerto Naha. Donde la temperatura fueron las siguientes: a (194°) b (229°) c (162°) d (149°) e (93°) f (127°) g (125°) (Hosokawa H. G. A., 2006, August).

Ventajas

- En calles urbanas donde la mayor parte del tiempo el tráfico solo son autos pequeños o medios, es un tipo de calle muy calificada para poder desarrollar este tipo de trabajo, ya que beneficia al filtrado de agua y no se crearían lagunas en los fraccionamientos, además de que se puede disponer para zonas verdes.

Desventajas

- La máquina produce un solo corte en una de sus máquinas, por lo que a mayores profundidades tendría que disponer de otro tren completo.
- El tipo de calle debe ser cuidadosamente seleccionada, porque en calles donde transiten vehículos de carga pesada, pueden compactar la mezcla creando hundimientos a lo largo de la calle.
- El tipo de infraestructura que debe contar el fraccionamiento debe ser adecuado, porque si no existe un sistema de drenaje para librar las calles del agua, saturarían al asfalto y el agua entre el asfalto lo dañaría.

4.3.5 Tecnología desarrollada por Wirtgen Group



Esta empresa está conformada por un grupo empresarial a nivel internacional dedicado a la fabricación de maquinaria para la construcción. Donde se conglomeran 5 marcas Wirtgen (Líder en el mercado de fresadoras y recicladoras para la construcción de carreteras), Vogele (Pavimentadoras, reglas de extendido y alimentadoras), Hamm (Compactadores de asfaltos), Kleemann (Móviles de trituración y cribado) y Benninghoven (Mezcladoras de asfalto). Cada una de estas plantas están presentes en más de 100 naciones.

Juntas todas estas empresas reúnen más de 500 años de experiencia en la construcción de máquinas y equipos. La historia del Grupo Wirtgen inicia en 1961, hoy en día son más de 8,200 empleados.

En la figura 98 podemos ver una de las instalaciones de fabricación de la empresa Wirtgen en Alemania, las uniones de las otras 4 compañías hacen de este grupo, una de las infraestructuras más grandes del mundo, cada una de las 4 empresas afiliadas a este grupo están igual de grandes y experimentadas en sus áreas de desarrollo.



Figura 98. Una de las 5 plantas del grupo Wirtgen (Wirtgen, 2018 H)

En la figura 99, podemos ver todos los sectores que abarcan este grupo de empresas. A mediados de los años 70's Wirtgen inicio el desarrollo para el tratamiento de superficies asfálticas en caliente y diseñó en 1976 su primera recicladora.



Figura 99. Áreas de Mercado de Wirtgen group (Wirtgen, 2018 H)

Wirtgen elabora sus propias obras de construcción por lo que puede corroborar el buen funcionamiento de sus máquinas. En la figura 100 podemos ver el tren que utiliza para la elaboración de sus proyectos.

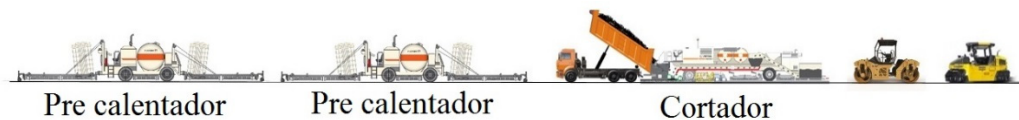


Figura 100. Tren de obra de Wirtgen (Wirtgen, 2018 H)

Para Wirtgen existen 4 formas de reciclaje:

1. Perfilado: Cuando existe ondulación sobre la calle, se trabaja para dar el perfil correcto agregando aditivos y reciclando el material existente.

2. Re pavimentación: se realiza el trabajo de perfilado, pero se agrega una pequeña capa de material asfáltico virgen.
3. Remix: Se recicla el material existente y se mezcla con material asfáltico virgen.
4. Remix plus: se recicla el material existente y se agrega material asfáltico virgen, pero en 2 capas, primero la reciclada y después la capa virgen.

Pre calentador HM 4500

El pre calentador (figura 101), como en las demás tecnologías es utilizado para suavizar el asfalto, dependiendo de la temperatura ambiental se utilizan los necesarios para compensar la necesidad de calentamiento. El peso total sin carga de esta máquina es de 16,700 kilogramos, el peso en el eje delantero con el combustible lleno es de 6,900 kilogramos, el eje trasero con el depósito lleno, es de 9,800 kilogramos. El peso total con el combustible lleno es de 22,600 kilogramos. Las dimensiones de la máquina son (largo x ancho x alto) 11.1 x 2.5 x 3 metros, el depósito de combustible es de 280 litros, depósito de aceite hidráulico es de 300 litros y el depósito de gas es de 6,000 litros. El suministro de tensión está diseñado para 24 volts. El consumo del combustible a plena carga, es de 20,9 litros/hr. Tiene un motor Deutz TCD 2012 L04 de 75 kW. La cama de calentamiento tiene un ancho máximo de 4.5 metros y lo largo de cada cama es de 4.9 metros. Su calentamiento es por medio de infrarrojos por medio de gas LP.

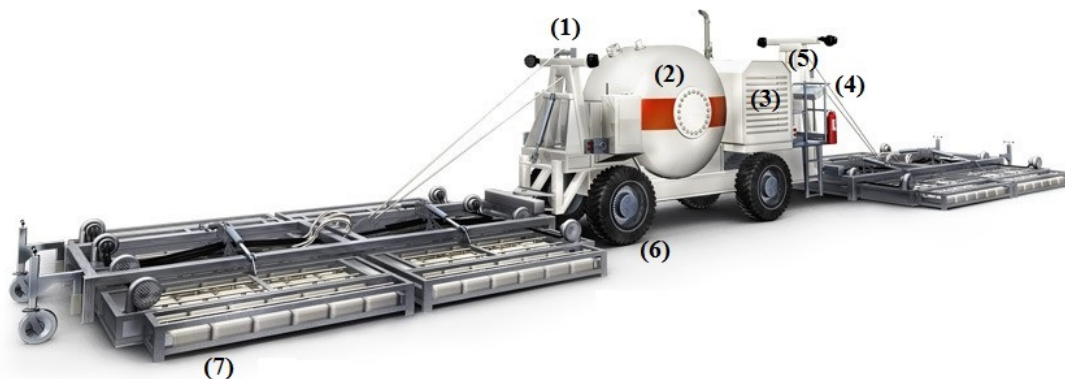


Figura 101. Pre calentador HM4500 de Wirtgen (Wirtgen, 2016 A)

En la figura 101 podemos ver parte de su composición, en el (1) podemos ver el actuador de retracción de los paneles, accionado por medio de un hidráulico que acciona 2 tornos con cables

tensores de acero. (2) Tenemos el depósito de gas con indicador de nivel de llenado, utilizado para el calentamiento de infrarrojo. (3) Motor diésel para su movilidad. (4) Puesto de mando de control. (5) Estación de regulación de la presión de gas dispuesta en el lugar central para la regulación eficaz de la potencia calorífica, en las distintas superficies de calentamiento. (6) Dirección disponible para todas sus ruedas, para una maniobra más flexible. Las camas están equipadas con abanicos, accionados por medio de motores hidráulicos, esto proveen más oxígeno para aumentar la potencia calorífica. La intención de estas cámaras es elevar la temperatura de la superficie de 120 a 150°C. en la figura 102 podemos ver cómo es compactado para su transporte.



Figura 102. HM4500 compactado (Wirtgen, 2016 A)

Remixer 4500

El remixer es la máquina principal para este proceso, esta máquina sigue calentando el asfalto durante su proceso con las mismas ventajas del pre calentador; Puede controlar la intensidad de calor, apagar celdas individuales si se requiere, tiene unos ventiladores que agregan oxígeno a los paneles infrarrojos para aumentar la capacidad calorífica. La máquina tiene una capacidad calorífica de 1.4 kW.

Tiene la capacidad de expandir su capacidad de operación de 3 a 4.5 metros y realizar un corte de 0 a 60 milímetros. Tiene un motor Deutz TCD 2015 V05 4V con una potencia de 240 kW, el consumo de combustible a plena carga es de 55 litros/hr.

La capacidad del depósito de combustible es de 1,000 litros, el de aceite hidráulico es de 1,000 litros, el de betún de 1,600 litros, el de gas 5,300 litros.

La velocidad de trabajo puede ser de 0 a 5 m/min, pero en un registro de una obra de 30 kilómetros en Jintang, China, la velocidad de operación fue de 1.6 a 2.2 m/min. (Green ARM, 2008, October 31).

El peso total de la máquina en plena carga es de 49,900 kilogramos y el peso total sobre el eje delantero es de 23,200 kilogramos, el peso en el eje trasero es de 26,700 kilogramos.

En la figura 103 podemos ver su composición.

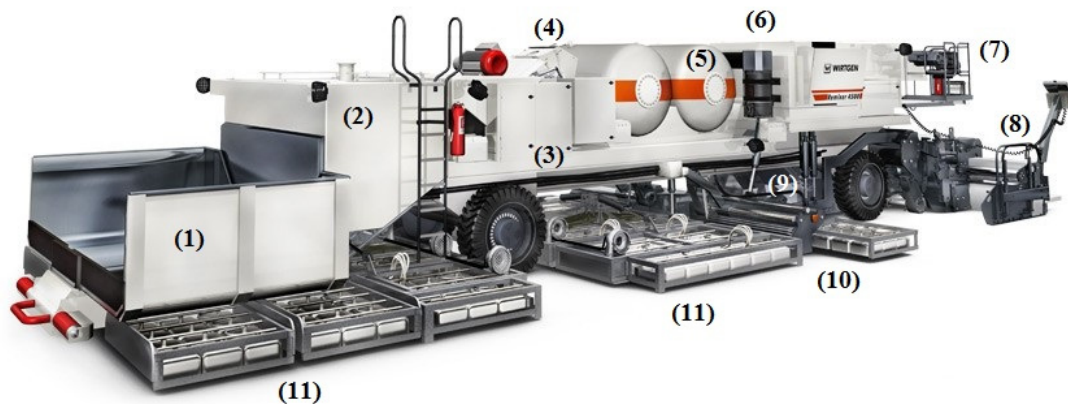
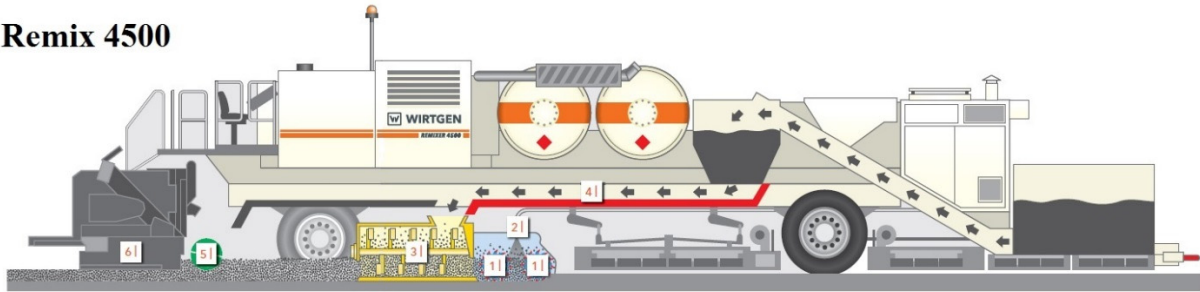


Figura 103. Remixer 4500 de Wirtgen (Wirtgen, 2016 B)

(1) Tolva para recibir la mezcla asfáltica nueva. (2) Depósito del ligante bituminoso, (3) Cinta transportadora. (4) Tolva dosificadora para agregar el aglomerado en la cinta transportadora. (5) Depósito de gas. (6) Unidad de accionamiento por medio de un motor diésel. (7) Puesto de mando de control (8) Regla de extendido Vogele con un sinfín de distribución y un dispositivo hidráulico de compactación y vibración para un extendido del material asfáltico sobre la carpeta. En la figura 104 podemos ver 2 variantes de proceso para este mezclador el Remix 4500 y el Remix-plus 4500.

Remix 4500



Remix-plus 4500

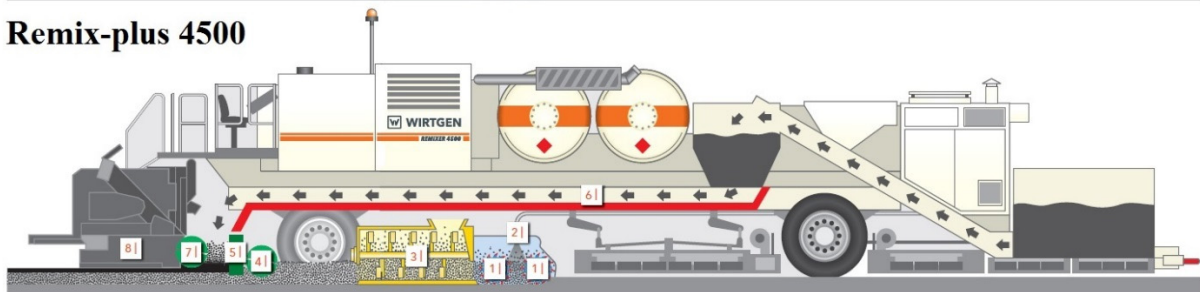


Figura 104. Diferencias entre los modelos Remix 4500 y Remix-plus 4500 de Wirtgen (Wirtgen, 2016 B)



Figura 105. Remix 4500 forma de transportación (Wirtgen, 2016 C)

La diferencia entre estos 2 modelos, (figura 104) consiste en que en el Remix 4500, dirige la nueva mezcla asfáltica depositada en la tolva, directamente al mezclador en la zona 31 donde la máquina mezcla tanto el asfalto recuperado y el asfalto nuevo. Y en el Remix-plus 4500 dirige la nueva mezcla asfáltica a la zona 71 donde la coloca detrás de los primeros gusanos 41 y antes de los segundos gusanos 71 esto logra que el asfalto recuperado sea utilizado para la capa más baja y el nuevo material asfáltico para la capa superior de la carpeta asfáltica.

En anexo 4 podemos observar los detalles de los mecanismos.

Algunos proyectos realizados con estas máquinas en China fueron las siguientes. (Wirtgen, 2016 D).

- El proceso de Wirtgen se introdujo en China en 2002 por la empresa Huayu R&B en Beijing, a una velocidad de 1.6 a 2.5 m/min a una profundidad de 50 milímetros al largo de 22.5 kilómetros.
- En junio de 2002 en Jing-Jin-Tang expressway a lo largo de 30 kilometros con una profundidad de 40 milímetros, a una velocidad entre 1.6 a 2.2 m/min.
- En 20 de junio del 2002 utilizando el Remix plus 4500 en la conexión 3^{ra} y 4^{ta} de Beijing a una profundidad de 40 milímetros con una capa sobre puesta a 30 milímetros, a una velocidad promedio de 2 metros por segundo.
- En mayo del 2004 por la empresa Shanghai Pudong R&B un proyecto de 20.75 km en Chen-Yu expressway a una profundidad de 40 milímetros a una velocidad promedio de 2 m/min.
- En abril del 2005 en Tang Gu, por la empresa Huayu R&B y otra empresa Hebei Runze Company, ambas con un tren de Wirtgen a una velocidad promedio de 2.5 m/min.

Ventajas

- Los pre calentadores cuenta con un sistema de ventilación que ayudan a los calentadores a potenciar el calor que genera.
- En la figura 102 y 105 podemos ver como pueden ser compactados para su transporte.
- Los pre calentadores pueden deshabilitar las diferentes zonas de calentamiento a lo largo de toda la cama, para ajustar el tamaño a conveniencia.
- La máquina Mixer 4500 incluye la máquina pavimentadora, por la que se omite una de las máquinas convencionales normalmente utilizada en este proceso, que es el pavimentador, además este aditamento tiene un sistema de vibración que compacta el asfalto, por lo que el nivel de compactación es bueno.

Desventajas

- El pre calentador es muy complejo e inigualable por las demás tecnologías, es importante contar con personal especializado para controlar todos los controles de las máquinas, además hay que considerar que la tecnología alemana se distingue por su calidad, pero también por sus costos.
- La máquina Mixer 4500 es un sistema muy completo, el nivel de los operadores debe ser elevado y el control de las partes debe ser muy cuidadoso, porque la máquina tiene un nivel de complejidad alto.
- Sin duda las máquinas son muy sofisticadas, además de que las preceden 5 compañías de nivel competitivo a nivel internacional, solo que el presupuesto de muchos países es limitado como para tener acceso a esta tecnología sofisticada.

5. Comparación de tecnologías con una estación de corte contra varias estaciones de corte

Con la finalidad de evaluar cuál es la ventaja de que los cortes en la carpeta asfáltica, sean realizados en diferentes estaciones, se realiza este presente análisis. Una de las restricciones para el proceso de reciclaje en caliente, consiste en calentar el material sin que sufra un sobrecalentamiento, por esta razón los proyectos deben solo trabajarse a una profundidad de 50 milímetros, porque la transferencia de calor es más complicada a mayor profundidad, por el tiempo que tarda en transferir el calor.

En esta condición, los procesos que tienen cortes en diferentes estaciones, tienen una ventaja en poder realizar un arreglo flexible, y por flexible se refiere, en la manera en que pueden acomodar la maquinaria para poder lograr una obra a mayores profundidades.

Para este estudio se compara al AR2000 y a Ecopave 400 diseñados para diferentes estrategias, el AR2000 realiza un corte de 50 milímetros en una sola operación y el Ecopave 400 en 2 operaciones.

Proceso de Martec AR2000 comparado con el de Ecopave 400 (figura 106).

El tren de maquinaria Martec AR2000 tiene una distancia de 60 metros



El tren de maquinaria Ecopave 400 tiene una distancia de 57 metros



Figura 106. Comparación del AR2000 y el Ecopave 400 para una obra de 50 mm de profundidad

A continuación, para el desarrollo de una obra de reciclaje de asfalto cuando se requieren profundidades arriba de los 50 milímetros es recomendable utilizar de nuevo el calentamiento y corte de otro tren de maquinaria y los trenes anteriormente mostrados quedarían como sigue en la figura 107 y 108 para el AR2000 y el Ecopave, respectivamente.



Figura 107. AR2000, Máquinas que se requieren agregar para un corte a 100 mm



Figura 108. Ecopave 400 Máquinas que se requieren agregar para un corte a 100 mm

Como se ve en las figuras 107 y 108 es una ventaja muy favorable tener cortes en varias estaciones, porque de tener un solo corte, la distancia del tren debiese ser extensa y también el costo para tener todo el equipo sería muy elevado. Aunque esta comparación, no es del todo simple de simular, porque que, al cortar 100 milímetros de corte, existirían otras consideraciones de diseño que requieren considerarse, por ejemplo, las capacidades del depósito de mezclado de la maquinaria necesitarían duplicarse; Si se necesita bajar más allá de los 100 milímetros, actualmente el método de proceso requiere de fresar en frío el pavimento para primero rebajar la altura de la calle y

después pasar los trenes de reciclaje en caliente. El factor más importante que debe ser tomado en cuenta, es la transferencia de calor antes de realizar el corte.

Aunque el AR 2000 tiene un solo corte, tiene dispuesto 3 zonas de calentamiento antes de realizar el corte de 50 milímetros y la intensidad de calor no es tan fuerte como la del infrarrojo del Ecopave 400, por lo que teóricamente la transferencia de calor se da más lento y no se expone la superficie a un sobrecalentamiento, además el calentamiento, aunque es lento, la zona a tratar se somete a un mayor tiempo de exposición a las camas de radiación.

En cambio, el Ecopave 400 tiene un sistema calorífico más alto pero el tiempo de exposición en la zona es menor y el corte de profundidad también es menor. Así que ambas máquinas adaptan su forma de trabajo para no exceder en temperatura al asfalto y ambos cumplen con la calidad de tener una carpeta asfáltica dentro de las especificaciones requeridas.

Otra situación podría ser la siguiente, si una obra requiere de 70 milímetros de profundidad. El AR2000 necesitaría colocar un segundo tren de maquinaria que constan de 4 máquinas, en el caso de Ecopave400, solo necesitaría colocar una máquina adicional y eso es debido a las estaciones de corte de cada respectivo tren de maquinaria.

6. Procedimientos que determinan una obra de mantenimiento de RAC

En los capítulos anteriores hemos visto las ventajas y desventajas de cada tecnología, pero una característica muy peculiar de todas las empresas mencionadas, es que también ejecutan las obras, no solo se dedican al diseño de la maquinaria; Esto ha permitido que las empresas mejoren sus equipos a razón de los resultados que se obtienen en la obra.

Se puede adquirir un equipo muy sofisticado para realizar este tipo de obras, pero si no se realizan ciertos análisis previos, la obra puede fracasar, no por las máquinas utilizadas, si no por falta a los procedimientos que preparan la estrategia para definir el tipo de mantenimiento de la obra.

La siguiente información, no es una norma de procedimientos estandarizados internacionalmente, cada país tiene sus procedimientos, este solo es un extracto de lo más relevante, para tener una idea general de lo referente a este tema.

En la figura 109 podemos ver un esquema de proceso para poder determinar la selección del tipo de mantenimiento, existen varios tipos, el referente al RAC se refiere como: Reciclaje de la superficie.

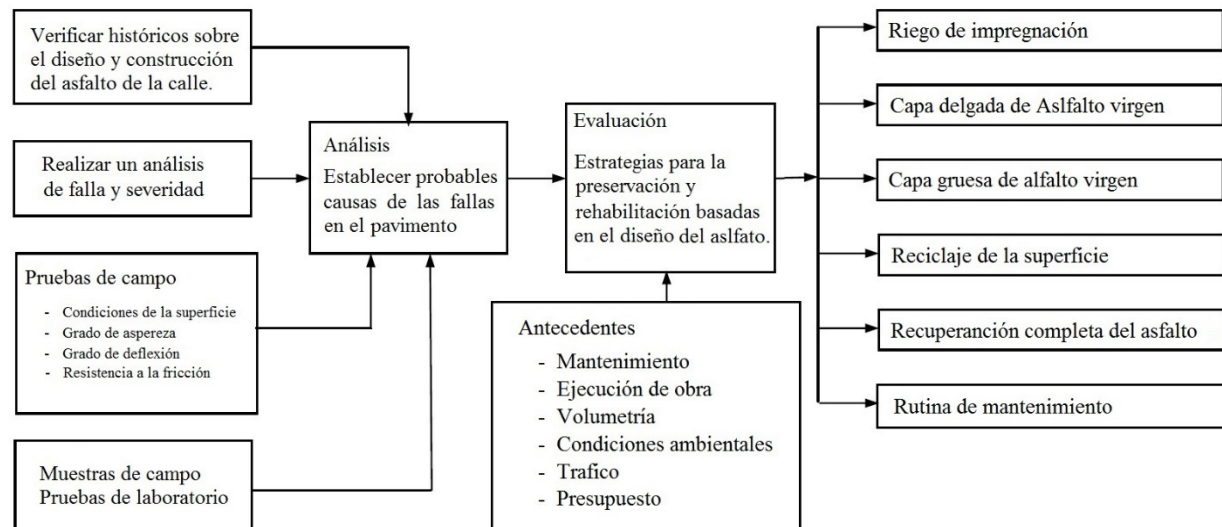


Figura 109. Esquema de la decisión para el mantenimiento de calles (Ronald T., 2008, July 31)

Algunos criterios necesarios para establecer si se puede realizar un mantenimiento superficial de RAC. (Sharma V., 2015), (BC-MOT, 2008, June 2).

- El primer paso para conocer si una calle tiene que ser sujeta a mantenimiento, es realizar un análisis de perfil para determinar el Índice de Regularidad Internacional. Que simplificando el concepto es el perfil longitudinal de la superficie de camino en una huella. “Sayers, 1996”. El valor “0” es un perfil perfectamente plano. El índice que determina el mantenimiento también está en función del tipo de calle.
- Una vez que la calle está sujeta a una necesidad de mantenimiento. Se debe de hacer un análisis de falla y catalogar la severidad en cada falla. Para realizar una estrategia del tipo de mantenimiento que se necesita. Con este análisis se puede determinar si el tramo que necesita el mantenimiento requiere de previos tratamientos para después proceder con el RAC.

- Se debe verificar en los históricos, el tipo de diseño del material asfáltico de la calle en cuestión, si tubo mantenimientos previos y de qué tipo.
- La fuerza de la estructura debe de ser determinada, considerando la necesidad de la profundidad de asfalto necesario a tratar, se debe determinar que la capacidad de la estructura soportara la carga del diseño original de la calle.
- Detectar las fallas a lo largo de la calle y clasificar el grado de severidad, las máquinas tratan por lo regular los primeros 50 milímetros y pueden agregar otros 50 milímetros de asfalto, pero si la estructura actual no es más gruesa que esta profundidad y si la falla tiene una severidad más profunda que la superficie de tratamiento, no puede considerarse un mantenimiento de RAC.
- Se necesitan extraer muestras asfálticas; [ASTM D-5361] Por lo general se realizan con un corte de un taladro, de preferencia de 6 pulgadas de diámetro con la profundidad necesaria para determinar la composición de la calle, la cantidad de muestras asfálticas por lo general son a cada kilómetro al centro del carril, pero el número de las muestras estará también determinado por zonas de fallas detectadas. Las muestras asfálticas deben ser sometidas a pruebas de laboratorio para determinar los siguientes parámetros:
 - Contenido de bitumen en la muestra debe ser no menor a 4.5% o mayor de 6%. [ASTM D-6307, D-2171, D-1559, C-566]
 - Densidad y tamaño de los pétreos. [ASTM C-136, C-117, D-2726, D-2041]
 - Un grado de penetración menor a 25 milímetros no son favorables para el mantenimiento de RAC. [ASTM D-5, C-127, C-128]
 - Huecos de aire en muestras asfálticas menores al 1% son desfavorable para los resultados de mantenimiento del RAC.
 - Determinar el porcentaje de agregados para determinar si se requiere agregar nuevo material asfáltico. [ASTM D-5821]

Los resultados de cada parámetro deben ser analizados para determinar si pueden ser compensados con un diseño de mezcla que sea factible desarrollar en el mantenimiento de RAC.

Condiciones ambientales

Otro factor que debe ser considerado son las condiciones ambientales. Los siguientes parámetros son los más recomendados, más sin embargo hay zonas donde es imposible contar con cada uno

de estos, es importante calendarizar los meses más favorables para desarrollar este tipo de mantenimiento por cada zona geográfica. Las sugerencias son las siguientes:

- La temperatura ambiental debe estar arriba de los 40°F (4°C) y de preferencia a 30°C
- La temperatura de la superficie asfáltica debe estar a 50°F (10°C).
- El viento es un factor ambiental que ayuda a la perdida de la transferencia de calor, la obra debe evitarse en estas condiciones ambientales.
- La superficie asfáltica de las calles no puede estar mojada y no debe ejecutarse la obra durante las lluvias.
- Dependiendo del área geográfica en la que se ejecutara la obra, debe considerarse un calendario con los meses donde el clima está en condiciones aptas para ejecutar estas obras.

7. Desarrollo de pruebas de transferencia de calor

En los capítulos anteriores se observó que cada tecnología tiene una estrategia diferente para realizar el calentamiento, uno con infrarrojos y otros con aire caliente, además de las numerosas formas de disponer los pre calentadores en una variedad de arreglos entre la maquinaria.

Con el fin de poder determinar las decisiones de diseño se optó por desarrollar pruebas de laboratorio para conocer el comportamiento de la transferencia de calor sobre el asfalto, para este propósito se desarrolló un horno, que simulara la cámara de calentamiento; También se desarrollaron muestras asfálticas cilíndricas. El concepto general lo podemos ver en la figura 110 donde el segmento referente a equipo señalado en la figura, es la parte que corresponde al diseño del horno; El sistema de adquisición de datos es el dispositivo electrónico para convertir la señal análoga de los sensores RTD a digital; Con este conjunto se pasara la información a la computadora y procesara la información, para poder arreglar los datos de manera comprensibles para analizar el comportamiento del fenómeno a temperatura.



Figura 110. Arreglo conceptual para el sistema de adquisición de datos

Diseño del horno para calentamiento de muestras asfálticas.

La intención del horno es generar un sistema de calentamiento; Se seleccionó una flama por combustión por medio de gas LP, esta flama, se dispersa sobre una cámara cónica y el calor llega a la muestra asfáltica por radiación a una distancia de 5.5 pulgadas. En la figura 111 podemos ver las características más importantes y en anexo 6 podemos ver los detalles del diseño.



Figura 111. Zona de calentamiento del horno para las pruebas

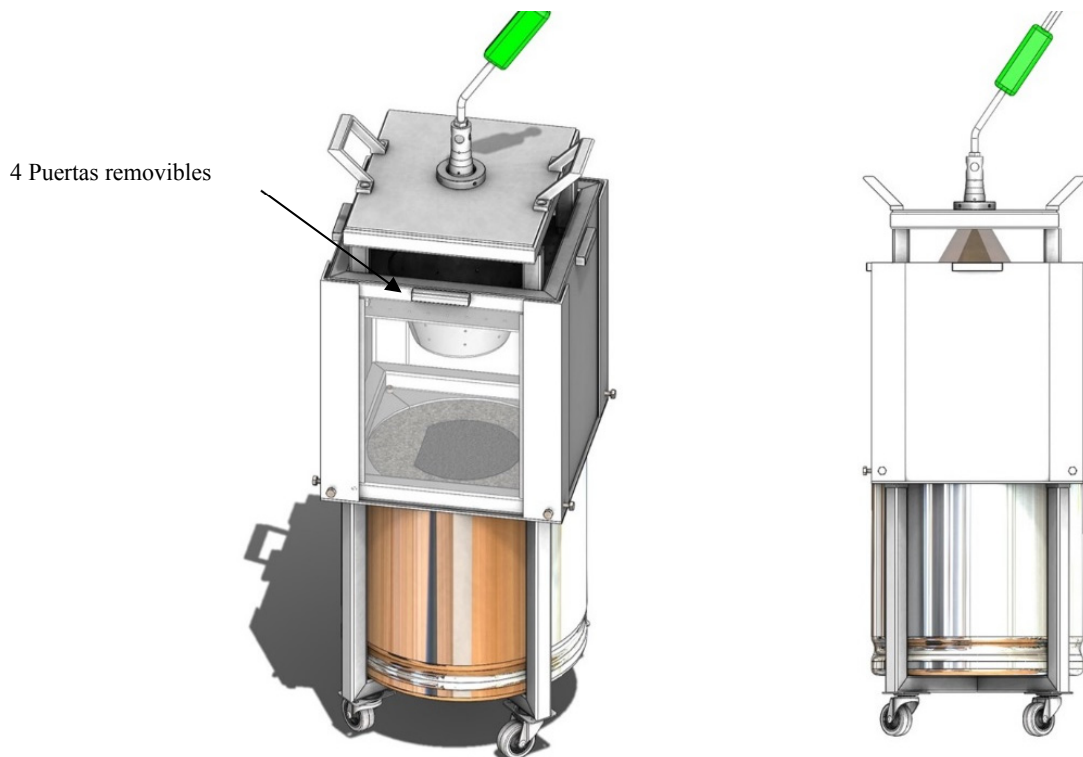


Figura 112. Diseño general del horno

7.1 Desarrollo de muestras asfálticas

Para poder determinar el diseño del horno primero se necesitó elaborar el diseño de las muestras asfálticas, actualmente los cementos asfálticos están clasificados en México por el grado de desempeño o comúnmente como Grado PG y esta misma nomenclatura define el rango de la temperatura máxima y mínima en el que tiene un mejor desempeño, por ejemplo, un cemento asfáltico PG64-22 tendrá un desempeño satisfactorio en un rango de temperatura de 64 Grados Celsius y a una temperatura baja de -22 Grados Celsius; En México se manejan 3 categorías de asfalto, ver figura 113 y se utilizan según la zona geográfica, categorizada por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte. En esta investigación el cemento asfáltico se seleccionó conforme a la zona local donde se elabora la presente tesis, siendo este PG 76-22 para Mexicali B. C.

En colaboración con el laboratorio de ingeniería civil de la UABC se elaboraron muestras asfálticas por medio del método AMMAC con un espesor de 10 centímetros de 150 cm de diámetro el

material que se dispuso fue material pétreo del banco Pelayo km 38 + 950 con 2000m desviación derecha y Gusa km 3+000 con 200m desviación derecha de la carretera Mexicali – San Felipe. Para elaborar las muestras se calentó el material pétreo a 150°C y para elaborar la mezcla a una temperatura entre los 140 a 165°C. En anexo 5 podemos ver los detalles del procedimiento de la elaboración de las muestras asfálticas.

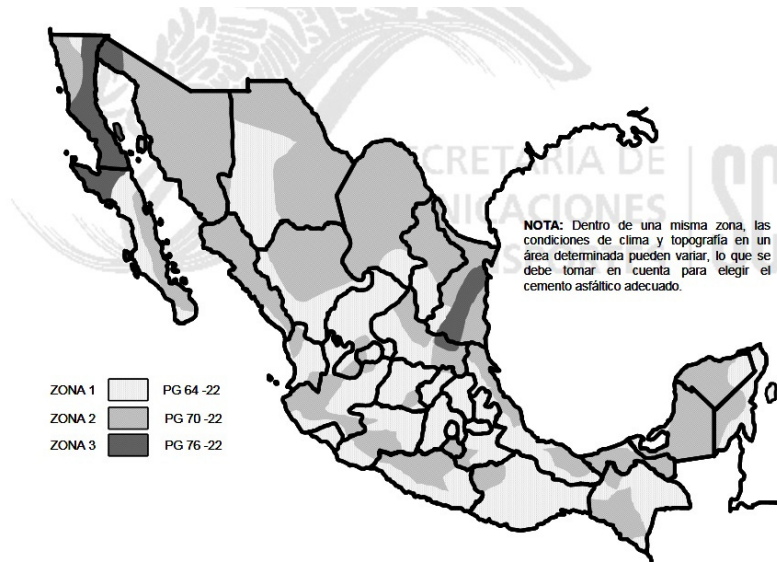


Figura 113. Regiones geográficas para cementos asfálticos (SCT, 31 de Mayo 2005)

Preparación de las muestras asfálticas para la prueba de calentamiento.

Una de las condiciones para las pruebas en el horno, es conocer el tiempo necesario para que el material asfáltico alcance una temperatura de 100°C en relación a diferentes profundidades que fueron asignadas según el experimento; Estos 100°C fueron seleccionados debido a un experimento realizado sobre una muestra asfáltica, donde su temperatura en la superficie fue elevada de forma continua, y de forma manual con un desarmador se ejercía una presión sobre la muestras hasta lograr desprender sus agregados; Se observó que al alcanzar los 101.4°C se logró despréndelos. Ver figura 115.

Las muestras asfálticas fueron aisladas alrededor de su cara cilíndrica con fibra de vidrio, para que la temperatura solo se transfiriera del cono radiante hacia el interior de la muestra asfáltica, evitando que los laterales de la muestra asfáltica tuviesen transferencia de calor. Ver figura 114

Adicionalmente la muestra asfáltica fue colocada sobre un trozo de fibra de vidrio con se ve en la figura 116, para aislar todas sus caras a excepción de que una cara quede expuesta a la transferencia de calor.

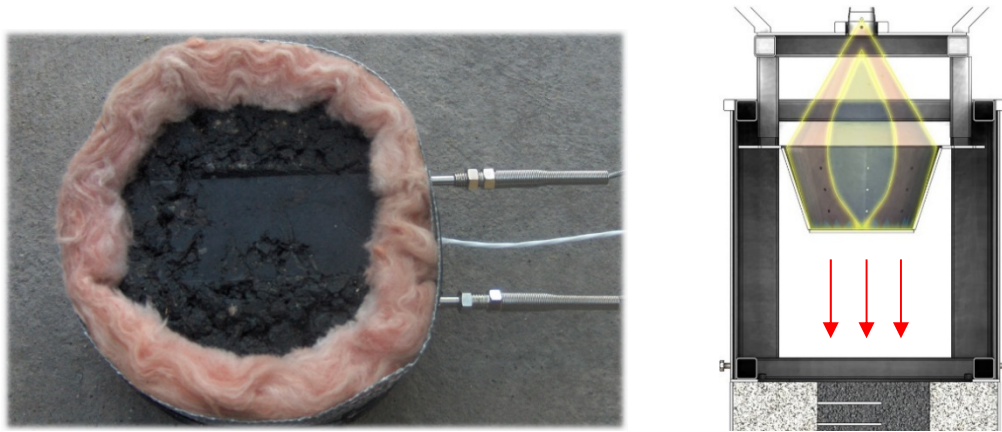


Figura 114. Aislamiento lateral de las muestras asfálticas con 3 sensores RDT

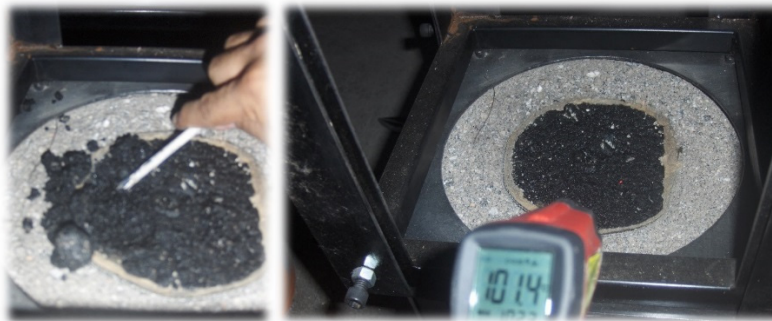


Figura 115. Desprendimiento de los agregados a 100°C



Figura 116. Aislamiento de la cara inferior de la muestra asfáltica



Figura 117. Colocación de la muestra asfáltica en el horno

En la figura 117 podemos ver cómo fue colocada la muestra asfáltica dentro del horno; Conforme se realizaban las pruebas, se fueron controlando y homologando todas las condiciones y parámetros para todas las pruebas realizadas.

Las condiciones que fueron consideradas se enlistan a continuación:

1. A cada inicio de prueba de calentamiento, la temperatura de la cámara del horno era elevada a 260°C , a continuación, se iniciaba la prueba sobre la muestra asfáltica; Durante el calentamiento de la cámara del horno, la muestra asfáltica era protegida con un refractario sobre su superficie expuesta, para evitar su calentamiento.
2. Una vez alcanzada la temperatura de la cámara del horno se retira el refractario de la superficie expuesta de la muestra y se eleva su temperatura de la superficie a 65°C ; Este valor de temperatura fue considerado, previo a realizar una medición de temperatura en la superficie de las calles en Mexicali Baja California; Cuando la temperatura ambiental registraba 35.3°C , la temperatura en la superficie del asfalto era de 61.2°C y en otro registro, cuando la temperatura ambiental estaba a 43.3°C , la temperatura de la superficie de la calle

era 71.1°C, ver figura 118, por promedio se estimó que la superficie en el experimento fuese de 65°C antes de iniciar la muestra.



Figura 118. Temperatura de la superficie de la calle a temperatura ambiental

3. Las paredes de la cámara del horno tenían que ser aisladas en todos sus laterales, considerando la puerta principal. Ver figura 119, en esta imagen se pueden ver algunas improvisaciones utilizadas para cumplir este propósito y en la figura 120 podemos ver el desarrollo de un diseño para mejorar la facilidad de este propósito.



Figura 119. Aislamiento de las paredes del horno

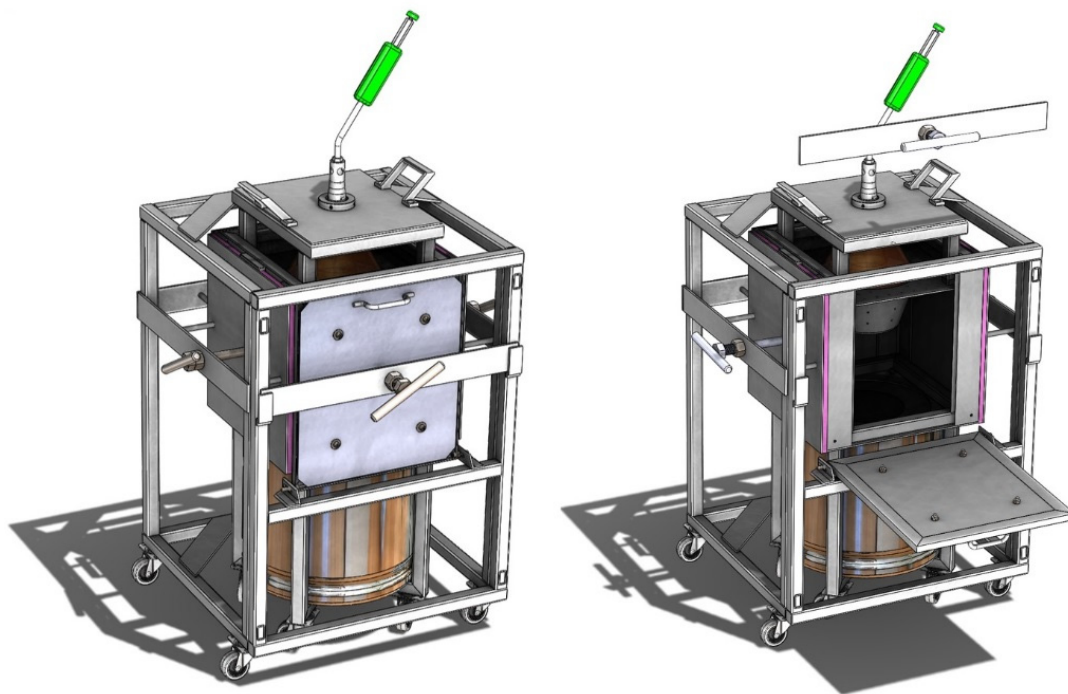


Figura 120. Diseño de accesorios para aislamiento de la cámara

4. Se evitaba abrir la puerta para la toma de la temperatura de la superficie asfáltica, sino hasta el final, para no perder calor dentro de la cámara.

7.2 Desarrollo de tecnología para análisis de transferencia

7.2.1 Desarrollo de tecnología 1

Para poder desarrollar la medición de temperatura se utilizaron unos sensores RTD de platino PT100 con un rango de temperatura de -50 a 150°C de acero inoxidable, de un diámetro de 4 milímetros y 20 milímetros de largo. Ver figura 121. Para este experimento se necesitan muestras de temperatura hasta los 120°C ; Para este propósito fue necesario desarrollar unas tarjetas electrónicas para poder amplificar la señal de los sensores y alimentar de información a nuestro sistema adquirente de datos, además de regular el voltaje. Se incluyeron 4 sensores para esta práctica. El arreglo general para el circuito electrónico lo podemos ver en la figura 122, cuenta con 3 fuentes; 2 fuentes de 10 volts para los amplificadores operacionales y 5 volts para los puentes de Wheatstone de las tarjetas. Tenemos dispuestas 4 tarjetas; Cada una para un sensor RTD y todas están conectadas entre sí, en un clúster con conector DP9 y envían la señal a un canal de comunicación del adquirente de datos; Tiene una capacidad de leer 60 datos por segundo, pero

afin a las pruebas que se necesitan para esta investigación se regula a 1 dato por segundo, el adquisidor de datos de la marca DATAQ® es conectado a una computadora para recibir los datos en tiempo real por medio de un conector USB.



Figura 121. Sensores de platino PT100

El diseño del sistema electrónico fue diseñado y calculado para la selección de todos sus componentes, en anexo 7 está registrado su proceso, el siguiente paso fue planear como pasar los datos adquiridos por la computadora a una representación significativa.

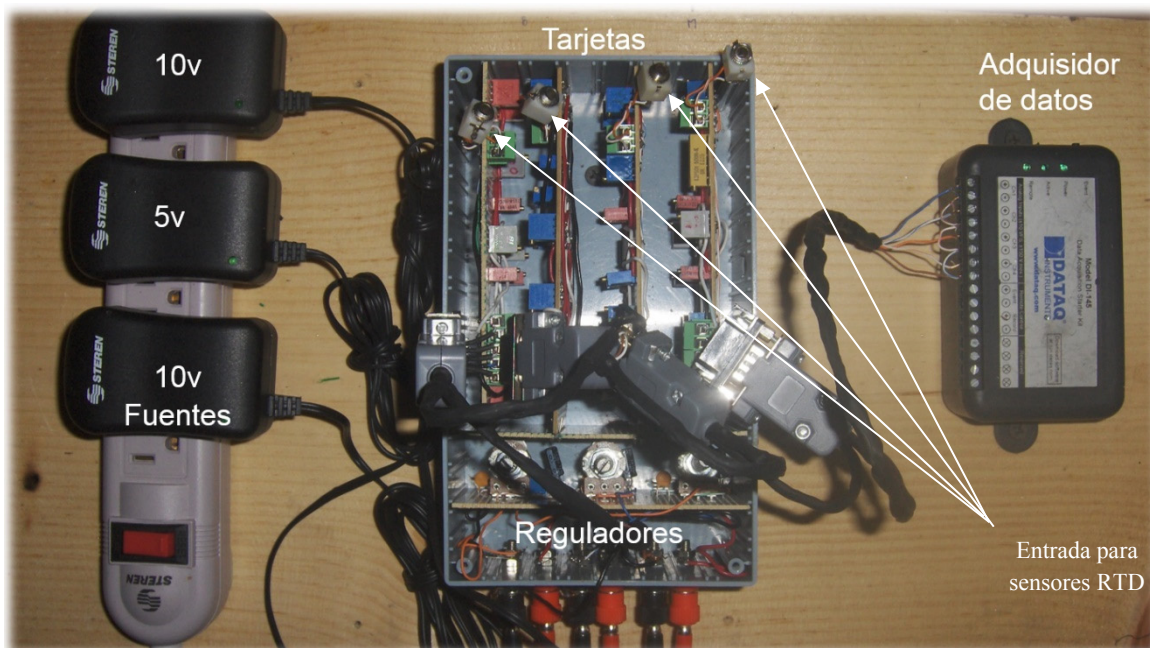


Figura 122. Arreglo para la conversión de señal de los RTD hacia el adquisidor de datos DATAQ®

El DATAQ® exporta la información a una base de datos en Excel, ver tabla 7 aquí podemos ver como ordena la información por segundo y en cada segundo está registrado el voltaje que se tiene en cada sensor. El sensor PT100 consiste en un alambre de platino que a 0°C tiene 100 ohm y al variar la temperatura, también lo hace su resistencia eléctrica; Por medio de un arreglo electrónico en las tarjetas, se registra la variación de voltaje, que está en función de la resistencia del sensor; después se compara en la tabla del proveedor y se verifica la equivalencia del voltaje a temperatura; Para no hacer esta tarea muy laboriosa, se realizó un documento en Excel que compara los valores exportados del DATAQ® a través de un macro en Excel, el macro busca en la tabla de equivalencias y arregla los datos registrados de voltaje a temperatura para cada sensor y en cada segundo. En la Tabla 8 podemos ver como quedaba la información ya preparada en Excel. Y en la figura 123 podemos ver como registraba las gráficas del comportamiento en los sensores.

Relative Time	Date	Time Stamp UTC	Volt	Volt	Volt	Volt
0	42513	0.818078704	0.986328125	8.217773438	8.963623047	0.970458984
1	42513	0.818090278	0.986328125	8.217773438	8.966064453	0.970458984
2	42513	0.818101852	0.986328125	8.217773438	8.963623047	0.969238281
3	42513	0.818113426	0.986328125	8.217773438	8.961181641	0.969238281
4	42513	0.818125	0.986328125	8.216552734	8.959960938	0.970458984
5	42513	0.818136574	0.986328125	8.217773438	8.961181641	0.971679688
6	42513	0.818148148	0.986328125	8.217773438	8.961181641	0.969238281
7	42513	0.818159722	0.986328125	8.217773438	8.962402344	0.971679688

Tabla 7. Datos exportados del DATAQ® a Excel

Relative Time	Date	Time Stamp UTC	Volt	Volt2	Volt3	Volt4	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4
<u>0</u>	42513	0.75599537	0.80566406	8.27514648	8.99047852	0.78125	<u>39</u>	540	522	32.2222
<u>1</u>	42513	0.75600694	0.80566406	8.27392578	8.99047852	0.78125	39	540	522	32.2222
<u>2</u>	42513	0.75601852	0.80566406	8.27514648	8.99169922	0.78125	39	540	522	32.2222
<u>3</u>	42513	0.75603009	0.80566406	8.27392578	8.98925781	0.78125	39	540	522	32.2222
<u>4</u>	42513	0.75604167	0.80566406	8.27514648	8.99169922	0.78125	39	540	522	32.2222
<u>5</u>	42513	0.75605324	0.80566406	8.27270508	9.00024414	0.78369141	39	540	522	32.2222
<u>6</u>	42513	0.75606481	0.80688477	8.27026367	9.01123047	0.78369141	39	540	522	32.2222
<u>7</u>	42513	0.75607639	0.80932617	8.27026367	9.01245117	0.78613281	39	540	522	32.7778
<u>8</u>	42513	0.75608796	0.81176758	8.26904297	9.01367188	0.79223633	39.4444	540	522	32.7778
<u>9</u>	42513	0.75609954	0.81298828	8.26538086	9.01367188	0.79101563	39.4444	540	522	32.7778
<u>10</u>	42513	0.75611111	0.81787109	8.26538086	9.01367188	0.79589844	39.4444	540	522	33.3333
<u>11</u>	42513	0.75612269	0.81787109	8.26416016	9.01367188	0.79467773	39.4444	540	522	33.3333

Tabla 8. Datos convertidos de voltaje a temperatura

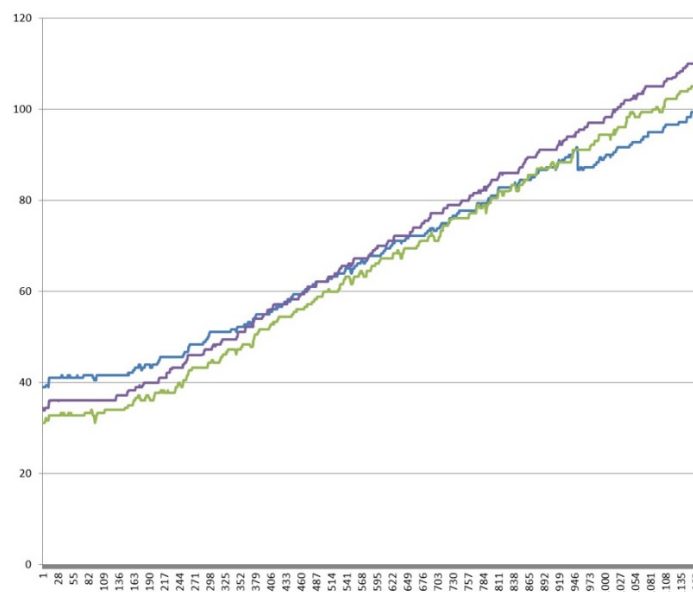


Figura 123. Gráfica comparativa de los sensores RTD

Para iniciar las pruebas definimos los criterios, uno de ellos fue colocar los sensores en 4 puntos diferentes sobre las muestras asfálticas; En las primeras pruebas se colocaron los 4 sensores a una profundidad de 25 milímetros en puntos diferentes, para conocer el tiempo que tomaba trasferir 100°C y después en otra muestra asfáltica a 16 milímetros de profundidad. Estas pruebas son preliminares a las pruebas definitivas por la investigación, estas pruebas están desarrolladas en el capítulo 8.

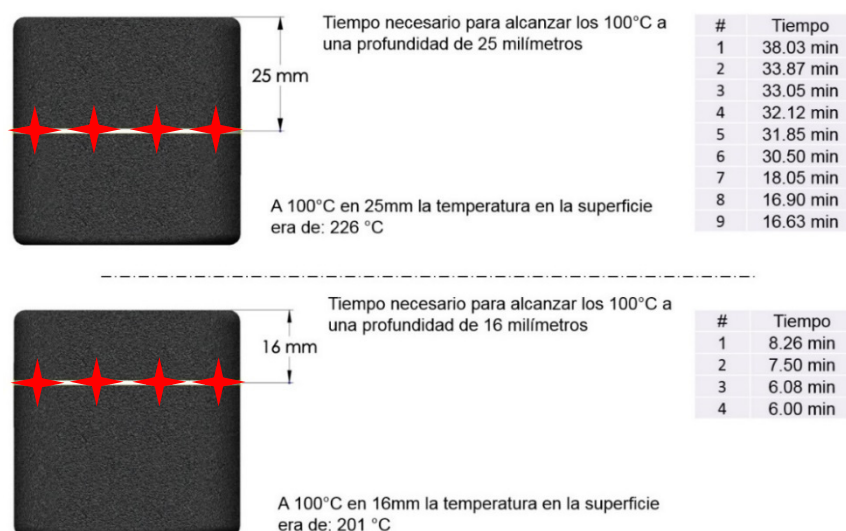


Figura 124. Resultados para las primeras pruebas de transferencia

Se procedió a realizar las primeras pruebas, para una profundidad de 25 milímetros; La primera prueba tuvo una duración de 38 minutos, después se realizó la misma prueba con los mismos criterios, pero el tiempo disminuyó y la razón fue que en la primera prueba la cámara del horno tardó tiempo en calentarse y en las siguientes pruebas ya estaba a una temperatura mayor.

Mientras se realizaban los experimentos se fueron homologando los criterios y parámetros para las pruebas estos detalles están registrados en el capítulo 7.1 en la lista de condiciones. Y el mejor tiempo obtenido fue de 16.63 minutos.

Después de confirmar el tiempo mínimo con los parámetros y condiciones controladas, se iniciaron las pruebas a una profundidad de 16 milímetros y el tiempo disminuyó a 6 minutos. En la figura 124 se muestran los criterios de ambas pruebas y el número de muestras realizadas en cada caso.

El problema más frecuente durante la experimentación fue el ruido eléctrico que existía en los cables; Cuando los cables eran sujetos con las manos, el voltaje variaba y la lectura era errónea, algunos componentes electrónicos fallaban durante las pruebas, inhabilitando alguno de los sensores. Entre cada prueba se presentaba una falla en el sistema electrónico y se tenía que rastrear la falla. Al existir demasiados componentes electrónicos y conectores, las lecturas de los RTD se tenían que compensar para poder obtener una lectura correcta, en cada prueba se generaba una calibración para corroborar la lectura de los sensores.

Estas fallas frecuentes generan una incertidumbre en la veracidad de los datos, por esto se optó por desarrollar un nuevo equipo para la toma de temperatura de la marca National Instruments® que redujo un gran número de componentes electrónicos que fueron utilizados para este primer sistema presentado.

7.2.2 Desarrollo de tecnología 2

Para el desarrollo de la tecnología se seleccionó un sistema embebido MyRIO® de la marca National Instruments® y esto debido a la capacidad de que este dispositivo permite reducir la electrónica utilizada en el primer dispositivo que se diseñó, además al utilizar LabVIEW® para realizar la interface con los criterios necesarios para los experimentos requeridos en la presente tesis. En la figura 125. Podemos ver el sistema embebido que se adquirió para las pruebas.



Figura 125. Instrumento embebido MyRIO® de National Instrument.

Los sistemas de las tarjetas para amplificar las señales fueron sustituidos por un controlador, que reduce toda la necesidad de armar las tarjetas electrónicas del primer diseño mostrado en el capítulo 7.2.1; Es un transmisor de señal para sensor de temperatura RTD Pt 100, para esta prueba necesitamos 4, uno para cada sensor, así el dispositivo quedaría como se ve en la figura 126 (lado izquierdo) y la imagen del lado derecho representa al sistema anterior; En esa figura podemos ver la comparación de todo aquello que fue sustituido; En el caso del adquisidor de datos de la marca DATAQ® en el sistema anterior, fue sustituido por el MyRIO® quedando el sistema completo y funcionando como se muestra en la figura 127. El proceso de instrumentación del horno se realizó en tiempo real, siendo posible observar el comportamiento de la temperatura dentro de la muestra. Y además como una opción la información podía ser respalda en una tabla dentro de una memoria USB.

En la figura 128 podemos ver la pantalla principal del programa que fue diseñado en LabVIEW®, donde muestra el comportamiento de la temperatura en cada sensor. Al correr la prueba se registra la fecha, se controla el tiempo de inicio y termino, se establece 2 puntos de temperatura a registrar, en este caso el limite bajo fue el de 100°C y el alto de 120°C, además de mostrarnos una gráfica del comportamiento en los 4 sensores.

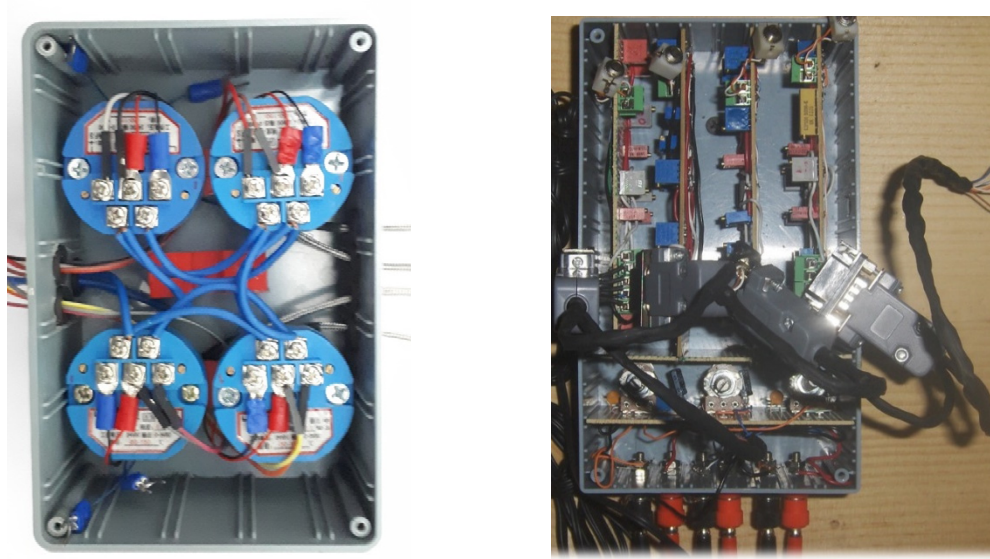


Figura 126. Comparación de la electrónica entre el diseño 2 con el previo



Figura 127. Pruebas de calentamiento con el nuevo sistema de MyRIO®

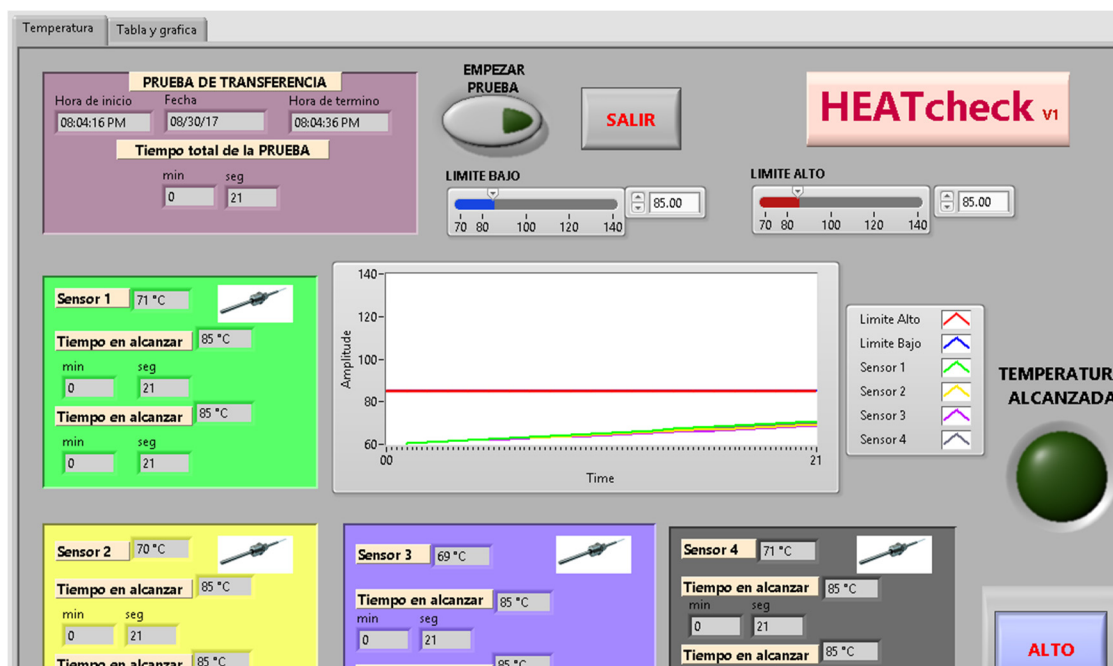


Figura 128. Pantalla diseñada en LabVIEW® para captura y comprensión de información de pruebas

Uno de los puntos que se cuidaron en la realización previa de las pruebas, fue la calibración de los sensores y del MyRIO® para asegurarnos del funcionamiento de los dispositivos.

El sistema que se creó en LabVIEW® fue inscrito en el Registro Público del Derecho de autor.

En anexo 8 podemos ver los detalles de la construcción de este sistema y el registro de derecho.

8. Diseño y resultado de experimentos

Una vez que contamos con el instrumento y que verificamos su calibración fue importante definir el propósito de los experimentos con las muestras asfálticas. Existen varios diseños de cementos asfálticos, en la presente investigación contamos con una mezcla asfáltica de cemento PG 76-22 que es asignado para las zonas más cálidas de México en la figura 113 se puede observar.

En base a un experimento previamente explicado en el capítulo 7.1, confirmamos que el desprendimiento de sus agregados para mezcla asfáltica de grado PG 76-22, se da a los 100°C; Esta prueba debería realizarse como un requisito previo a los trabajos de obra para reciclaje, porque al conocer la temperatura de desprendimiento de los agregados para una carpeta asfáltica a tratar, ayuda en adecuar los parámetros de calentamiento de la operación de la maquinaria, además en

México, Pemex inicio con los cementos asfálticos de grado PG y a partir del 1 de enero del 2014 Pemex dejo de producir el cemento asfáltico AC-20. Por lo que las calles en México tienen una variedad de diseños previos a los actualmente requeridos, motivo por el cual las pruebas previas son necesarias para cada obra.

Para las siguientes experimentaciones se comprobarán las siguientes hipótesis:

1. Calentar el asfalto a 16 milímetros de profundidad a 100 °C para realizar el corte del reciclaje, es mejor que realizarlo a 25 milímetros de profundidad, porque requiere de menor tiempo y no se sobrecalienta la superficie por encima de los 200°C.
2. Elevar la temperatura de calor en la obra, acelera la transferencia de calor, pero sacrifica la superficie de las calles elevando su temperatura por encima de los 200 °C.
3. La transferencia de calor en las muestras asfálticas para el tipo PG 76-22 no es lineal.
4. Las obras de asfalto por debajo de 50 milímetros son perjudiciales para el asfalto, llegando a temperaturas muy altas en la superficie.
5. Realizar obras de reciclaje de asfalto en caliente durante el invierno son perjudiciales para alcanzar la temperatura de 100°C para desprenderlo.

Hipótesis no. 1

Calentar el asfalto a 16 milímetros de profundidad a 100 °C para realizar el corte del reciclaje, es mejor que realizarlo a 25 milímetros de profundidad, porque requiere de menor tiempo y no se sobrecalienta la superficie por encima de los 200°C.

Metodología: Calentar una muestra asfáltica cilíndrica con sensores RTD a una profundidad 25 milímetros y tomar los resultados en base al tiempo necesario para alcanzar los 100°C y 120°C; En las mismas condiciones, pero a 16 milímetros de profundidad, realizamos lo mismo para determinar una conclusión.

Para determinar el número de la muestra se realizó el siguiente diseño.

Se determinó que la diferencia mínima significativa fuese del 30% y utilizando la fórmula de diferencias mínimas significativas:

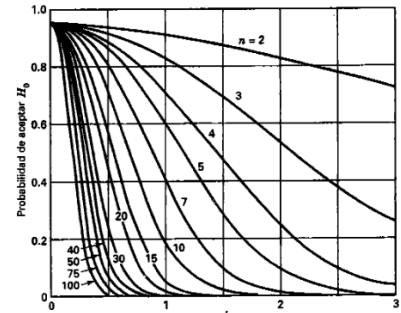
$$d = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{2\sigma} = \frac{0.30}{2\sigma} = \frac{0.15}{\sigma} = 1$$

$$\sigma = 0.15$$

La potencia de la prueba beta para el error tipo II se estima a un 95% y la fórmula es de $.95 = 1 - \beta$ y utilizando la gráfica del libro Montgomery figura 2-6 para determinar la muestra.

$$\beta = 0.05$$

$$\eta^* = 16$$



Tamaño de la muestra:

$$\eta^* = 2n - 1; \quad n = \frac{\eta^* + 1}{2} = \frac{16 + 1}{2} = \frac{17}{2} = 8.5$$

$$\eta = 9$$

Por lo que se utilizaran 9 muestras asfálticas para desarrollar el experimento.

Comportamiento de la temperatura en gráficas, de los 4 sensores, para las primeras 2 muestras a 25 milímetros de profundidad.

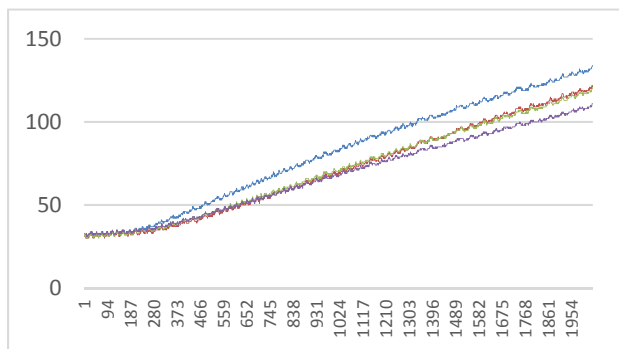
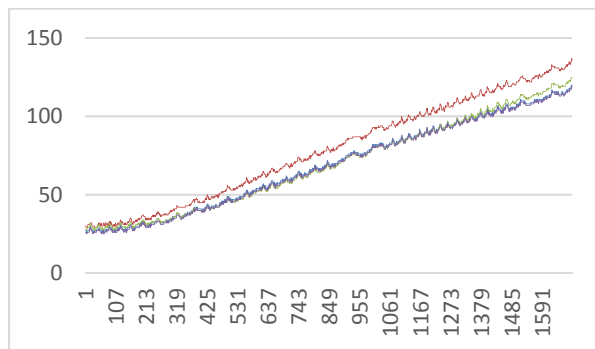


Figura 129. Gráficas de comportamiento de la temperatura contra segundos a 25 mm

Promedios de resultados de las 9 muestras y desviación estándar.

25 mm	100 °C	120 °C	xi-X	xi-X	(xi-X) ²	(xi-X) ²		
Prueba 1	28.12	36.00	3.21	4.26	10.28	18.15	Media para 25 mm a 100 °C	24.91
Prueba 2	21.95	27.53	-2.96	-4.21	8.78	17.72	Desviacion estandar	2.75
Prueba 3	26.42	33.70	1.51	1.96	2.27	3.84	Media para 25 mm a 120 °C	31.74
Prueba 4	25.80	33.02	0.89	1.28	0.79	1.64	Desviacion estandar	3.38
Prueba 5	20.75	27.03	-4.16	-4.71	17.33	22.18		
Prueba 6	25.75	32.85	0.84	1.11	0.70	1.23		
Prueba 7	26.68	33.93	1.77	2.19	3.12	4.80		
Prueba 8	21.50	27.65	-3.41	-4.09	11.65	16.73		
Prueba 9	27.25	33.95	2.34	2.21	5.46	4.88		
Suma					60.39	91.18		

Tabla 9. Tiempo en minutos para pruebas a 25 mm de profundidad

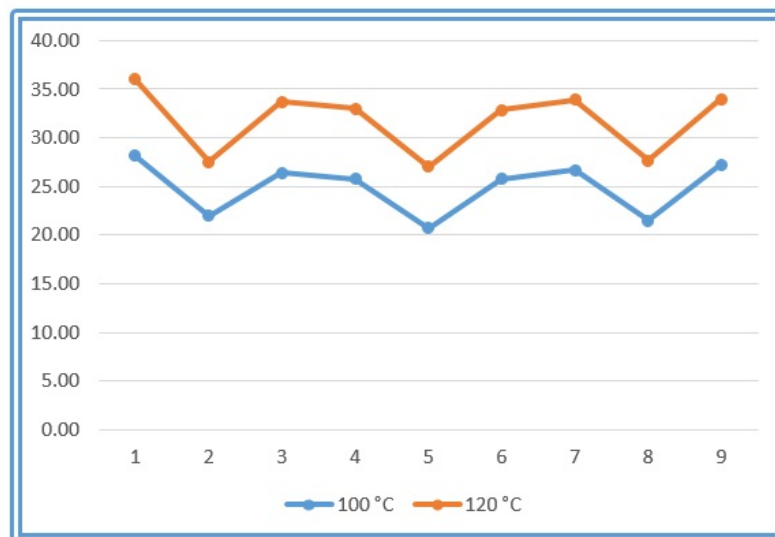


Figura 130. Gráfica de pruebas a 25 milímetros de profundidad

Para las pruebas a 25 milímetros, el promedio de la temperatura en la superficie de las muestras al llegar a la temperatura de 100 °C a los 25 mm de profundidad, fue de 207 °C y a la temperatura de 120 °C fue de 231 °C.

Comportamiento de la temperatura en gráficas, de los 4 sensores, para las primeras 2 muestras a 16 milímetros de profundidad.

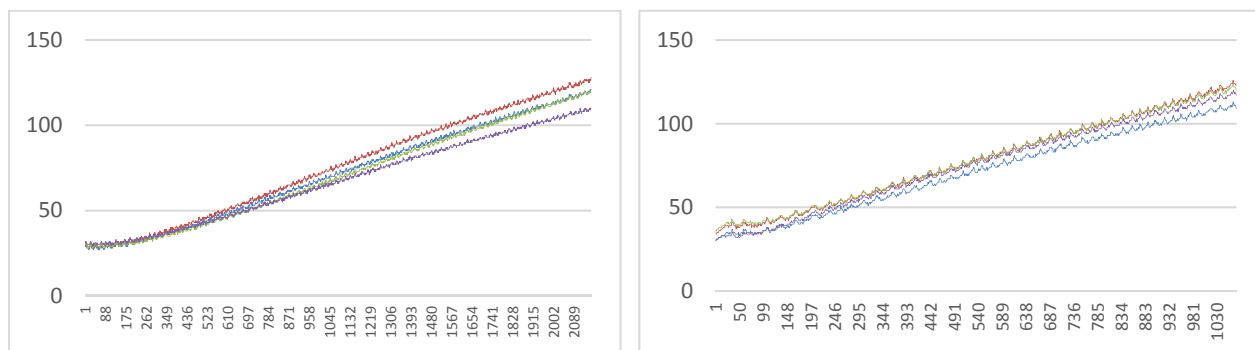


Figura 131. Gráficas de comportamiento de la temperatura contra segundos a 16 mm

Promedios de resultados de las 9 muestras y desviación estándar para las pruebas a 16 milímetros de profundidad.

16 mm	100 °C	120 °C	xi-X	xi-X	(xi-X) ²	(xi-X) ²
Prueba 1	22.05	27.08	1.19	0.49	1.41	0.24
Prueba 2	12.88	17.10	-7.98	-9.49	63.73	90.06
Prueba 3	22.07	25.03	1.20	-1.56	1.45	2.42
Prueba 4	21.43	29.22	0.57	2.63	0.32	6.90
Prueba 5	17.77	20.67	-3.09	-5.92	9.57	35.05
Prueba 6	24.20	32.97	3.34	6.38	11.13	40.70
Prueba 7	25.25	32.97	4.39	6.38	19.24	40.70
Prueba 8	16.30	20.20	-4.56	-6.39	20.82	40.83
Prueba 9	25.82	34.07	4.96	7.48	24.57	55.95
Suma					152.25	312.86

Media para 16 mm a 100 °C	20.86
Desviacion estandar	4.36
Media para 16 mm a 120 °C	26.59
Desviacion estandar	6.25

Tabla 10. Tiempo en minutos para pruebas a 16 mm de profundidad

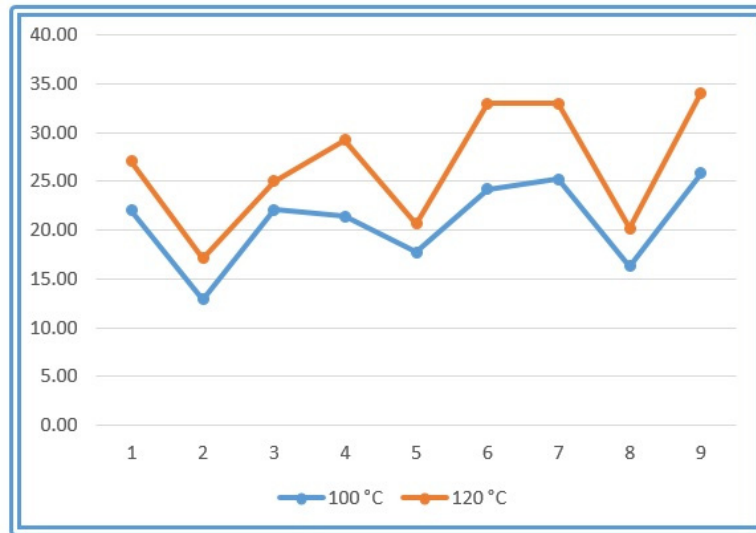


Figura 132. Gráfica de pruebas a 16 mm de profundidad

El promedio de la temperatura en la superficie de las muestras, al llegar a la temperatura de 100 °C a una profundidad de 16 milímetros, fue de 187 °C y a la temperatura de 120°C fue de 211 °C.

Conclusión: La diferencia entre las pruebas de 25 milímetros a 16 milímetros en tiempo, es de 4.05 minutos para alcanzar los 100 °C y 5.15 min para los 120°C donde existe una reducción promedio de 16% en tiempo para ambas temperaturas.

Cuando se alcanzaron los 100°C a una profundidad de 25 milímetros, la temperatura en la superficie llego a estar por encima de los 200°C, y en el caso de las muestras a 16 milímetros de profundidad estuvo debajo de los 200°C.

Este resultado es uno de los motivos, para concluir que es importante que las máquinas puedan contar con varias estaciones de cortes para estar en un punto medio, donde se necesite menor tiempo para trasferir la temperatura.

Hipótesis no. 2

Elevar la temperatura de calor en la obra acelera la trasferencia de calor, pero sacrifica la superficie de las calles elevando su temperatura por encima de los 200 °C, este se comparará con el anterior ejemplo de los 16 milímetros. Para esta prueba la metodología fue calentar una muestra asfáltica, con sensores de temperatura a una profundidad 16 milímetros y agregar el doble de apertura en la válvula del flujo del gas LP para lograr una mayor intensidad en el calor; Se tomaron los resultados del tiempo necesario para alcanzar los 100°C y 120°C en los sensores, El diseño de experimentos para el cálculo del número de muestra fue el mismo que para la hipótesis 1.

Comportamiento de las gráficas de los 4 sensores en las primeras 2 muestras

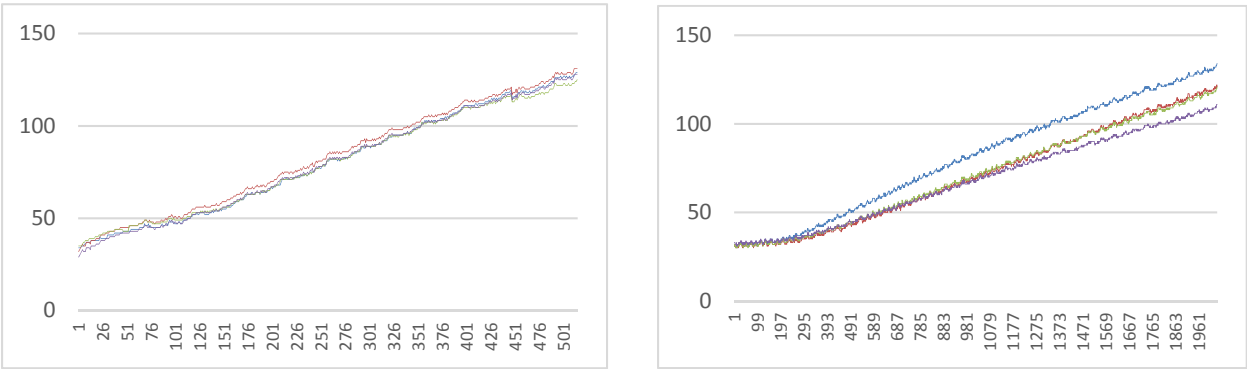


Figura 133. Gráficas de comportamiento a 16 mm de temperatura a mayor intensidad de calor

Promedios de resultados de las 9 muestras asfálticas y desviación estándar para las pruebas a 16 milímetros de profundidad.

16 mm	100 °C	120 °C	xi-X	xi-X	(xi-X) ²	(xi-X) ²
Prueba 1	5.87	7.97	-5.35	-6.14	28.66	37.70
Prueba 2	11.13	13.82	-0.09	-0.29	0.01	0.08
Prueba 3	11.17	13.87	-0.05	-0.24	0.00	0.06
Prueba 4	10.75	13.42	-0.47	-0.69	0.22	0.48
Prueba 5	11.02	13.73	-0.20	-0.38	0.04	0.14
Prueba 6	11.20	13.57	-0.02	-0.54	0.00	0.29
Prueba 7	13.00	16.93	1.78	2.82	3.16	7.95
Prueba 8	10.95	13.92	-0.27	-0.19	0.07	0.04
Prueba 9	10.57	13.62	-0.65	-0.49	0.43	0.24
Suma					3.94	9.28

Media para 16 mm a 100 °C	11.22
Desviacion estandar	0.75
Media para 16 mm a 120 °C	14.11
Desviacion estandar	1.15

Tabla 11. Pruebas a 16 mm a intensidad de calor

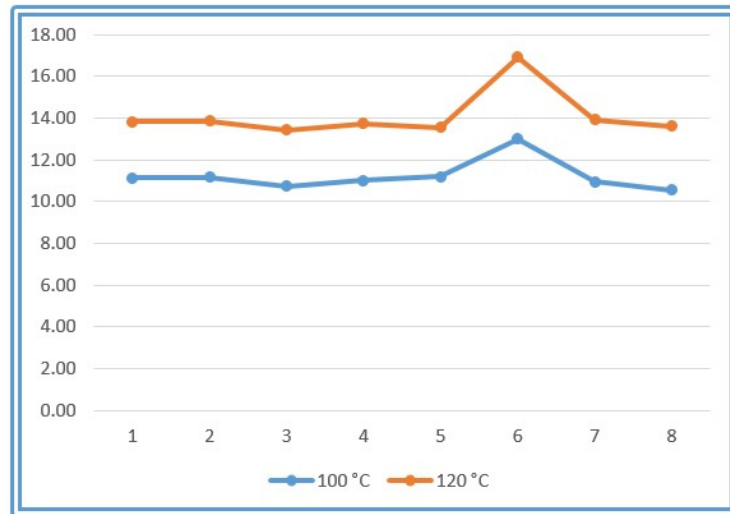


Figura 134. Gráfica de pruebas a 16 mm con alta intensidad

Conclusión: La diferencia de tiempos entre la prueba de 16 milímetros de baja y alta intensidad en la fuente de calor, fue de 9.64 minutos para alcanzar los 100 °C y 12.48 minutos para los 120°C esto equivale a un promedio del 46% de reducción en tiempo para ambas temperaturas, pero la temperatura en la superficie llego a un promedio de 253°C hasta poder transferir el calor de 100°C a 16 milímetros de profundidad y a 372°C a los 120°C.

Es importante tomar una estrategia durante el diseño de las máquinas y valorar económicamente la estrategia, porque otra posible solución para reducir el tiempo para la transferencia de temperatura, seria aumentar la intensidad de la fuente de calor en las máquinas, pero se sacrifica las propiedades mecánicas del material asfáltico, más aún esta oxidación producida en el asfalto se puede compensar con emulsión o rejuvenecedores agregados a la mezcla asfáltica recuperada. Que es una de las estrategias utilizadas por la empresa ARC Asphalt Recycling Inc.

Hipótesis no. 3

La transferencia de calor en las muestras asfálticas para el tipo PG64-22 no es lineal por lo que no es correcto realizar obras por debajo de los 50 milímetros, porque el proceso de transferencia es más lento.

La metodología fue calentar una muestra asfáltica, con 4 sensores de temperatura colocados a 15, 30, 45 y 60 milímetros de profundidad y registrar el tiempo necesario en cada sensor para alcanzar los 50 °C, la finalidad es observar cuanto tiempo se necesita para que cada sensor alcance los 50°C y que tan lineal es su relación en tiempo.

Comportamiento de 2 muestras realizadas.

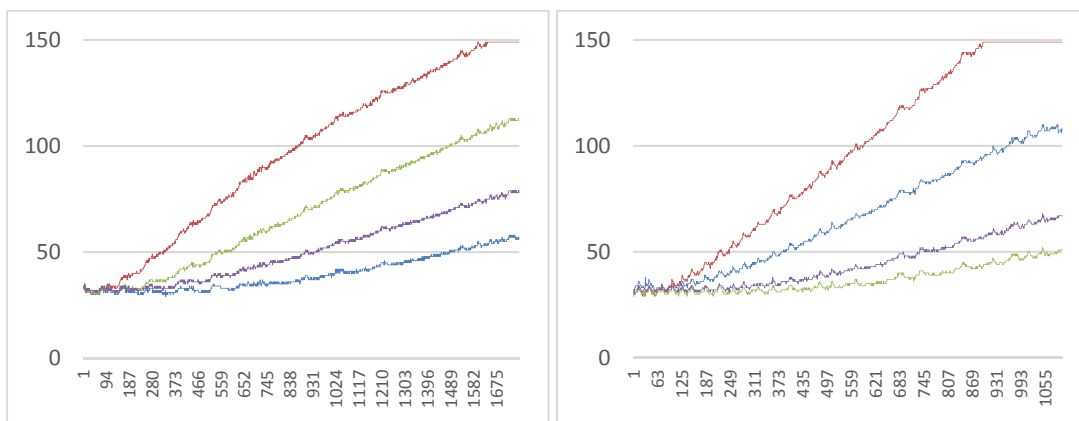


Figura 135. Gráficas de comportamiento a 15, 30, 45 y 60 mm de profundidad

Conclusión: El comportamiento de la transferencia de calor en el asfalto no es lineal, el resultado registro lo siguiente: El primer sensor colocado a 15 milímetros registros los 50°C al minuto 5, para que esta temperatura llegara al segundo sensor colocado a 30 milímetros tomo 8 minutos, para el tercer sensor al minuto 15 y para el cuarto sensor al minuto 24, las diferencias de tiempo entre un sensor con el anterior, lo podemos ver en la tabla 12. El tiempo necesario para la transferencia va incrementando y esto es perjudicial al intentar realizar un corte más allá de los 50 milímetros, porque se necesita más tiempo para alcanzar la temperatura de desprendimiento, si se desean elaborar obras a mayores profundidades de 50 milímetros, sería necesario bajar la

intensidad de calor de las camas de calentamiento de las máquinas y colocar 3 a 5 pre calentadores de baja intensidad, para lograr una transferencia correcta sin sobrecalentar la superficie. Solo que esto aumenta el costo de las energías necesarias para la obra. Aun así, esta formaría parte de una estrategia para alguna determinada obra donde las condiciones lo ameriten, una de ellas podría ser en ubicaciones donde el clima este a temperaturas bajo 0°C todo el año.

Sensor	Profundidad (mm)	Tiempo (min)	Diferencia (min)
Sensor 1	15	5	0
Sensor 2	30	8	3
Sensor 3	45	15	7
Sensor 4	60	24	9

Tabla 12. Diferencias de tiempo para la transferencia entre sensores

Hipótesis no. 4

Las obras de asfalto por debajo de 50 milímetros son perjudiciales para el asfalto, llegando a temperaturas muy altas en la superficie.

La metodología fue calentar una muestra asfáltica, con sensores de temperatura a una profundidad 50 milímetros y registrar el tiempo que se tarda para alcanzar los 100°C.

Resultados: Para que la temperatura de 100 °C llegue a una profundidad de 50 milímetros se necesita de 34 minutos y la superficie llega a los 322 °C

Conclusión: Este resultado complementa a la hipótesis 3, el tiempo necesario para la transferencia de calor va gradualmente aumentando a mayor profundidad, la conductividad térmica del material es alta para los propósitos de una obra de mantenimiento a carreteras.

Hipótesis no. 5

Realizar obras de reciclaje de asfalto en caliente durante el invierno son perjudiciales para lograr la temperatura adecuada para desprenderlo.

La metodología fue calentar una muestra asfáltica cilíndrica, con sensores de temperatura a una profundidad 16 milímetros y registrar el tiempo que se tarda para alcanzar los 100°C en invierno.

Resultados: Para una temperatura en el ambiente de 10°C se demoró 37.31 minutos para alcanzar los 100°C y para una temperatura ambiental de 20°C se demoró 16.03 minutos en comparación con una prueba anteriormente realizada, en temperatura ambiental de 35°C tuvo una duración de 11.2 minutos.

Conclusión: Es importante programar las obras de reciclaje en tiempo de verano donde la temperatura este entre (30°C – 45°C) esto sin exponer la salud de los trabajadores, incluso en un lugar como Mexicali B.C. se han registrado temperaturas de 35°C aun en horarios nocturno de 7:00 pm a 12:00 pm, esto ayudaría a ser posible realizar obras durante la noche para evitar el acumulamiento del tráfico y el efecto del calor del sol en los trabajadores.

Un punto importante que deriva de todas estas pruebas, es la conclusión de la ventaja que se puede tener, al diseñar un tren de maquinaria que sea provisto de varias estaciones de corte, donde algunos beneficios que pueden considerarse, al recurrir a un corte de menor profundidad; En este caso, tratamientos superficiales de 16 milímetros, serían los siguientes:

- Se requiere aplicar menor calor a una zona durante la operación.
- Menor fuerza requerida para desprender sus agregados, siendo factible el uso de escarificadores, en vez de rodillos con puntas de tungsteno.
- al requerir menor calor, se puede tener una mejor velocidad en la operación, menos recursos implicados para generar el calor.

9. Desarrollo y diseño de la maquinaria

Una vez realizada la investigación del estado del arte, se tienen varias necesidades que deben de cumplirse con el propósito de desarrollar la tecnología apropiada, para el tipo de trabajo que se necesita desempeñar. Existen operaciones que son indispensables para realizar el tratamiento de la carpeta asfáltica, y entre las operaciones más importantes están:

- La capacidad de la máquina, de generar el calor necesario para calentar el asfalto que se requiere desprender y mantener su temperatura.
- El mecanismo para lograr el desprendimiento.
- Tener la capacidad para agregar una emulsión; Acumular el asfalto recuperado en un bulto para su tratamiento.
- Tener la capacidad de mezclar los asfaltos recuperados con el nuevo material.

Y de estas operaciones se originan otras necesidades. No todas las obras de mantenimiento son iguales, es difícil caracterizar el tipo de obras; Si es necesario generalizar, existen 3 obras que deben presentarse, una es el reciclaje al 100% de la carpeta asfáltica, la segunda es el reciclaje de la calle seleccionada y agregar mezcla asfáltica nueva al proceso y la última es realizar una capa de asfalto 100% recuperado y encima de esta capa, se agrega una capa de mezcla asfáltica nueva. La máquina que se mostrará a continuación tendrá la función de poder desarrollar estas 3 obras. En la figura 136 podemos ver cómo fue seleccionado el arreglo para este diseño propuesto. Podemos ver 3 estaciones agrupadas y en base a los resultados obtenidos en los experimentos del capítulo 8, se decidió desarrollar un equipo con 3 estaciones, para realizar 3 cortes a 16 milímetros. En un concepto estricto las 3 máquinas son iguales, pero a diferencia, en la primera estación, la máquina no cuenta con banda transportadora y esto es debido a que en las estaciones posteriores es necesario ir levantando el asfalto recuperado de la estación previa. Al final el proceso logra un corte acumulado de 50 milímetros.

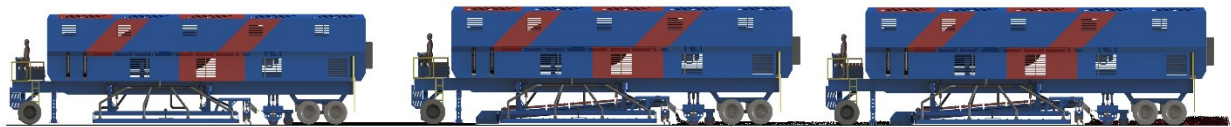


Figura 136. Arreglo de maquinaria propuesta



Figura 137. Vista general de la máquina diseñada

En la figura 137 podemos ver una vista general de como quedo la máquina diseñada, esta será explicada por secciones.

Estructura de cama de calentamiento (UABCE-E11)

La selección de la fuente de calentamiento fue por medio de infrarrojos, por combustión de gas LP y esto se debió a que este tipo de fuente de calor es intensa y esta intensidad puede regularse; Los beneficios de este tipo de calentamiento, se debe, a que es posible realizar una obra en una zona con clima frio, y el exceso de calor sobre el asfalto en zonas con clima cálido, es posible agregar una emulsión para rejuvenecer el asfalto recuperado, además al disminuir la profundidad del corte, se reduce la necesidad de aplicar calor por más tiempo a la carpeta asfáltica.

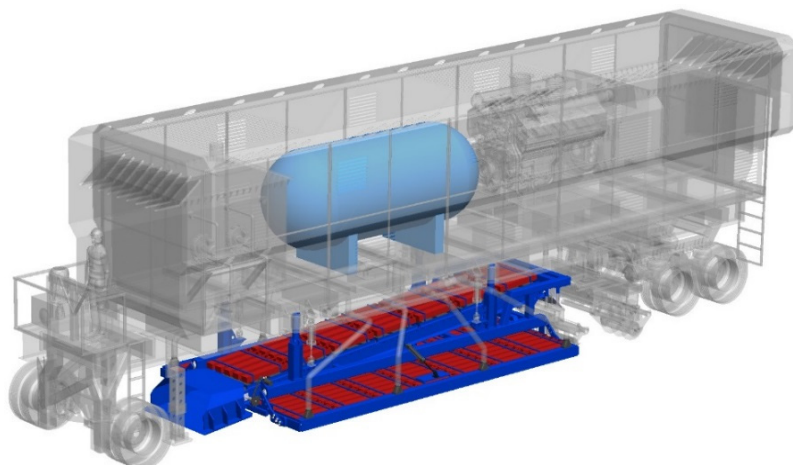


Figura 138. Estructura de la cama de calentamiento

En la figura 138 podemos ver la cama de calentamiento; Existen dispuestas 2 camas, la que tiene la posición inferior es la cama principal; Podemos ver en color rojo las celdas de calentamiento y la estructura es la de color azul, por encima de esta cama, existe un transportador, que recoge el asfalto recuperado de la máquina anterior, el asfalto entra por la boca o apertura de entrada de color azul, esta apertura se puede observar en la figura 139, al tiempo en que el asfalto recuperado es transportado por la banda, la máquina sigue calentando el material con unas celdas de calentamiento a lo largo de la banda transportadora.

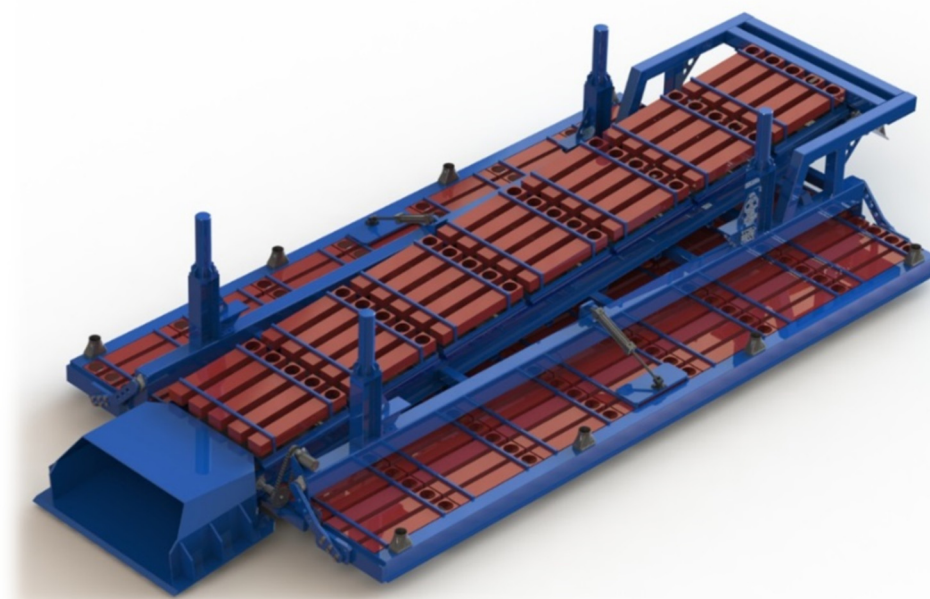


Figura 139. Cama de calentamiento vista general

Como se mencionaba la primera máquina no requiere la banda transportadora, es por este motivo que existe una variación entre la primera estación y las posteriores.

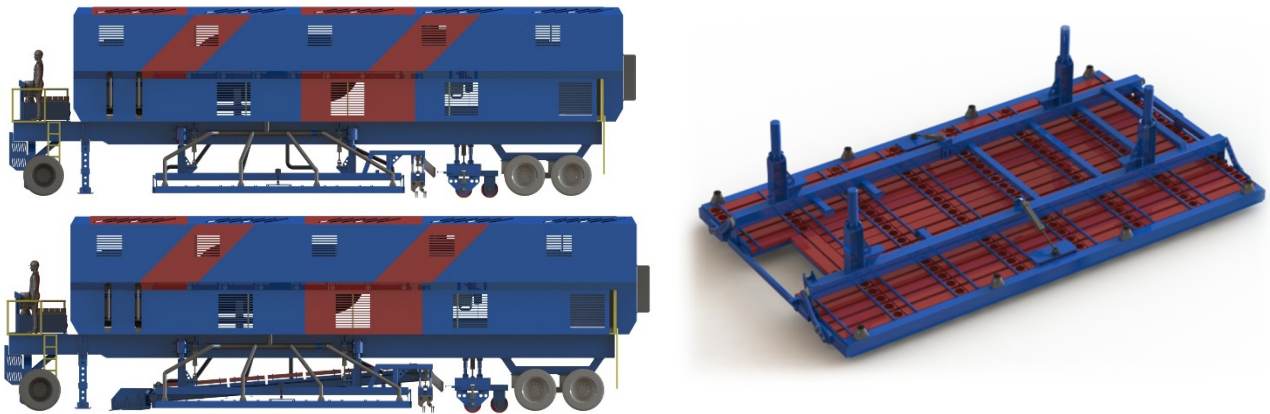


Figura 140. Versión de la cama de calentamiento sin banda transportadora

En la figura 139 está la versión de la cama completa y en la figura 140 podemos observar la variación entre la primera estación (imagen superior) y una estación posterior (imagen inferior), solo la primera estación no requiere de la estructura de la banda transportadora. En la figura 140 podemos ver la primera estación en una vista isométrica.

Una de las funciones de esta cama es que puede desplegarse y el objetivo es compactar la estructura cuando se desea transportar la maquinaria de una obra a otra. Esta operación es realizada por unos pistones hidráulicos y el resultado de esta compactación la podemos ver en la figura 141.



Figura 141. Vista isométrica de la primera estación

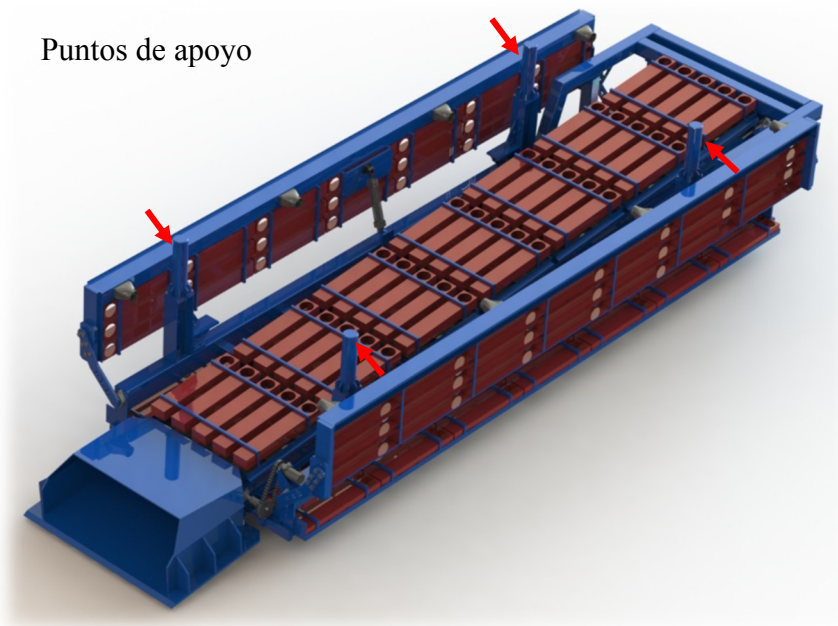


Figura 142. Cama de calentamiento compactada

Otro objetivo de que la cama pueda compactarse, es que pueden deshabilitarse las celdas de las camas plegables, para lograr una variación en el ancho de la operación, la cama puede operar en un mínimo de 2.3 metros a 3.5 metros. La cama tiene 4 puntos de apoyo para evitar la vibración, como lo muestra la figura 142 y estos pivotes se conectan a la estructura principal. (figura 141)

Estructura de escarificadores (**UABCE-E03**)

Después de la cama de calentamiento tenemos los dedos escarificadores que son los encargados de desprender el material asfáltico a recuperar. En la figura 143 podemos ver su ubicación dentro del diseño de toda la máquina.

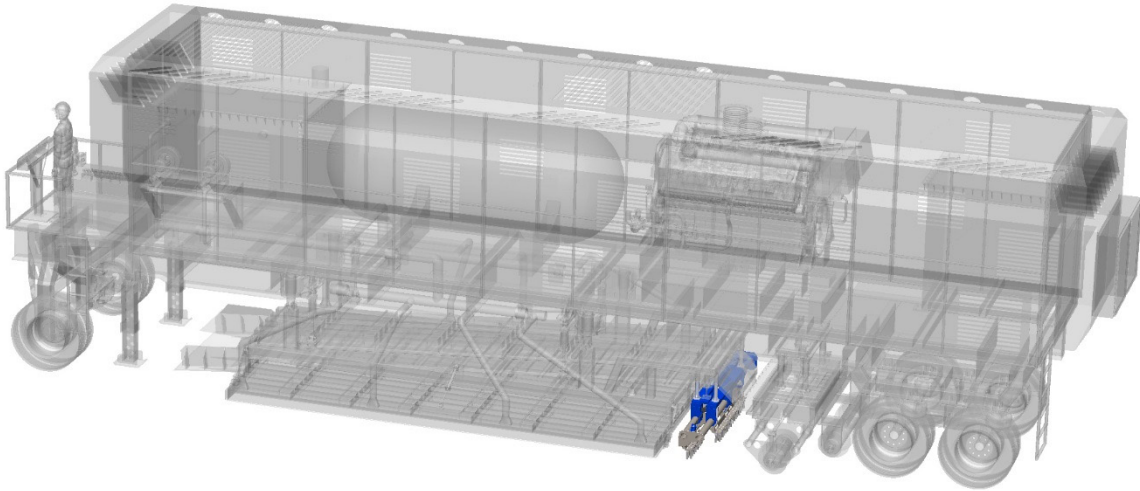


Figura 143. Ubicación de los escarificadores

Los dedos escarificadores son piezas de acero con tratamiento térmico de cementación y con puntas afiladas, como se muestran en la figura 144.

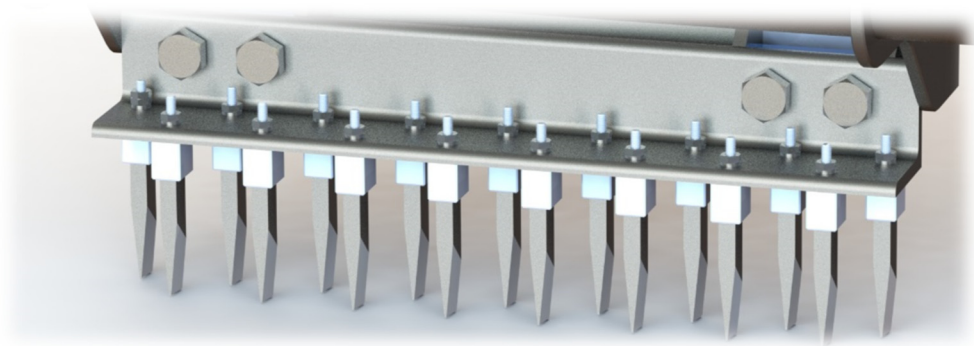


Figura 144. Dedos escarificadores

Cada dedo está separado entre sí, a 1.75 de pulgada y a lo largo de toda la estructura están dispuestos 68 escarificadores, en la figura 145 podemos ver toda la estructura de los dedos escarificadores, al lado izquierdo está abierta a un máximo de 3 metros y se puede compactar a un mínimo de 1.7 metros, esta estructura puede ser ajustada, con el propósito de operar en función del ancho de la calle, aun así, la máquina tiene el espacio disponible para poder incrementarlo a una operación de 4 metros.

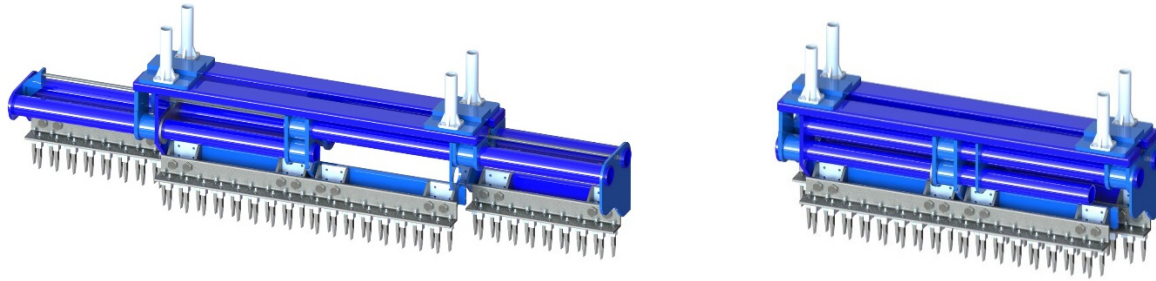


Figura 145. Estructura de los dedos escarificadores abierta y compactadas

La estructura de los dedos escarificadores esta acoplada al final de la estructura de la cama de calentamiento, como se ve en la figura 146, por medio de 4 punto de apoyo para evitar la vibración.

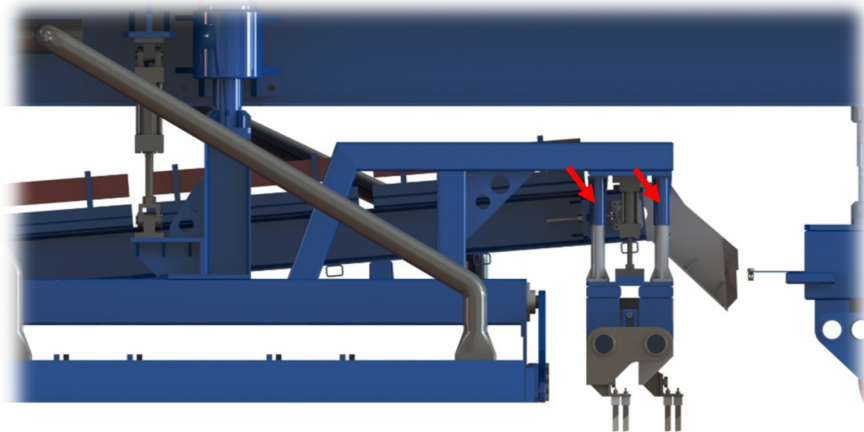


Figura 146. Estructura de escarificadores acoplada a la cama

Estructura de ejes de gusanos (UABCE-E05)

Los rodillos de gusanos tienen la función de ir acumulando el asfalto recuperado al centro de la máquina, generando un bulto que después será recogido por una máquina posterior.

En la figura 147 podemos ver la ubicación de estos gusanos.

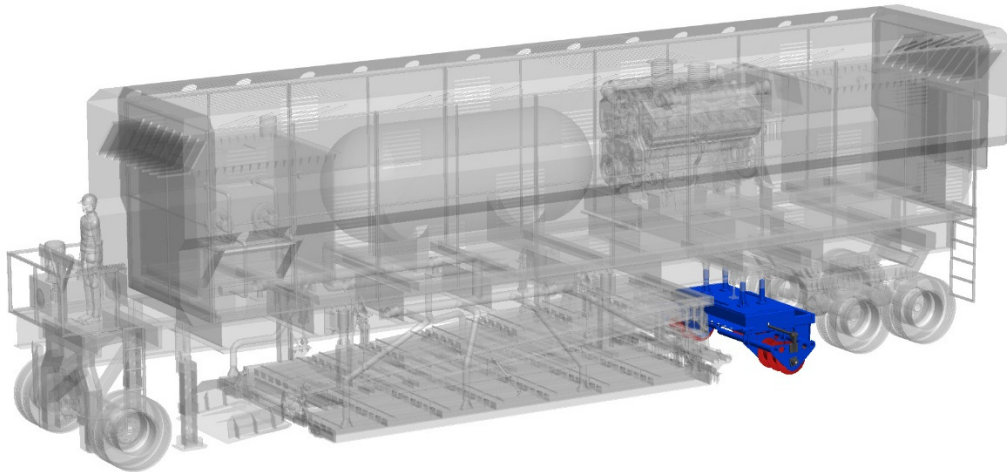


Figura 147. Ubicación de los rodillos de gusano

Al igual que los dedos escarificadores y la cama, esta estructura puede compactarse para su operación o para propósitos de compactar toda la estructura para el transporte de obra en obra. En la figura 148 podemos ver como los gusanos están dispuestos tanto en la forma abierta y cerrada. Cuando están cerrados tiene una distancia de operación de 2 metros y cuando están abiertos de 3.3 metros.



Figura 148. Rodillos de gusanos extendidos y compactos

Toda esta estructura esta soportada por 4 apoyos (figura 148) y están dispuestos en la estructura principal de la máquina como se muestra en la figura 149.

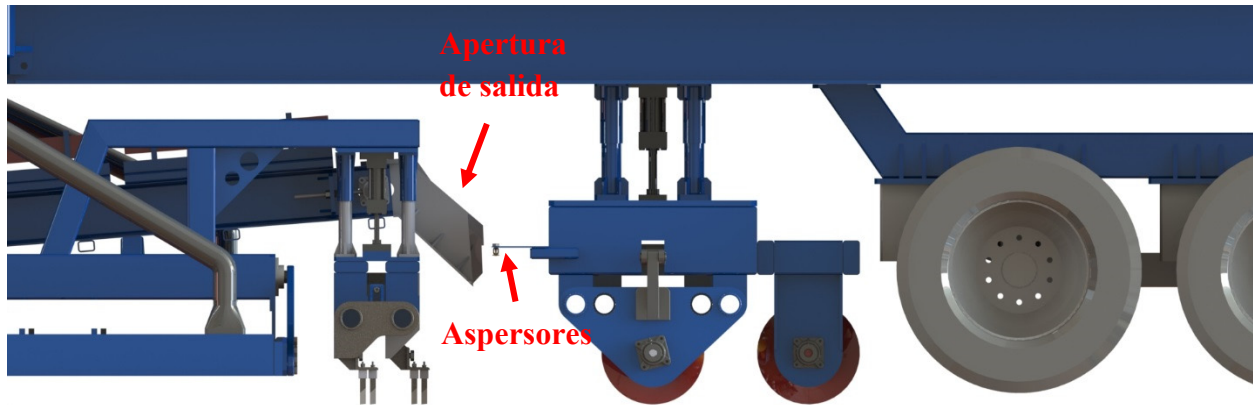


Figura 149. Estructura de rodillos gusanos en soportes

Entre la estructura de los escarificadores y la estructura de los rodillos de gusanos, están dispuestas 2 funciones, una de ellas, es la apertura de salida de la banda transportadora que arroja el asfalto recuperado por detrás de los dedos escarificadores y enfrente de los rodillos de gusano, la segunda, son los aspersores del rejuenecador, localizados 12 de ellos a lo ancho de la máquina.

La cama de calentamiento, los dedos escarificadores y los gusanos, son mecanismos que deben ser coordinados para su operación. En la figura 150 podemos ver la integración de estos 3 mecanismos; La operación debe ser coordinada en relación al corte, la cama de calentamiento tiene 4 pistones hidráulicos, que bajan toda la cama junto con la estructura de los escarificadores; Aun así, la estructura de los escarificadores tiene 2 pistones hidráulicos que bajan y suben su estructura. Los rodillos de gusano son una estructura aparte, pero debe también coordinarse la altura junto con los dedos escarificadores.

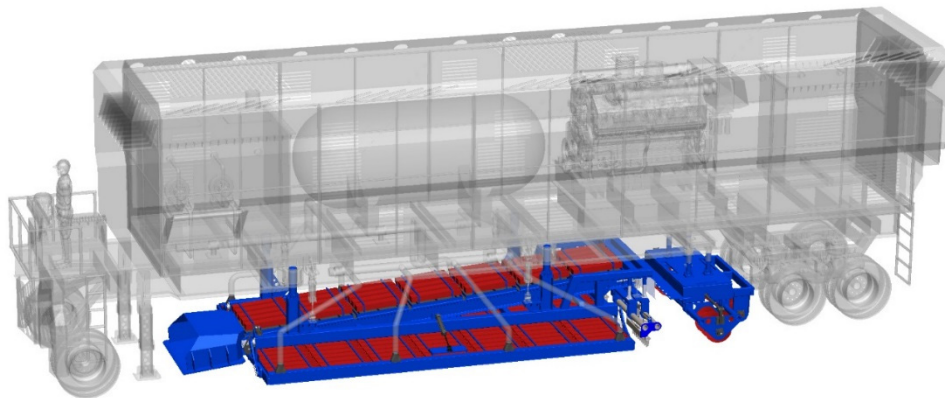


Figura 150. Sistema de calentamiento, escarificación y gusanos

En la figura 151 podemos apreciar de color negro los pistones hidráulicos que cargan las estructuras, los diámetros de sus émbolos fueron calculados para soportar el peso de las estructuras. En Anexo 11 se encuentra la memoria de cálculo.

En la figura 152 podemos ver las estructuras que se han descrito anteriormente en conjunto, cuando están extendidas (imagen superior) y cuando están compactadas (imagen inferior)

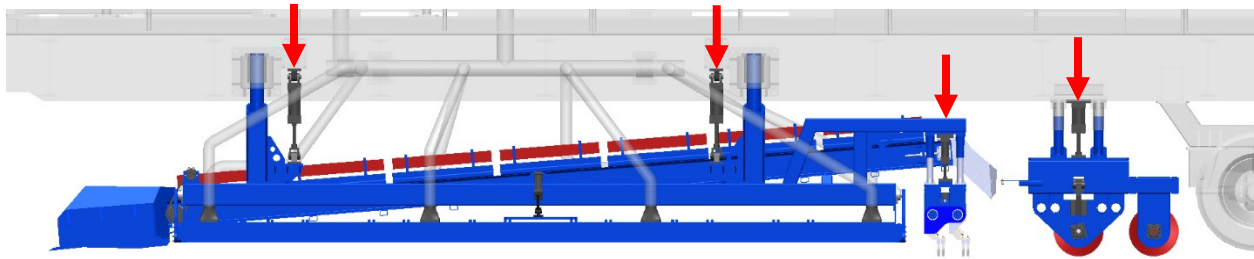


Figura 151. Soportes de pistones hidráulicos

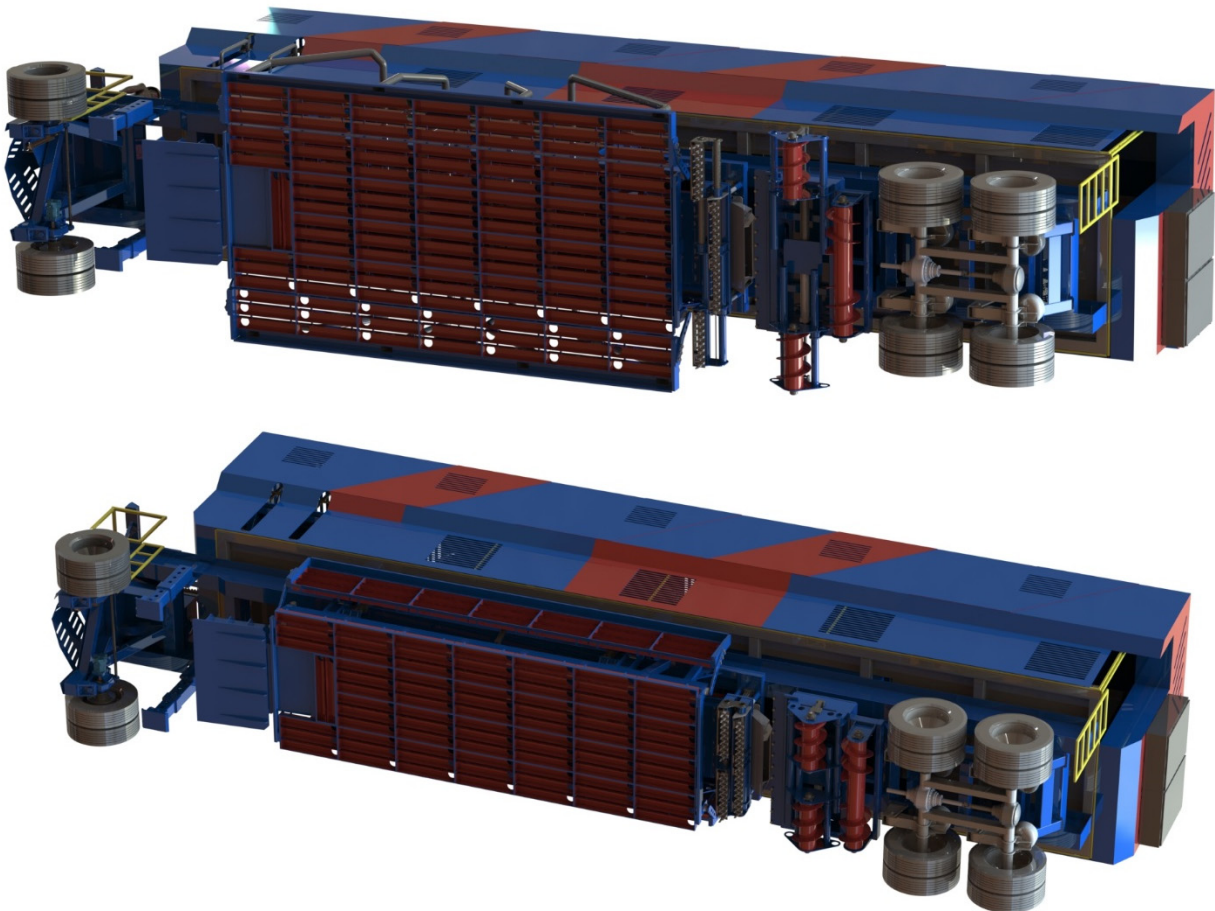


Figura 152. Vista inferior de las estructuras compactas y abiertas

En la figura 153 podemos apreciar cuando las estructuras están compactadas, no sobrepasan los límites del ancho de la máquina, inclusive están más cortas que el ancho total de la máquina, siendo posible una extensión de las estructuras su fuese necesario, para incrementar el ancho de la operación.



Figura 153. Vista inferior con las estructuras compactadas

La finalidad de toda la estructura es poder bajar hasta los 50 milímetros, pero los pistones pueden llegar hasta los 60 milímetros, como parte de una compensación si lo requiere.

Estructura de ejes delanteros y traseros (**UABCE-E19 y UABCE-E12**)

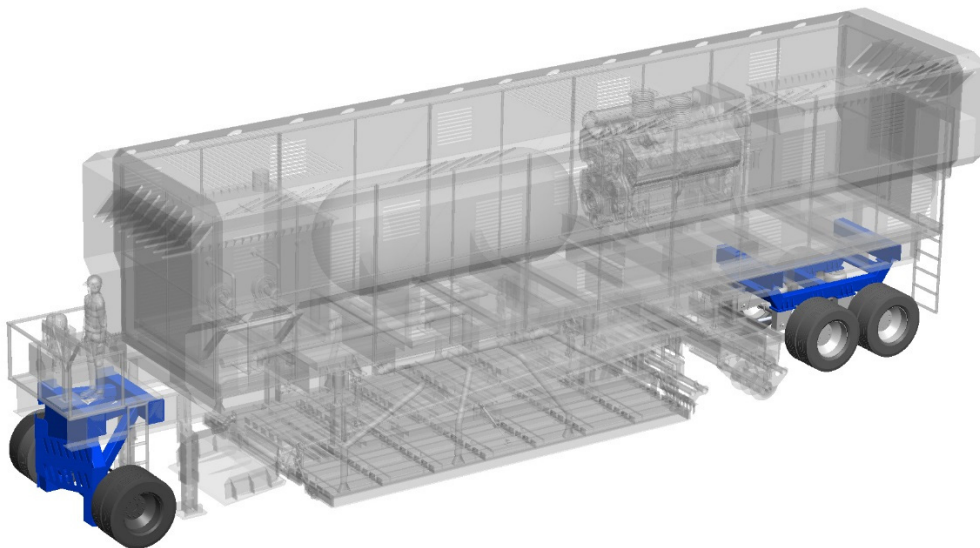


Figura 154. Ejes de neumáticos

(Figura 154) La maquinaria esta provista con 2 ejes de apoyo, en la parte trasera tiene 2 ejes con 4 neumáticos de 43 pulgadas de diámetro cada eje y son los que dan tracción, ambos vienen

provistos de diferencial para su propósito; En la figura 153 podemos ver la vista inferior, donde muestra los diferenciales y en el caso del eje frontal tiene 4 neumáticos, y está provisto de manera opcional: tener solo un pistón para girar la dirección de la máquina y/o agregarle un motor hidráulico, para darle tracción; El motor hidráulico podría necesitarse para obras donde la ruta de la calle estén en una pendiente muy inclinada. En la figura 155 podemos ver esta disposición entre el pistón y el motor hidráulico que da tracción a un eje. Una característica del eje frontal es que puede ser desmontado (figura 156) para poder acoplar el resto, a un tracto camión, para jalar toda la estructura y transportarla hacia una obra. En la figura 157 podemos ver la máquina lista para ser transportada por un tracto camión.

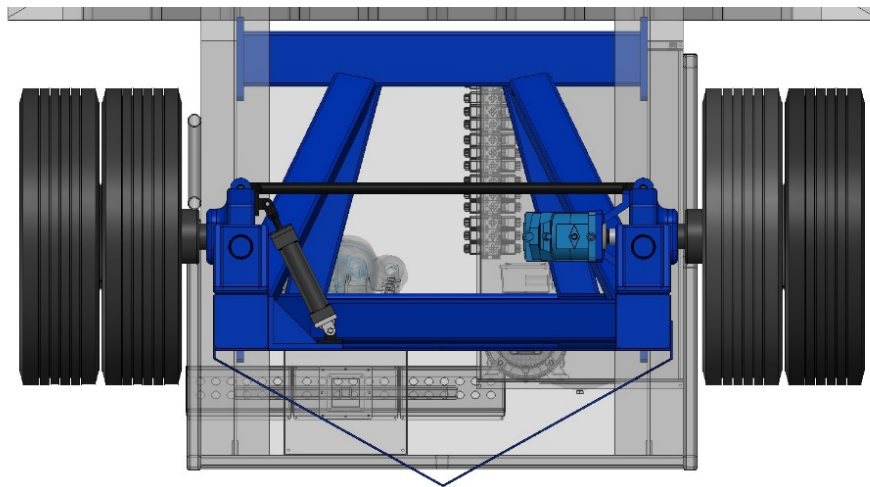


Figura 155. Pistón y motor hidráulico

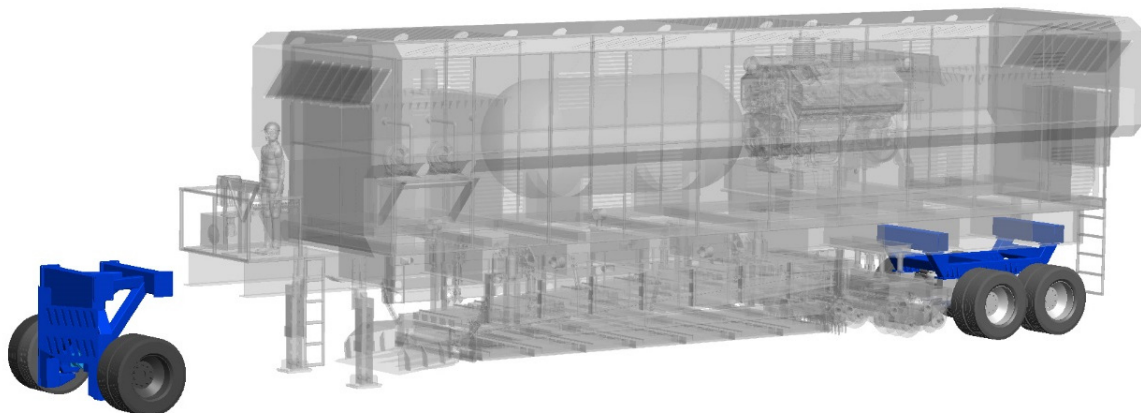


Figura 156. Ejes frontales desmontable



Figura 157. Máquina compactada y sin ejes frontales

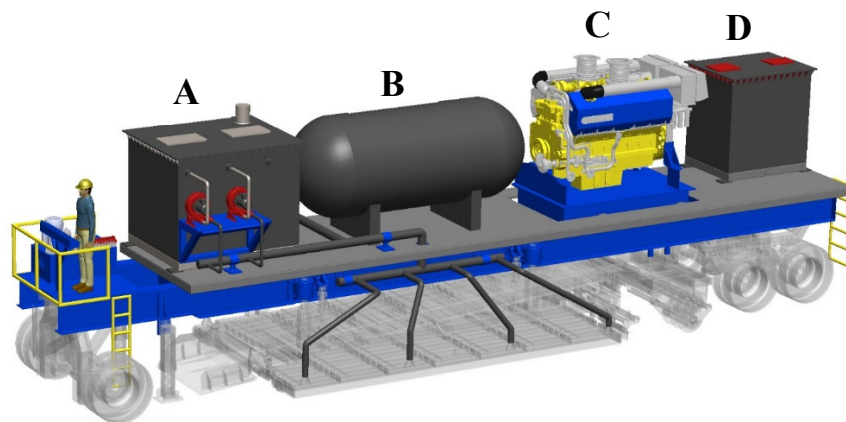


Figura 158. Equipos adicionales

Equipo complementario (UABCE-E22)

Parte del equipo que fue considerado para el funcionamiento de la maquinaria, lo podemos ver en la figura 158, donde el equipo (A) en la figura, representa al incinerador, este tiene la función de succionar los humos por los laterales de la cama de calentamiento y los lleva al depósito (A), en cuanto al equipo (B), es el tanque de gas LP dispuesto a tamaño de un tanque para 3000 lts, el equipo (C) es un Motor Cummins® diésel, y (D) es el depósito de emulsión o rejuvenecedor. Estos equipos fueron dispuestos en tamaño promedio, no fueron definidos los modelos dentro de los

alcances de la tesis, pero fue considerado su dimensión para definir el área geométrica de la máquina.

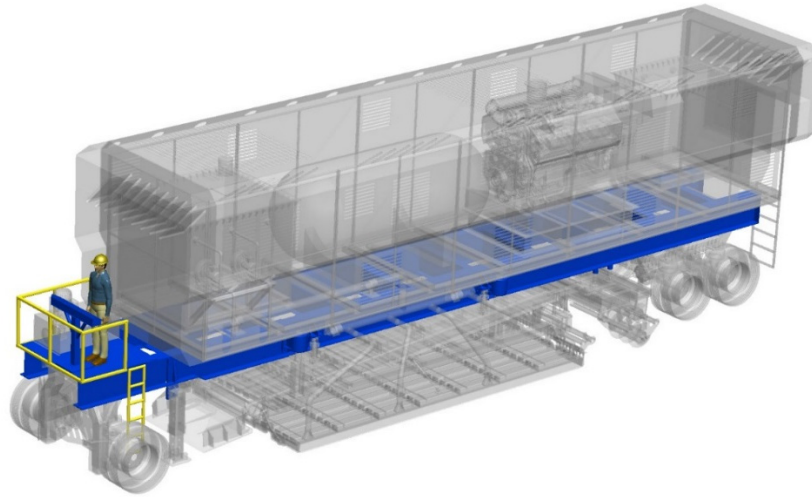


Figura 159. Estructura principal de la maquinaria

En la figura 159 podemos ver la estructura principal que soporta toda la máquina, está hecha por medio de 2 vigas personalizadas que van a todo lo largo de la máquina. Estas vigas fueron diseñadas para soportar las cargas de los pesos involucrados en la máquina. Y para comprobarlo se realizó un análisis estructural, estimando todos los pesos involucrados, además de considerar las cargas adicionales, como combustible, gas y mezcla asfáltica; Una vez estimados todos los pesos se realizó un análisis de estática para distribuir las fuerzas, este análisis se encuentra en anexo 11. Para comprobar los resultados también se utilizó el programa Solidworks® NDSolid® y SkyBIM®, donde se corroboró el esfuerzo máximo sobre la viga a 3,661 psi y el límite elástico del material es de 36,300 psi y para estas condiciones tenemos un factor de seguridad de 9.91 por lo tanto, las vigas están soportando un 10% de su capacidad antes del límite elástico. En la figura 160 podemos ver un panorama general de los mecanismos que fueron comprendidos para el análisis de los esfuerzos sobre las vigas, En anexo 11 podemos ver el proceso que se ha seleccionado para la manufactura de las vigas debido a que sus dimensiones están fuera de las vigas comerciales.

En anexo 10 están los planos generados, en un orden jerárquico de sub ensambles, con una administración de números de parte, nombre y cantidades. En la figura 161 podemos ver el tren de

maquinaria diseñado para realizar una obra a 50 milímetros de profundidad, con la oportunidad de poder agregar otra máquina para realizar cortes a mayor profundidad.

Un área de oportunidad para este proyecto, es el diseño del mezclador de asfaltos, que sería la máquina que recogería todo el asfalto recuperado por esas máquinas, y debe tener la capacidad de poder recibir material asfáltico nuevo para su mezcla, esta máquina debe transportar el material mezclado a un pavimentador comercial para colocar la mezcla sobre la carpeta asfáltica.

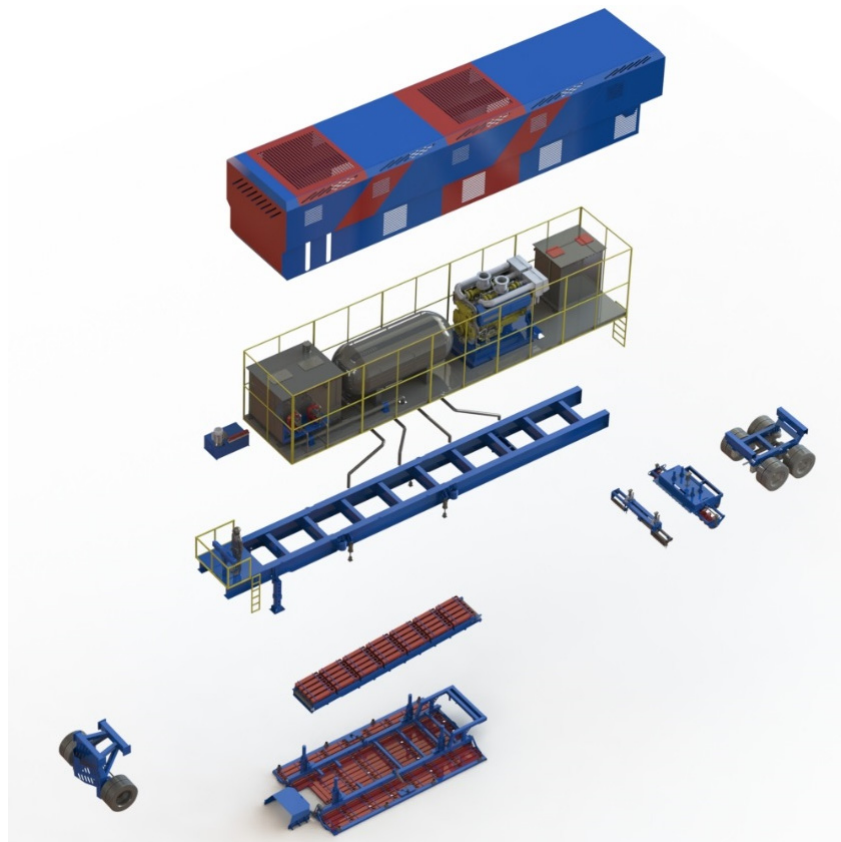


Figura 160. Sub ensambles generales de la máquina

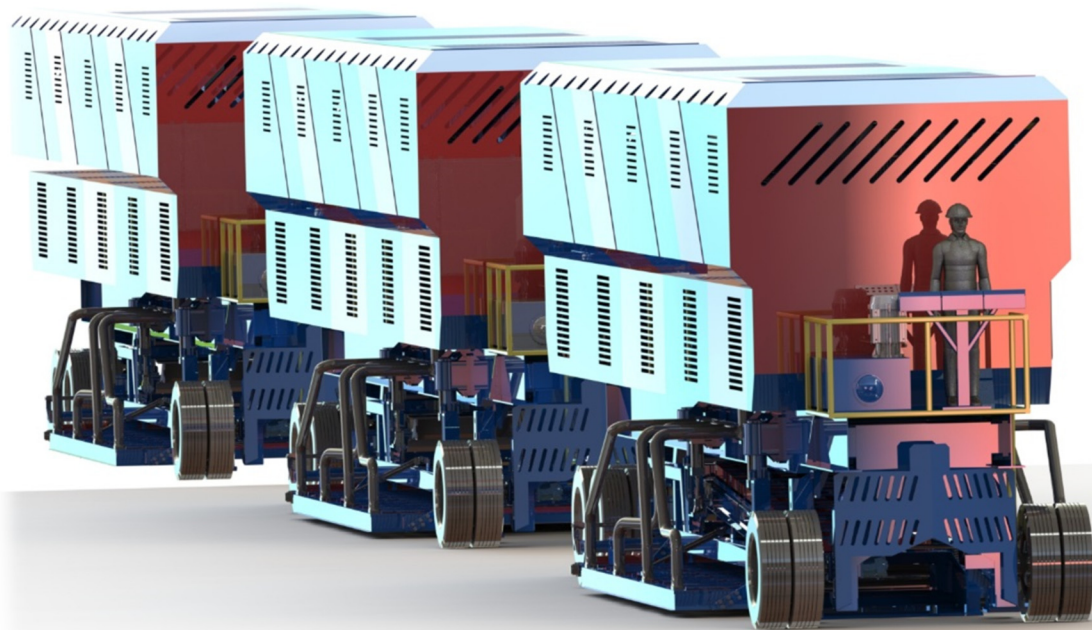


Figura 161. Tren de 3 estaciones de corte

CONCLUSIÓN

A través de los resultados de la presente tesis, se concluye, que las formas de llevar a cabo las obras de mantenimiento en las superficies asfálticas de las calles, no son iguales en ninguno de los casos y esto se debe a un gran número de factores, que van desde la zona geográfica y las numerosas condiciones en las que se puede presentar la calidad de la carpeta asfáltica de una calle, esta variación lleva a los contratistas a desarrollar un gran número de estrategias.

Es complejo afirmar que una tecnología es la solución para todos los casos; Lo que sí es un hecho, es la necesidad mundial, por cuidar estratégicamente los recursos materiales, en el caso de la infraestructura de las calles, no solo es una cuestión de una mejor calidad de vida para las personas, sino que, de manera conjunta, forma parte de los beneficios geoestratégicos para que un Estado pueda competir en un mundo globalizado.

En países que buscan emerger sus economías, es indispensable buscar su autosuficiencia en necesidades básicas; Con el propósito de encender los motores económicos internos. En este caso en particular tanto entidades gubernamentales como la Iniciativa Privada Nacional, pueden beneficiarse, en el desarrollo de esta tecnología; Las calles de asfalto que actualmente existen van a estar funcionando y la necesidad de que sigan funcionando para beneficio de la sociedad y de la actividad económica del Estado, hacen que, del tema de mantenimiento a carreteras, pueda surgir un interés de beneficio colectivo para la Ciencia y desarrollo, Gobierno y Sociedad.

Los planos para la fabricación de la maquina fueron cotizados para realizar un presupuesto; La fabricación de sus mecanismos esta cotizado por un taller en Mexicali B.C. México a un costo de \$150,000 USD, este incluye la fabricación de la estructura y componentes mecánicos de acero, así como su ensamble. Se requiere de la compra de otros mecanismos como los ejes trasero y delantero, neumáticos, el incinerador, Motor Diésel, unidad hidráulica y actuadores, calentadores infrarrojos, además de otros accesorios. El precio de estos aditamentos ronda a un total de \$350,000 USD siendo un subtotal de \$500,000 USD; Este abarca la fabricación, compra de aditamentos y ensamble. Considerando el desarrollo de ingeniería faltante y costos administrativos. El total del desarrollo de esta máquina rondaría \$800,000 USD. Faltaría estimar la ganancia esperada e impuestos. Un comparativo para el costo, podría ser con la maquina Ecopave 400, que ronda en

los \$3,000,000 USD por unidad, esta máquina es fabricada en Canadá, donde la mano de obra tiene un mayor costo.

Hay que considerar que estos costos, fueron presupuestados para una sola máquina, para este proceso se requieren de 3 máquinas para generar 3 cortes, agregando los costos de estas 2 máquinas adicionales sería de \$1,800,000 USD.

Otra área de oportunidad son los derechos de software, modelos de aplicación y patente.

Dentro de los alcances de la presente, se obtuvo los derechos de autor de software para monitorio de transferencia de calor a muestras asfálticas con un horno; Aun así, el siguiente paso sería agregar un aditamento a la máquina, para realizar las pruebas en campo, donde se tendría la capacidad de realizar pruebas a muestras asfálticas extraídas y analizarlas durante la operación, y poder ir ajustando los parámetros de temperatura de calentamiento; Este dispositivo electrónico estaría sujeto a patente y a derechos de autor sobre el software desarrollado.

En el campo de las mezclas asfálticas, para este proceso de mantenimiento, es posible agregar aditamentos a las máquinas o agregar una máquina mezcladora al proceso, creando oportunidad a modelos de aplicación o patentes, con la finalidad de incorporar agregados al material asfáltico, por ejemplo: Agregar fibra de vidrio al asfalto; Provee de mayor durabilidad, dosifica mejor el cemento asfáltico, incrementa la capacidad de tensión superficial, mitiga el agrietamiento, entre otros, o inclusive resolver otros problemas ecológicos como el exceso de llantas arrojadas en terrenos o centros de acopio, si se produce una fábrica para triturar estas llantas, el hule puede ser incorporado a los asfaltos, y está probado en campo que el hule dentro de los materiales de la mezcla asfáltica, reduce la necesidad de aportar mayor asfalto virgen; En una obra se registró la reducción de un 75% del material requerido y se realizó una comparación después de 15 años; El hule redujo considerablemente el agrietamiento en la calle en comparación con otra calle sin hule.

La presente solución, es una propuesta de investigación, encaminada a formar parte de las estrategias del Estado y la Iniciativa Privada, para equilibrar la balanza de la dependencia tecnológica con otras Naciones y buscar dentro del capitalismo el desarrollo de ciencia y tecnología

para cubrir nuestras propias necesidades; Generando en nuestra propia nación, una tecnología que resuelva nuestros problemas y una experiencia que podamos exportar a otras naciones.

Nuestra nación necesita volar con su propia tecnología, en un mundo como hoy, no basta con ser el mejor, necesitamos ser a través de la innovación continua, los únicos.

REFERENCIAS

- Agencia EFE. (2017, Nov 10). *El C919 chino realiza con éxito su primer vuelo de prueba de larga distancia*. Obtenido de <https://www.efe.com/efe/america/tecnologia/el-c919-chino-realiza-con-exito-su-primer-vuelo-de-prueba-larga-distancia/20000036-3434189>
- Armenta, H. (Noviembre 27, 2013). *Infraestructura carretera y competitividad*. (Forbes) Obtenido de <https://www.forbes.com.mx/infraestructura-carretera-y-competitividad/>
- Aurelio Ruíz, I. P. (2002). *Influencia de los Betunes en las Deformaciones Plásticas de las Mezclas Bituminosas*. España: Ministerio de Fomento.
- Backhoff, M. (2005). *Transporte y espacio geográfico* (Vol. Primera edición). México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de http://www.posgrado.unam.mx/publicaciones/ant_col-posg/28_Transporte.pdf
- Balbuena, J. (2014). *El transporte rural en los municipios más pobres de México* (Vol. Publicación técnica no. 403). Sanfandila, Qro, México: SCT. Obtenido de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt403.pdf>
- Baoshan Huang, E. T.-Q. (2010). *Paving Materials and Pavement Analysis*. Virginia, USA: ASCE. Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784411049>
- BC-MOT. (2008, June 2). End product specification for hot-in-place recycled asphalt pavement. p. 1-17.
- BEA securities. (2013, June 14). *Provides asphalt pavement maintenance service and manufactures asphalt pavement*. Obtenido de <https://www.easecurities.com.hk/en/Research/ipo/ipo06888.pdf>
- BENEDETTI. (s.f.). *Mobile friendly website coming soon*. Obtenido de <http://www.angelobenedetti.com/gallery.php>
- Bennett, C. (2000). *International Study of Highway Development and Management tools (ISO HDM)*. United Kingdom.
- Bolzan, P. (2011). *Reciclado de mezclas asfálticas en caliente Ex situ*. Boletín informativo 02.
- Brock, D. (1997). *Fresadora y reciclaje* (Vols. Bpletín técnico T-127S). ASTEC. Obtenido de <https://www.scribd.com/document/143820006/Fresado-de-Pavimentos>
- Business Wire. (2016, November 21). *First Hot-in-Place Recycling Technology Monograph by Freetech Has Been Officially Published*. Obtenido de First Hot-in-Place Recycling Technology Monograph by Freetech Has Been Officially Published

- Caltrans. (s.f.). *Maintenance technical advisory guide (MTAG)*. MileB.
- CANACEM. (2 de Agosto 2014). *Pavimentos, tipos de pavimentos*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/Yoelbin/pavimento-37600329>
- ChartsBin. (2011). *Roads Paved(% of Total Roads) by Country*. Obtenido de <http://chartsbin.com/view/37627>
- Chowdhury, T. (2012, November). *A guide to evaluating pavement distress through the use of digital images*. Virginia: VDOT. Obtenido de http://www.virginiadot.org/business/resources/local_assistance/A_Guide_to_Evaluating_Pavement_Distress_Through_the_Use_of_Digital_Images_v2.6_1.pdf
- Concrete. (2014, February). *The concrete promotional group*. Obtenido de <http://archive.constantcontact.com/fs189/1106162827952/archive/1116300042847.html>
- E-Alfalo. (2003). *Maquinaria y equipos*. Argentina: E-Alfalo. Obtenido de <http://www.e-asfalto.com/index1/catalogoespanol.pdf>
- Ecopave. (2018). *Pre calentador de Ecopave*. Obtenido de <http://www.ecopavesystems.com/images.htm>
- Fernández del Campo, J. (2001). *Manual de control de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas en caliente*. España: M.F.
- Frank Incropera, D. D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (Vol. 4ta Edición). México: Prentice Hall.
- Freotech. (2014). *Nanjing Economic&Technological Development Zone*. Obtenido de <http://www.freotech.com.hk/en/>
- Freotech Recycling. (2017, September 4). *Freotech Company Introduction*. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?time_continue=59&v=N6PQp9AwX6U
- Fyvie, K. (2014). *Leveraging the Operational and Cost Advantages of Hot In-place Recycling for a Single-Runway Airfield Pavement Rehabilitation Project at Kelowna International Airport*. Vancouver, British Columbia: SNC Lavalin. Obtenido de http://www.ecopavesystems.com/docs/ctaa_2013-16_hir_at_kelowna_airport.pdf
- Fyvie, K. R. (2012). *Leveraging the Operational and Cost Advantages of Hot In-place Recycling for a Single-Runway Airfield Pavement Rehabilitation Project at Kelowna International Airport*. p. 1-29.
- Galvis, R. (2014). *El estado de la practica europea del reciclaje como tecnologia sustentable y sostenible en la industria del asfalto*. p. 1-101.

- Garnica, J. G. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos* (Vol. Publicación técnica No. 197). Sanfandila, Qro, México: SCT.
- Garnica, P. (2008). *Espectros de carga y daño para diseño de pavimentos*. México: Reporte técnico.
- gob.mx. (s.f.). *Instituto Mexicano del Transporte*. Obtenido de <http://imt.mx/micrositios/sistemas-de-informacion-geoespacial/servicios-tecnologicos/red-nacional-de-caminos/visualizador-geocartografico-de-la-rnc.html>
- Gordon Keller, J. S. (Septiembre 2004). *Ingeniería de Caminos Rurales*. México: IMT. Obtenido de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/Libro/lb4.pdf>
- Green ARM. (2002). *AR2000 Super Recycler*. Obtenido de <http://www.green-arm.com/area/japan/>
- Green ARM. (2008, November 11). *HITONE*. Obtenido de <http://www.green-arm.com/english/activityReport/news081111.html>
- Green ARM. (2008, November 31). *Green ARM's HITONE® technology was reported in the British technical journal World Highways*. Obtenido de <http://www.green-arm.com/english/activityReport/news081031.html>
- Green ARM. (2008, October 31). *Highways feel the heat*. p. 1-4. Obtenido de <http://www.green-arm.com/english/activityReport/news081031.html>
- Green ARM. (2015). *Hot in-place thin overlay for road surface maintenance in Japan*. Japon: Green Arm. Obtenido de http://www.green-arm.com/area/japan/091028WRC2nd/HITO_FOR_SURFACE_MAINTENANCE_IN_JAPAN.pdf
- Green ARM. (s.f.). *Hot in-place transforming*. Japan: HITONE.
- Hernández, J. (2013). *Los retos de la infraestructura en México 2013-2018* (Vol. 1ra Edición). México: cmic. doi:<http://www.cmic.org.mx/cmic/ceesco/2013/Retos.pdf>
- Highways Today. (2017). *Hot-In-Place Recycling for Beijing's Chang'An Avenue*. Obtenido de <https://www.highways.today/2018/01/30/hot-in-place-recycling-beijing-changan-avenue/>
- HITONE. (s.f.). *Making history for asphalt paved roads*. Japan: HITONE.
- Hosokawa H., G. A. (2005). *Hot in-place recycling of porous asphalt concrete*. p. 1-9.
- Hosokawa H., G. A. (2006, August). *Development of hot in-place transforming of dense graded asphalt mixture to porous asphalt*. p. 1-39. Obtenido de <http://www.green-arm.com/area/japan/060818ICAP/2006.08%20ICAP%20Presentation-HP.pdf>

- Hosokawa H., G. A. (2007). A case study of work done by a hot in-place recycling (HIR) Machines. p. 1-8.
- Hosokawa H., G. A. (2007). High performance pavement of recycled mixture. p. 1-9.
- Hosokawa H., K. T. (s.f.). *High performance pavement of recycled mixture, new wave for recycling and transforming of asphalt concrete*. Japan: Green Arm.
- Hosokawa, H. (2008, April 24). Pavement recycling technology for highways in Japan. p. 1-25.
- Ibarra, A. (2003). *Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta*. Tesis, Cataluña España. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/278001124_Estudio_del_comportamiento_de_mezclas_bituminosas_recicladas_en_caliente_en_planta
- Ignacio Sánchez, H. S. (Enero-Junio de 1989). IRI: Un indicador de la regularidad superficial. *Revista de Ingeniería de Construcción* N° 6, págs. p. 1-16. Obtenido de <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/viewFile/320/pdf>
- IMT. (27, 27 Junio). *Red Nacional de Caminos*. Obtenido de <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos#documentos>
- Jeff Withee, T. H. (2013). “Asphalt Material Characterization for AASHTOWare® Pavement ME Design Using an Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). p. 1-11. Obtenido de <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif13060.pdf>
- Joharifard, K. y. (2005). Hot in-place recycling technology. p. 1-14.
- Jorge Martínez, M. M. (2013). *Manual Estadístico del Sector Transporte 2013*. Sanfandila, Qro., México: IMT. Obtenido de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/Manual/mn2013.pdf>
- Kent Hansen, P. E. (2013, December). *Annual asphalt pavement industry survey on recycled material and warm-mix asphalt usage: 2009-2012*. New Jersey, USA: NAPA. Obtenido de https://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2012_RAP-RAS-WMA_Survey_Final.pdf
- María López, R. T. (2013). Algunas acciones implementadas en México por el cambio climático, y su perspectiva futura. *Publicación Técnica No. 373*, p. 1-59. Obtenido de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt373.pdf>
- María Saucedo, A. M. (2013). Gestión de alternativas de mejoramiento para el tramo Cd. Mendoza-Cordoba, Utilizando el manual de seguridad vial de la AASHTO 2010. *Publicación Técnica No. 388*, p. 1-162. Obtenido de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt388.pdf>

- Martec . (s.f.). *Carreteras sostenibles*. Obtenido de http://www.martec.ca/media_room/files/publications/Spanish.pdf
- Martec. (2010). Una solución de clase mundial para la rehabilitación de pavimentos asfálticos. p. 1-8.
- Martec. (2018). *AR2000 Super Recycler*. Obtenido de <http://martec.ca/product/>
- Martec. (2018). *Sustainable Roads*. Obtenido de <http://martec.ca>
- Martins Victor, I. C. (2018). ARC Asphalt Recycling Inc. p. 1-8.
- Maser, M. M. (1991). *Measuring Systems and Instrumentation for Evaluating the Effectiveness of Pavement Maintenance*. Obtenido de <https://trid.trb.org/view/362973>
- Mendoza, J. (2014). *Criterios de sustentabilidad para carreteras en México*. Sanfandila, Qro. México: IMT. Obtenido de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt392.pdf>
- Molina, Ó. (2017, 23 de Abril). *Abandonan el mantenimiento de pavimento*. Obtenido de <http://www.lacronica.com/EdicionEnlinea/Notas/Noticias/23042017/1205914-Abandonan-el-mantenimiento-de-pavimento.html>
- MOPC. (2016). *Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación*. Dirección general de reglamentos y sistemas. Obtenido de <http://mopc.gob.do/media/2335/sistema-identifici%C3%B3n-fallas.pdf>
- Moreno, J. (2005). *Efecto de equipo y procedimientos de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a la tracción indirecta de las mezclas bituminosas*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3252>
- Moussavi, H. (2011, August 4). Hot In-place Recycling Summary report. p. 1-2.
- Moya, S. (2004, June 28). *Estudio del efecto de la incorporación de material granular en compactador giratorio*. Tesis, Cataluña, España. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6623>
- Musharraf Zaman, D. C. (1993). *Resilient Moduli of Granular Materials*. Obtenido de [https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1994\)120%3A6\(967\)](https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120%3A6(967))
- NAPA. (2018). *Recycling*. Obtenido de http://www.asphaltpavement.org/index.php?option=com_content&task=view&id=25&Itemid=45
- Padilla, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Cataluña,

- España.: Universitat Politècnica de Catalunya. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>
- Patiño, D. (2017, Septiembre 14). *Obras web*. Obtenido de <http://www.obrasweb.mx/construccion/2017/09/14/la-inversion-fisica-se-proyecta-como-la-mas-baja-en-10-anos>
- Pérez N., G. P. (2012). *Evaluación del módulo de resiliencia, en trayectorias de humedecimiento y secado* (Vol. Publicación técnica no. 335.IMT). Sanfandila, Qro, México: SCT.
- Pérez, D. (3 de Octubre 2013). *Análisis del índice de perfil en tramos carreteros y algunas recomendaciones para mejorarlo*. Tesis, México, D.F.
- Presidencia de la República. (2011, 27 Julio). *Inflación-Infraestructura*. Obtenido de <http://calderon.presidencia.gob.mx/el-blog/infraestructura-con-vision-de-largo-plazo/gobierno-federal-20110727-presidencia-blog-raul-eduardo-flores-macias-inversion-infraestructura-2/>
- Prithvi Kandhal, M. G. (1998). *Flexible pavement Rehabilitation and maintenance*. Baltimore, USA: ASTM.
- Quesada, I. (Febrero de 2004). *Evaluación del comportamiento de diferentes tramos de carretera rehabilitados utilizando mezclas recicladas en frio*. Cataluña, España.
- Quingles. (1997). *El reciclaje de firmes en frio in situ mediante emulsiones bituminosas, Tesina de especialidad, ETSECCPB-UPC*.
- Rafael Gallegos, A. M. (2004). *Efecto de la regularidad superficial en la capacidad vial de autopistas y carreteras multicarril Mexicanas* (Vol. Publicación técnica no. 355.IMT). Sanfandila, Qro, México: SCT. Obtenido de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt262.pdf>
- Rogelio Rodríguez, V. C. (2001). Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule. *Publicación Técnica No. 160*, p. 1-54. Obtenido de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt160.pdf>
- Rogelio Rodríguez, V. C. (2001). Emulsiones asfálticas. *Documento Técnico No. 23*, p. 1-48. Obtenido de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt23.pdf>
- Ronald T., G. R. (2008, July 31). Viability of hot in-place recycling as a pavement preservation strategy. p. 1-28.
- Ronald Terrel, J. E. (1997, March). Hot in-place recycling. p. 1-23.

- Rovirosa, E. M. (2009, Mayo). *Mexicali AR 2000: Un caso de corrupción a la vista*. Obtenido de <http://www.bajaeco.com/opinion/2009/ar2000.cfm>
- Ruíz, R. (2001). La Calidad y la Seguridad en las Infraestructuras. *Ingeniería Civil No. 124/2001*.
- SCT. (2013). *Plan nacional de desarrollo 2013-2018*. Obtenido de http://www.sct.gob.mx/fileadmin/banners/Programa_Sectorial_de_Comunicaciones_y_Transportes.pdf
- SCT. (2014). *Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México 2014*. México: SCT. Obtenido de <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Guias/guia-carreteras.pdf>
- SCT. (31 de Mayo 2005). *Características de los materiales*. México: SCT. Obtenido de <http://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-004-05.pdf>
- SCT. (s.f.). *Infraestructura Carretera*. Obtenido de http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAF/EST_BASIC/EST_BASIC_A_2004/EST2004_12_Infraestructura.pdf
- SEDECO. (2017, Mayo). *Baja California*. Obtenido de http://www.investinbaja.gob.mx/docs/en/baja_california_overview_2017_en.pdf
- Sharma V., B. C. (2015). Highway 1 rehabilitated with hot in-place recycling. p. 1-22.
- SHCP. (2018, 24 Enero). *Transparencia presupuestaria*. Obtenido de <http://www.transparenciapresupuestaria.gob.mx/es/PTP/Presupuestacion#Presupuestacion>
- STC. (15 de Diciembre de 2009). CTR. Construcción. *Carpetas Asfálticas con Mezcla en Caliente*, p. 1-28. Obtenido de <http://normas.imt.mx/normativa/N-CTR-CAR-1-04-006-09.pdf>
- STC. (2015, Abril 29). *Programas de Caminos rurales y alimentadores*. Obtenido de <http://www.sct.gob.mx/obrapublica/MarcoNormativo/7/7-4.pdf>
- Stephen Lee, R. T. (1998, November). New developments in hot in-place recycling technology and specification . p. 1-16.
- Stephen Lee, T. S. (1999, November 12-13). Advanced hot in-place recycling for cost effective maintenance of asphalt pavements. p. 1-16.
- StoneSet. (2013, August). *Flinders street station, melbourne*. Obtenido de <http://www.stoneset.com.au/2013/08/>

- Vásquez, M. (Diciembre de 2001). *Diseño de mezclas asfálticas en Caliente*. Obtenido de http://www.mop.gob.sv/index.php?option=com_content&view=article&catid=123:mecanica-de-suelos-y-pavimentos&id=577:diseño-de-mezclas-asfalticas-en-caliente-nuevas-tendencias-&Itemid=60
- Wiley, P. (2013, April 14). The evolution of hot in-place asphalt recycling in British Columbia. p. 1-30. Obtenido de <https://news.gov.bc.ca/stories/arc-asphalt-recycling-wins-contractor-of-the-year-award>
- Wirtgen. (2004). *Manual de reciclado en frio* (Vol. 2da Edición). Alemania: Wirtgen. Obtenido de <https://www.scribd.com/doc/60058494/Manual-Reciclaje-Frio>
- Wirtgen. (2008). *The World of Wirtgen hot recyclers*. Germany: Wirtgen Group.
- Wirtgen. (2011 D). *Saneamiento de carreteras con tecnología de alto rendimiento*. Obtenido de https://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/media_1/media_1_02_cold_recyclers_and_soil_stabilizers_2/media_1_02_cold_recyclers_and_soil_stabilizers_2_previous_models/W_brochure_WR4200_0411_ES.pdf
- Wirtgen. (2016 A). *Calentamiento eficiente de capas asfálticas. Calentadora HM 4500*. Alemania: Wirtgen Group. Obtenido de https://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/media_1/media_1_04_hot_recyclers_2/media_1_04_hot_recyclers_2_hm_4500/W_brochure_HM4500_0116_ES.pdf
- Wirtgen. (2016 B). *El mundo de las recicladoras en caliente de Wirtgen*. Alemania: Wirtgen Group. Obtenido de https://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/media_1/media_1_04_hot_recyclers_2/media_1_04_hot_recyclers_2_00_general_information/W_brochure_Hot-Recyclers_0116_ES.pdf
- Wirtgen. (2016 C). *Saneamiento de capas de asfalto en el proceso de reciclaje en caliente. Remixer 4500*. Alemania: Wirtgen Group. Obtenido de https://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/media_1/media_1_product_divisions/media_1_product_divisions_hot_recyclers/W_brochure_Remixer4500_0116_ES.pdf
- Wirtgen. (2016 D). *Job report hot recycling. Remixer 4500: Different hot in place recycling applications in China*. Germany: Wirtgen Group. Obtenido de https://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/media_1/media_1_product_divisions/media_1_product_divisions_hot_recyclers/W_job-report_Remixer4500-China_0116_EN.pdf
- Wirtgen. (2017). High-quality in-place recycling of asphalt layers. p. 1-26.
- Wirtgen. (2017). *Performance-Cold milling machine offering high milling power*. Obtenido de <https://media.wirtgen->

group.com/media/02_wirtgen/media_1/media_1_01_cold_milling_machines_2/media_1_01_cold_milling_machines_2_w_205/W_brochure_W205_0817_EN.pdf

Wirtgen. (2018 A). *The World of Wirtgen Cold Milling Machines*. Obtenido de http://pdf.directindustry.com/pdf/wirtgen/world-wirtgen-cold-milling-machines/41149-125335-_13.html

Wirtgen. (2018 B). *Compact cold milling machine W 150 CF / W 150 CFi*. Obtenido de https://www.wirtgen.de/en/products/cold-milling-machines/compact-milling-machines/w_150_cfi.php

Wirtgen. (2018 C). *Technology: Cold recycling*. Obtenido de <https://www.wirtgen.de/en/technologies/cold-recycling/kaltrecycling.php>

Wirtgen. (2018 E). *Core competence Cutting Technology*. Obtenido de <https://www.wirtgen.de/en/technologies/cold-milling/operating-principle-large-milling-machines/fraesen.php>

Wirtgen. (2018 F). *Information material: Remixer 4500 (Brochure)*. Obtenido de <https://www.wirtgen.de/en/news-media/information-material/hot-recyclers/remixer.php>

Wirtgen. (2018 G). *Rehabilitation of asphalt surfaces in a single operation*. Obtenido de <https://www.wirtgen.de/en/products/hot-recyclers/remixer/>

Wirtgen. (2018 H). *Creating innovation*. Obtenido de <https://www.wirtgen-group.com/en/wirtgen-group/brand-headquarters/>

Xiaoling Zou, X. Y. (2014, July). Hot in-place recycling of asphalt pavement applied in highway 2 preventive maintenance: a case study in Jiangxi, China. p. 1-19.

Zuckerman, R. (2017, May 27). *Documental, El dragón de las mil cabezas, espionaje industrial Chino*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=PqYMqzR4xp4>

ANEXO 1 (Martec Tijuana)

Fotos registradas en la visita a la empresa de Tijuana que utiliza un AR2000.



Vigas principales del secador



Ejes y topes de descanso



Banda transportadora que recoge la mezcla



Sopladores del sistema de quemador



Transmisión de gusanos



Ejes traseros



Tolva para recibir la mezcla asfáltica nueva



Parte frontal del pre calentador



Parte frontal del pre calentador



Parte trasera de la tolva



Transmisión para el eje motriz



Cama calentadora



Cama calentadora



Cama calentadora y gusanos.



Gusanos después de la cama de calentamiento



Banda transportadora que recoge la mezcla asfáltica recuperada



Tubo de flama de calentamiento



Extensión del tubo de calentamiento



Tubo de flama de calentamiento



Salida de cortador



Cadena de banda transportadora



Rodillo cortador sin los tungstenos



Tren de Calentamiento AR2000



Calentador Secador



Salida de cortador



Cama del pre calentador



Gusanos empujadores



Gusanos empujadores



Salida del cortador



Aspersor de emulsión



Banda transportadora hacia el mezclador de asfaltos



Pre calentadores



Pre calentador listo para embarque



Pre calentador listo para embarque

ANEXO 2 (Fretech mecanismos)

Fuente de imágenes (Fretech, 2014)



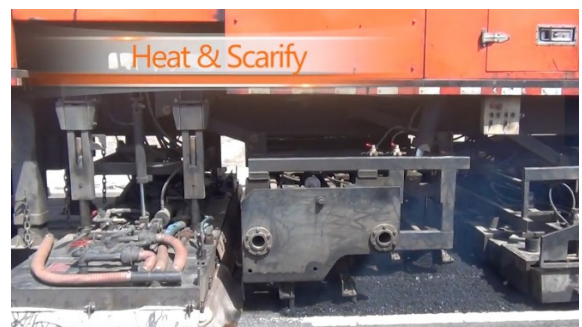
Cama de pre calentador



Escarificador de asfalto



Recolector de asfalto recuperado y nuevo



Escarificadores de asfalto



Escarificadores



Entrada a escarificadores



Recolector de asfalto recuperado y nuevo asfalto



Aporte del nuevo asfalto a bulto de asfalto recuperado





Escarificadores



Escarificadores dobles



Cama de pre calentador



Tren de reciclaje de asfaltos Freetech



Tren de reciclaje de asfaltos Freetech



Mezcladora de asfaltos



Tren de reciclaje de asfaltos Freetech

ANEXO 3 (Ecopave mecanismos)

Fuente de imágenes (Ecopave, 2018)



Estructura de la máquina calentadora y cortadora



Estructura de pre calentador



Estructura de pre calentador y troque



Mezclador de asfalto nuevo y recuperado.



Calentador y cortador



Entrada de banda transportadora para recuperar el asfalto



Entrada del bulto de asfalto a la banda transportadora



Calentador y cortador



Cama calentadora y entrada de asfalto recuperado



Cama calentadora y entrada de asfalto recuperado



Cama calentadora, cortadores y gusanos



Estructura principal del calentador y cortador



Vigas principales de tren Ecopave 400



Bulto final del asfalto recuperado en 2 estaciones

ANEXO 4 (Wirtgen mecanismos)

Fuente de imágenes (Wirtgen, 2016 D)



Pre calentador extendido



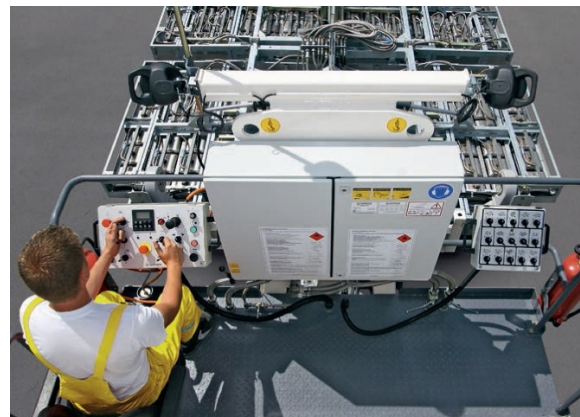
Pre calentador compactado



Rotación de giro del pre calentador



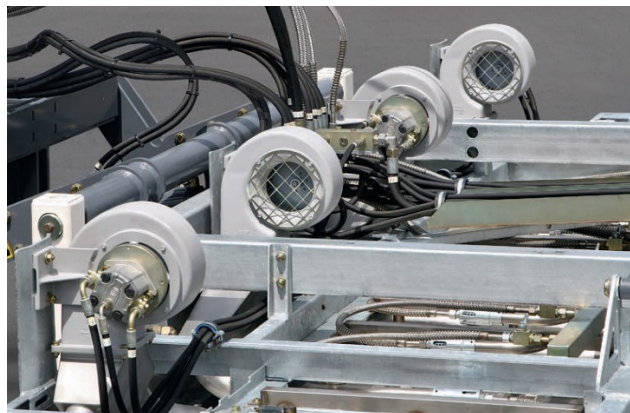
Válvulas para activar y desactivar grupos de calentadores



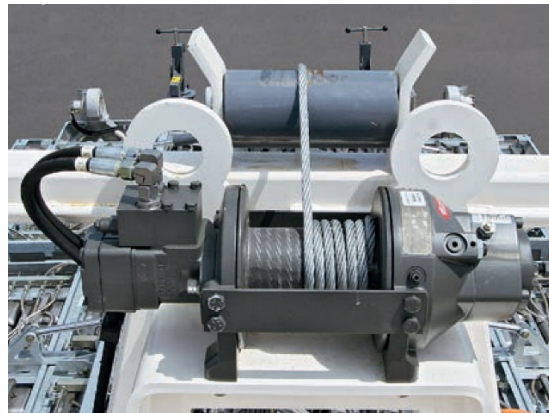
Control del pre calentador



Tren de reciclaje de wirtgen



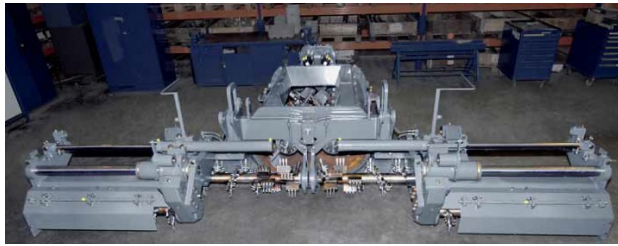
Sopladores de aire a las camas de calentamiento



Jalones con cable tensor para compactar las camas



Cortador y Mezclador



Mecanismo de cortadores retractiles



Dedos cortadores



Mixer 4500 en operación y con camas extendidas



Mixer 4500 en operación y con camas extendidas



Ventanas calentadoras de sistema infrarrojo



Extensión de rodillos cortadores



Controles para extensiones de cortadores



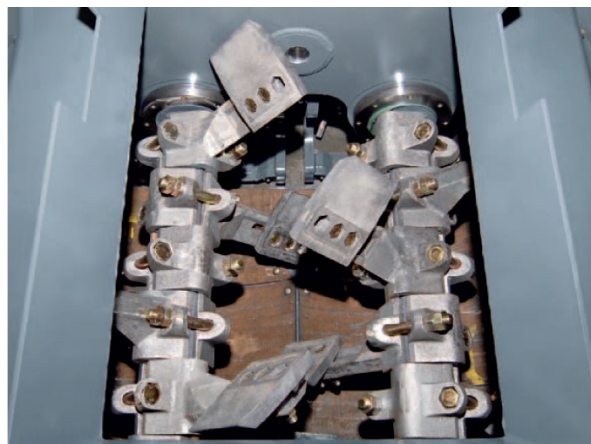
Rodillos de dedos cortadores



Extensión de dedos cortadores y gusanos



Aspas de gusanos



Aspas de mezclado de asfalto nuevo con recuperado



Mecanismo de rodillos cortadores



Vista lateral de Mixer 4500 de wirtgen



Parte trasera de Mixer 4500

ANEXO 5 (Desarrollo de muestras asfálticas)



1. Se preparó la emulsión PG 76-22 a 150°C y los pétreos entre 140 a 165°C.



2. Se realizó la mezcla con una pesa para controlar la cantidad de cemento asfáltico. Una vez mezclada los materiales se pasó a un filtro para transferirlo a un recipiente cilíndrico.



3. Se transfirió el cilindro a una compactadora para aplastar toda la materia.



4. Se dejó enfriar la mezcla y se liberó de su recipiente.

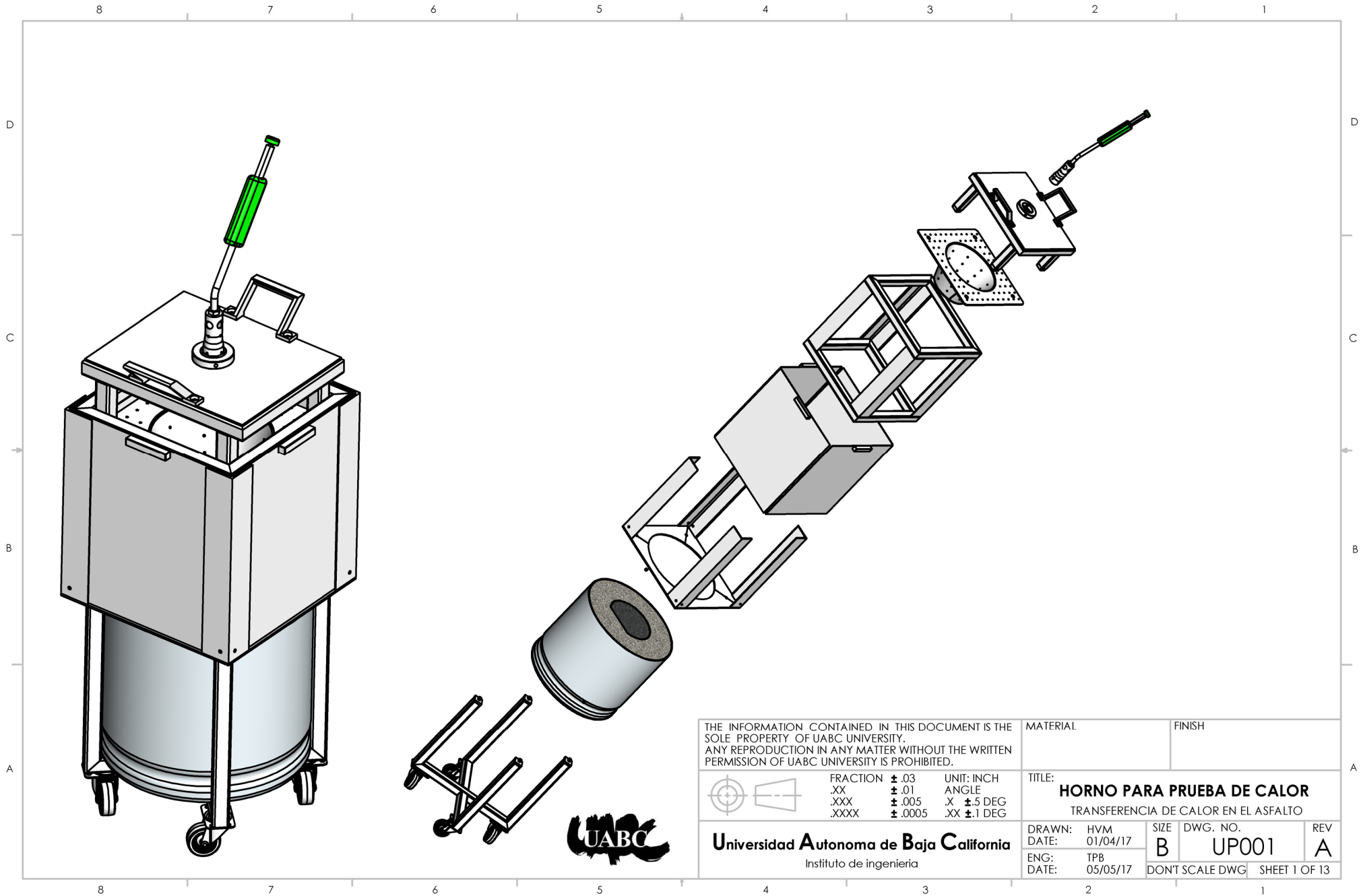


5. Muestra asfáltica compactada.

ANEXO 6 (Diseño del horno)

El horno fue diseñado y enviado a fabricar, aquí algunas imágenes, y a continuación los planos de detalle para su fabricación y diseño general de una estructura para el aislamiento de la cámara del horno en sus 4 paredes.





THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



FRACTION	±.03	UNIT: INCH
.XX	±.01	ANGLE
.XXX	±.005	.X ±.5 DEG
.XXXX	±.0005	.XX ±.1 DEG

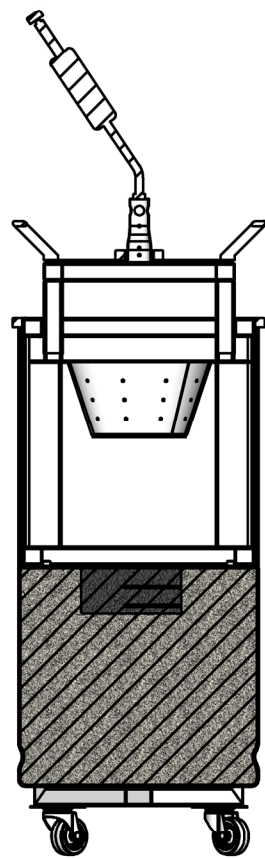
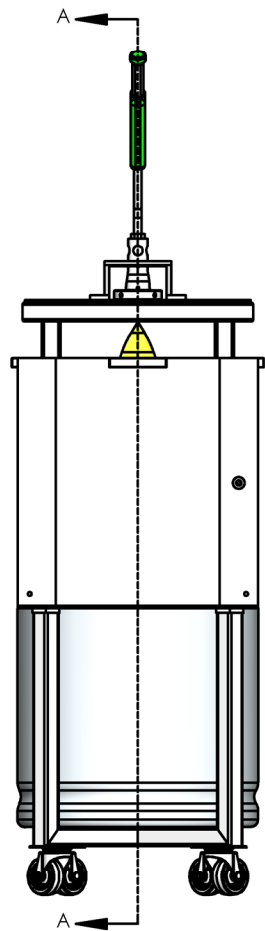
Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

MATERIAL	FINISH
----------	--------

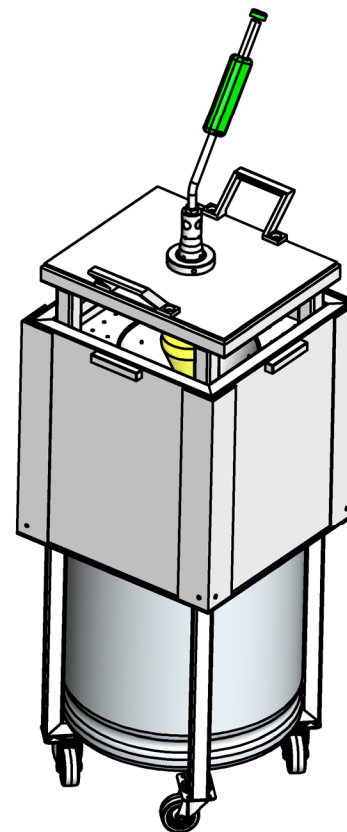
TITLE: **HORNO PARA PRUEBA DE CALOR**
TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL ASFALTO

DRAWN: HVM	SIZE B	DWG. NO. UP001	REV A
DATE: 01/04/17			
ENG: TPB			
DATE: 05/05/17			

DON'T SCALE DWG SHEET 1 OF 13



SECTION A-A
SCALE 1 : 6.5



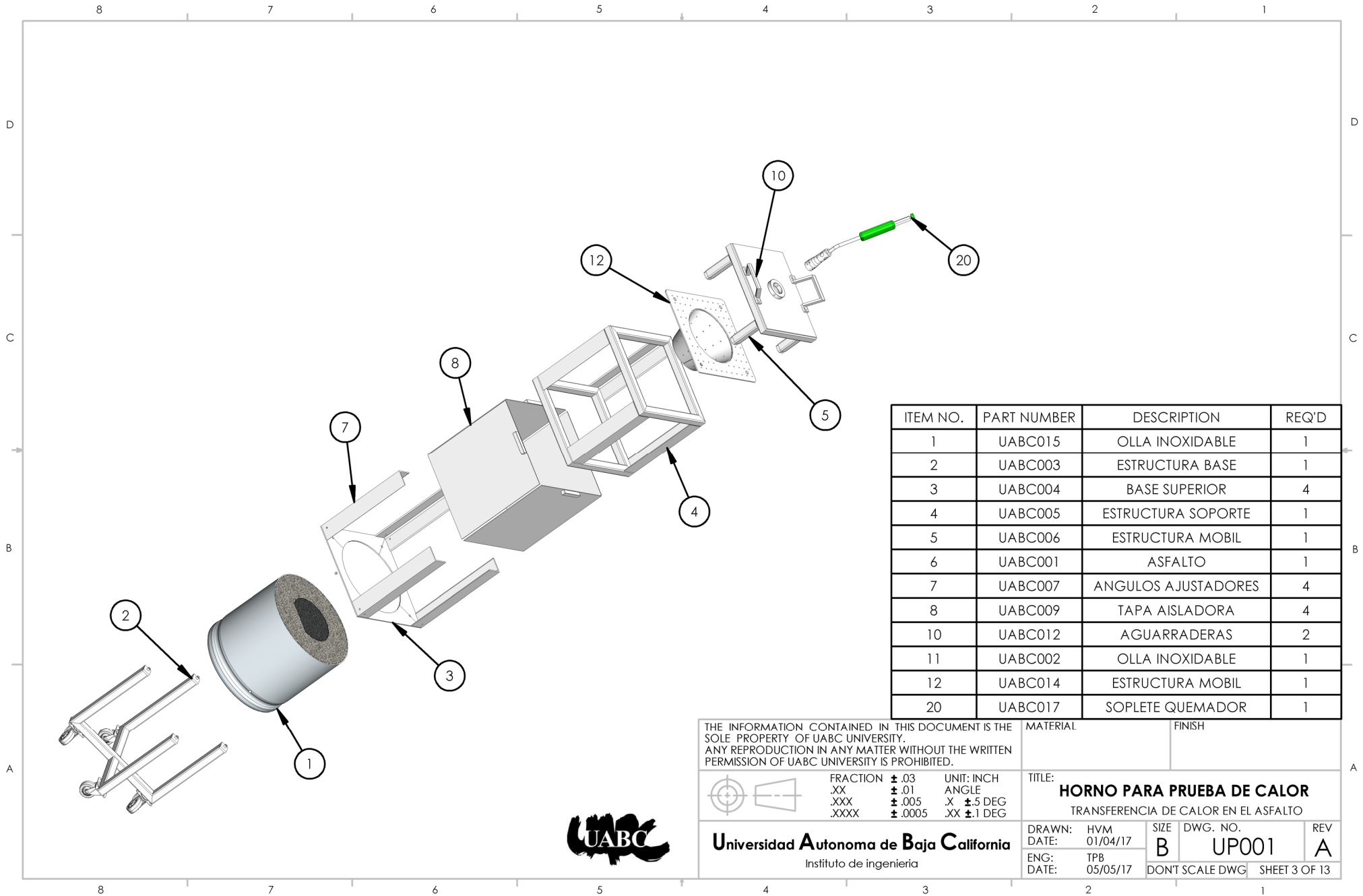
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE
SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY.
ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN
PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.

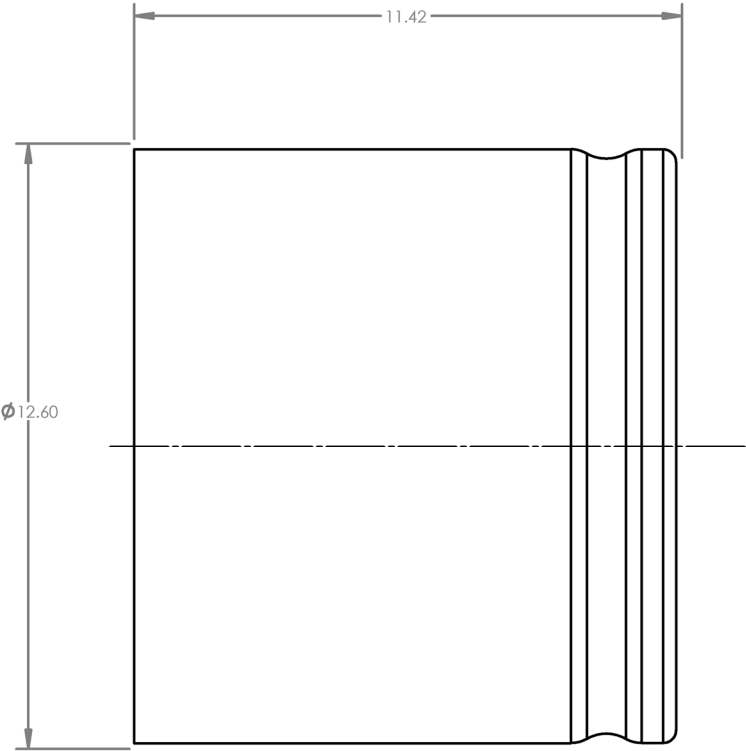
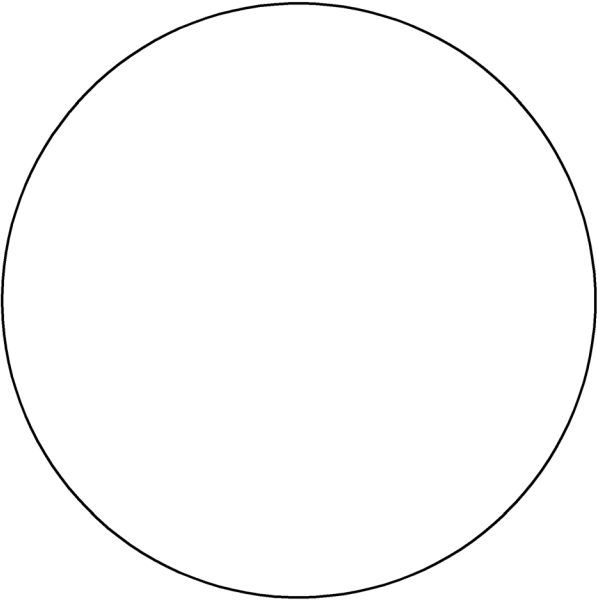


FRACTION	±	UNIT: INCH
.XX	± .01	ANGLE
.XXX	± .005	.X ±.5 DEG
.XXXX	± .0005	.XX ±.1 DEG

Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

MATERIAL		FINISH	
TITLE: HORNO PARA PRUEBA DE CALOR TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL ASFALTO			
DRAWN: DATE:	HVM 01/04/17	SIZE B	DWG. NO. UP001
ENG: DATE:	TPB 05/05/17	DONT SCALE DWG	REV A
		SHEET 2 OF 13	



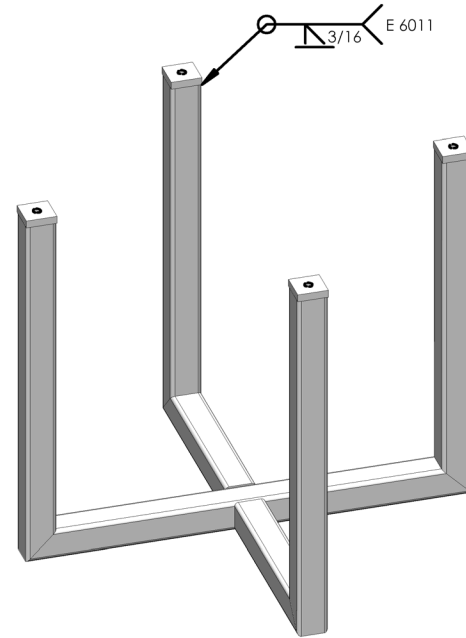
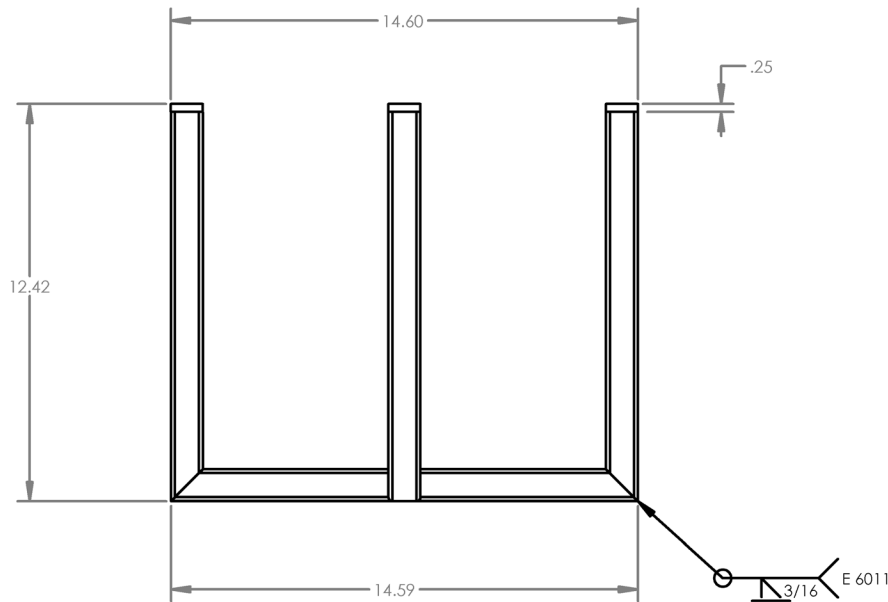
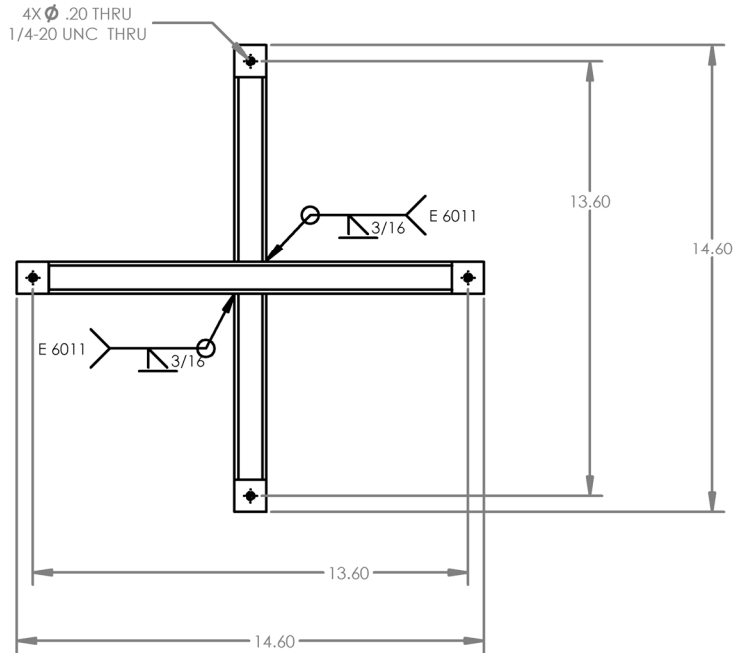


NOTAS
1. ELIMINAR FILOS R. 03



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS
DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF
SUNPOWER. ANY REPRODUCTION IN
PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE
WRITTEN PERMISSION OF SUNPOWER IS
PROHIBITED.

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE	PRUEBA DE CALOR	
		DIMENSIONS ARE IN INCHES		DRAWN	HVM		4/24/2018
		TOLERANCES:		CHECKED	HVM		4/24/2018
		FRACTIONAL: ±.06		ENG APPR.			
		TWO PLACE DECIMAL: ±.03		MFG APPR.			
		THREE PLACE DECIMAL: ±.005					TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL ASFALTO
		FOUR PLACE DECIMAL: ±.0005					
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER ASME Y14.5M-2009		G.A.			
		MATERIAL		COMMENTS:			
		FINISH					
NEXT ASSY		USED ON		FRSH			SIZE DWG. NO.
							C UABC015
							SCALE: 1:20 WEIGHT:
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING					SHEET 4 OF 13

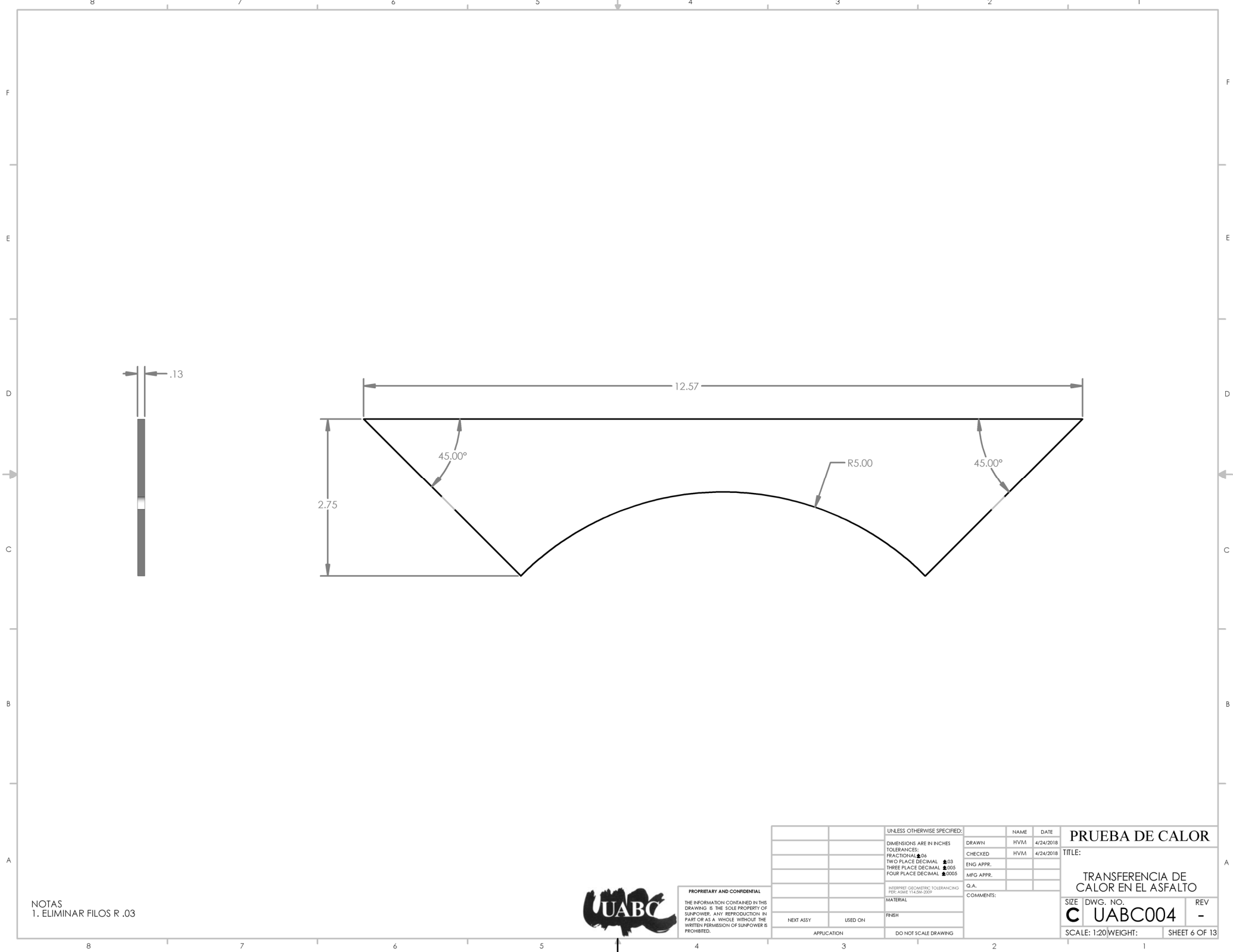


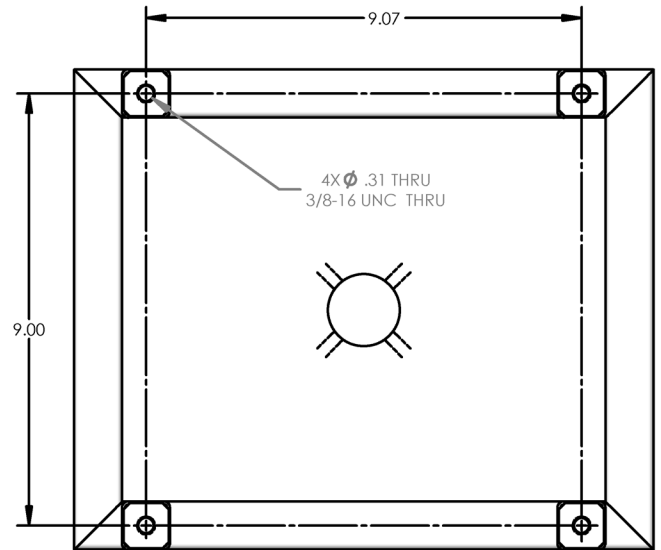
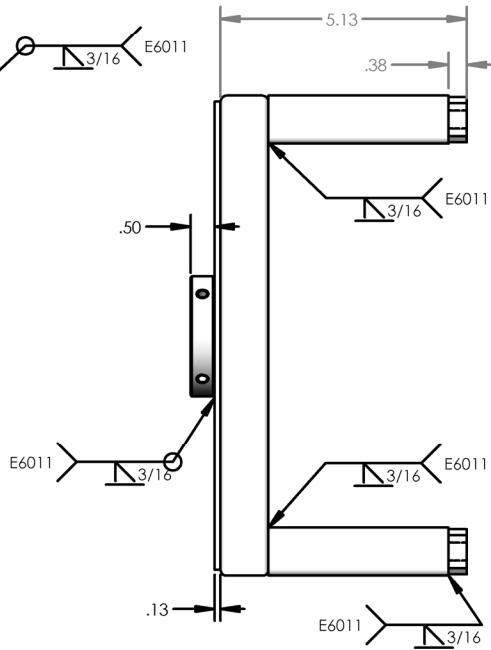
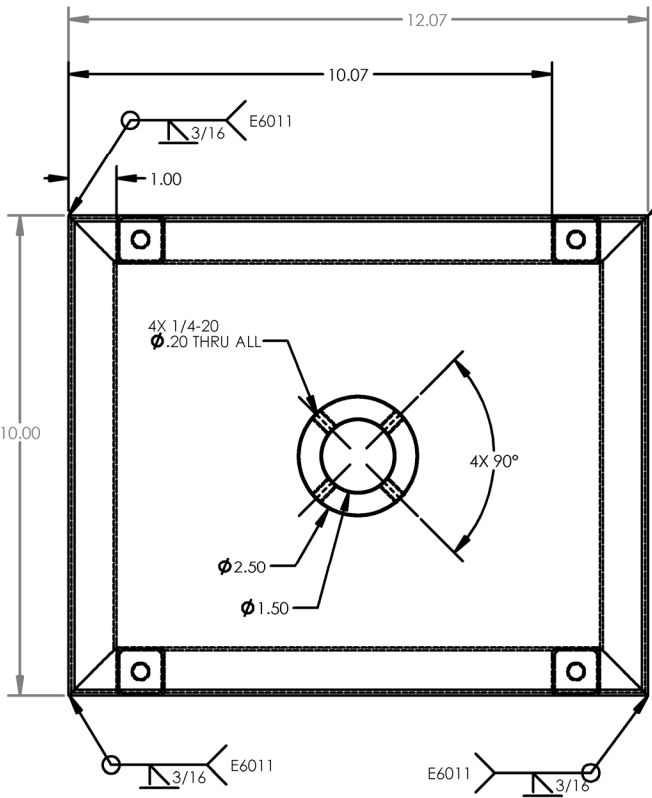
NOTAS
1. ELIMINAR FILOS R. 03



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS
DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF
SUNPOWER. ANY REPRODUCTION IN
PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE
WRITTEN PERMISSION OF SUNPOWER IS
PROHIBITED.

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME		DATE		PRUEBA DE CALOR			
		DIMENSIONS ARE IN INCHES		DRAWN		HVM				4/24/2018	
		TOLERANCES:		CHECKED		HVM				4/24/2018	
		FRACTIONAL: .06		ENG APPR.							
		TWO PLACE DECIMAL: .03		MFG APPR.							
		THREE PLACE DECIMAL: .005		Q.A.							
		FOUR PLACE DECIMAL: .0005		COMMENTS:							
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER: ASME Y14.5M-2009									
		MATERIAL									
		FINISH									
THIS OF IN THE B/S		NEXT ASSY		USED ON		SIZE		DWG. NO.			
						SCALE		REV			
		APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING		C		UABC003			
						1:20		WEIGHT:			
								SHEET 5 OF 13			



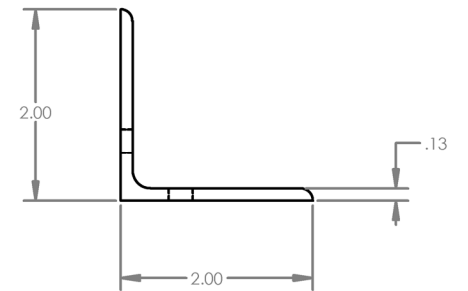


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE	PRUEBA DE CALOR	
DIMENSIONS ARE IN INCHES		DRAWN	HVM		
TOLERANCES:		CHECKED	HVM	TITLE:	
FRACTIONAL: .005		ENG APPR.	4/24/2018	TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL ASFALTO	
TWO PLACE DECIMAL: .03		MFG APPR.			
THREE PLACE DECIMAL: .005		Q.A.		SIZE DWG. NO.	
FOUR PLACE DECIMAL: .0005		COMMENTS:		C UABC006	
INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER ASME Y14.5M-2009				SCALE: 1:20 WEIGHT:	
MATERIAL				SHEET 8 OF 13	
FINISH					
APPLICATION	DO NOT SCALE DRAWING				

NOTAS
1. ELIMINAR FILOS R.03



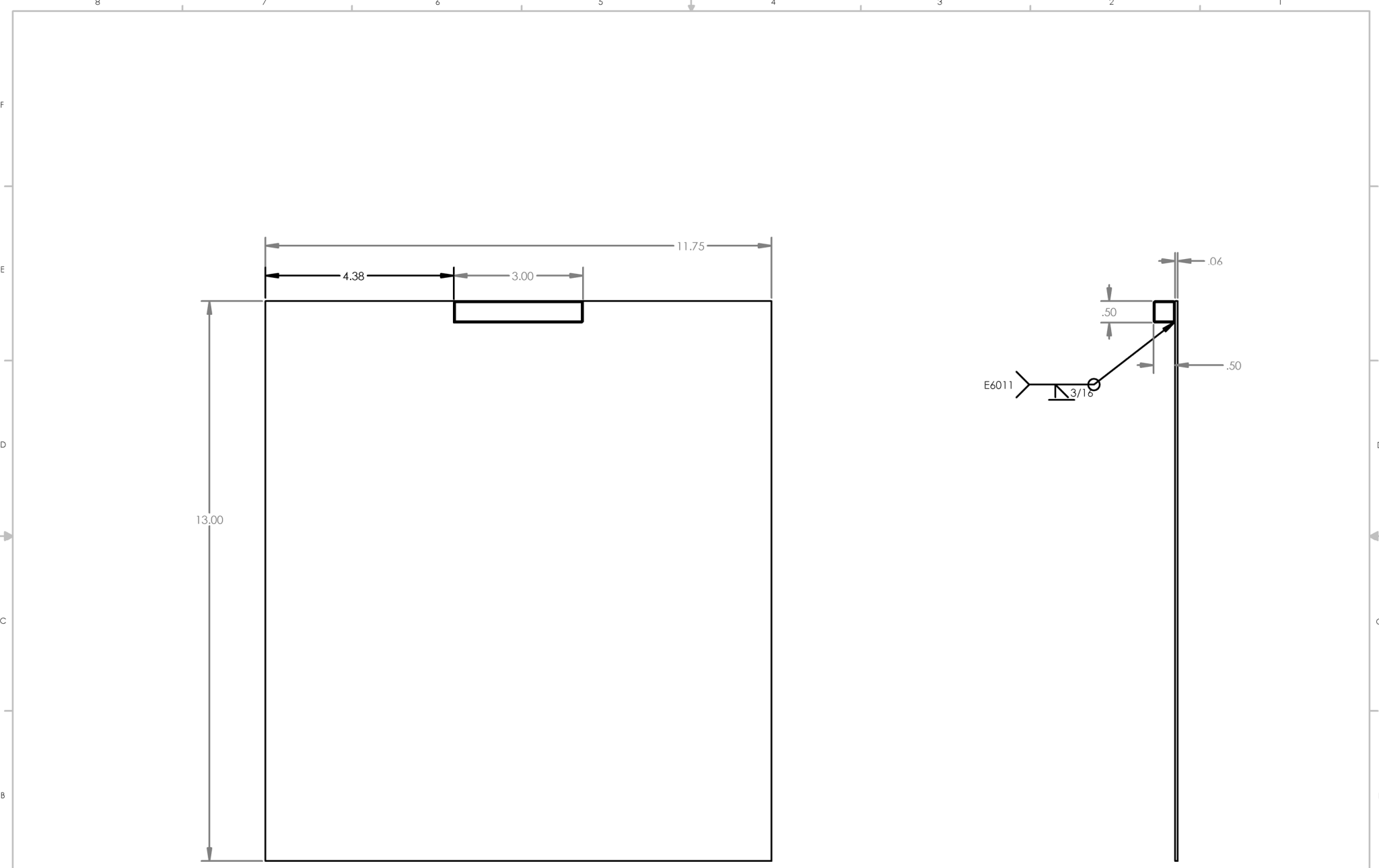
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF SUNPOWER. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF SUNPOWER IS PROHIBITED.



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF SUNPOWER. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF SUNPOWER IS PROHIBITED.

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME		DATE		PRUEBA DE CALOR	
		DIMENSIONS ARE IN INCHES TOLERANCES: FRACTIONAL: $\pm .05$ TWO PLACE DECIMAL: $\pm .03$ THREE PLACE DECIMAL: $\pm .005$ FOUR PLACE DECIMAL: $\pm .0005$		DRAWN		HVM			
				CHECKED		HVM		4/24/2018	
				ENG APPR:					
				MFG APPR:					
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER: ASME Y14.5M-2009		Q.A.					
		MATERIAL		COMMENTS:					
		FINISH							
HS OF IN R S		NEXT ASSY		USED ON					
		APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING					
								TITLE: TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL ASFALTO	
						SIZE DWG. NO.		REV	
						C		ABC007 -	
						SCALE: 1:20		WEIGHT:	
								SHEET 9 OF 13	



NOTAS
1. ELIMINAR FILOS R. 03



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS
DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF
SUNPOWER. ANY REPRODUCTION IN
PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE
WRITTEN PERMISSION OF SUNPOWER IS
PROHIBITED.

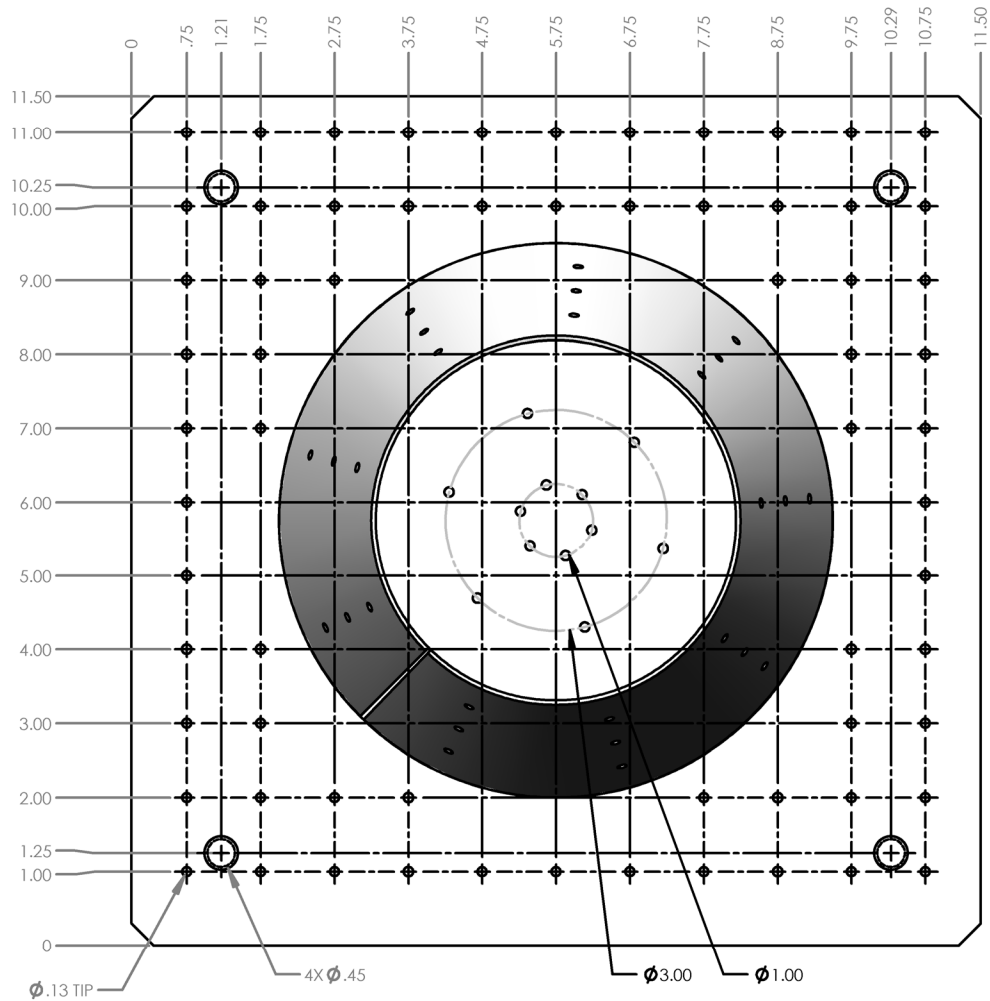
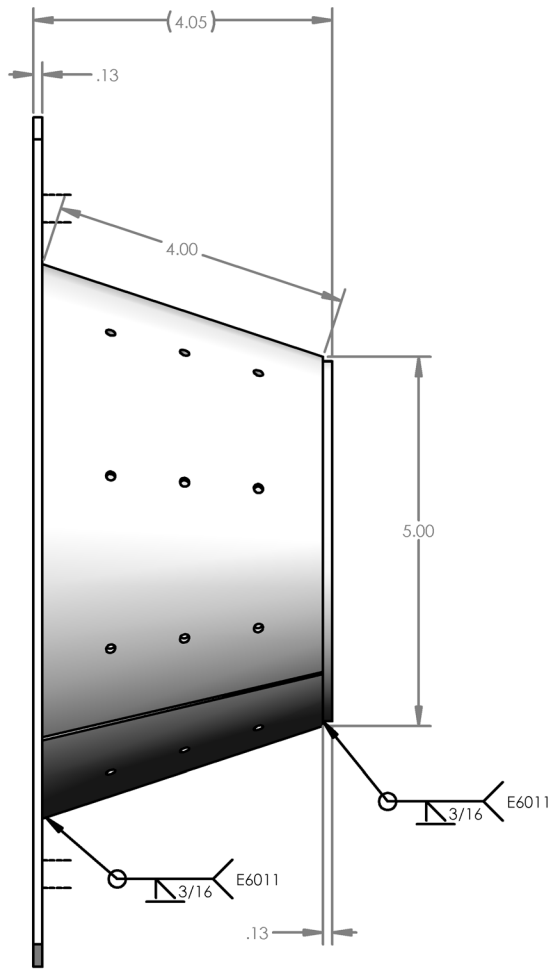
		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME		DATE		PRUEBA DE CALOR			
		DIMENSIONS ARE IN INCHES		DRAWN		HVM				4/24/2018	
		TOLERANCES:		CHECKED		HVM				4/24/2018	
		FRACTIONAL: ±.06		ENG APPR.							
		TWO PLACE DECIMAL: ±.03		MFG APPR.							
		THREE PLACE DECIMAL: ±.005									
		FOUR PLACE DECIMAL: ±.0005									
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER ASME Y14.5M-2009		G.A.							
		MATERIAL		COMMENTS:							
		FINISH									
NEXT ASSY		USED ON									
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING									

TITLE:		TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL ASFALTO	
SIZE	DWG. NO.	REV	
C	UABC009	-	
SCALE: 1:20/WEIGHT:		SHEET 10 OF 13	

TITLE:

SIZE DWG. NO.
C UABC009

REV
-

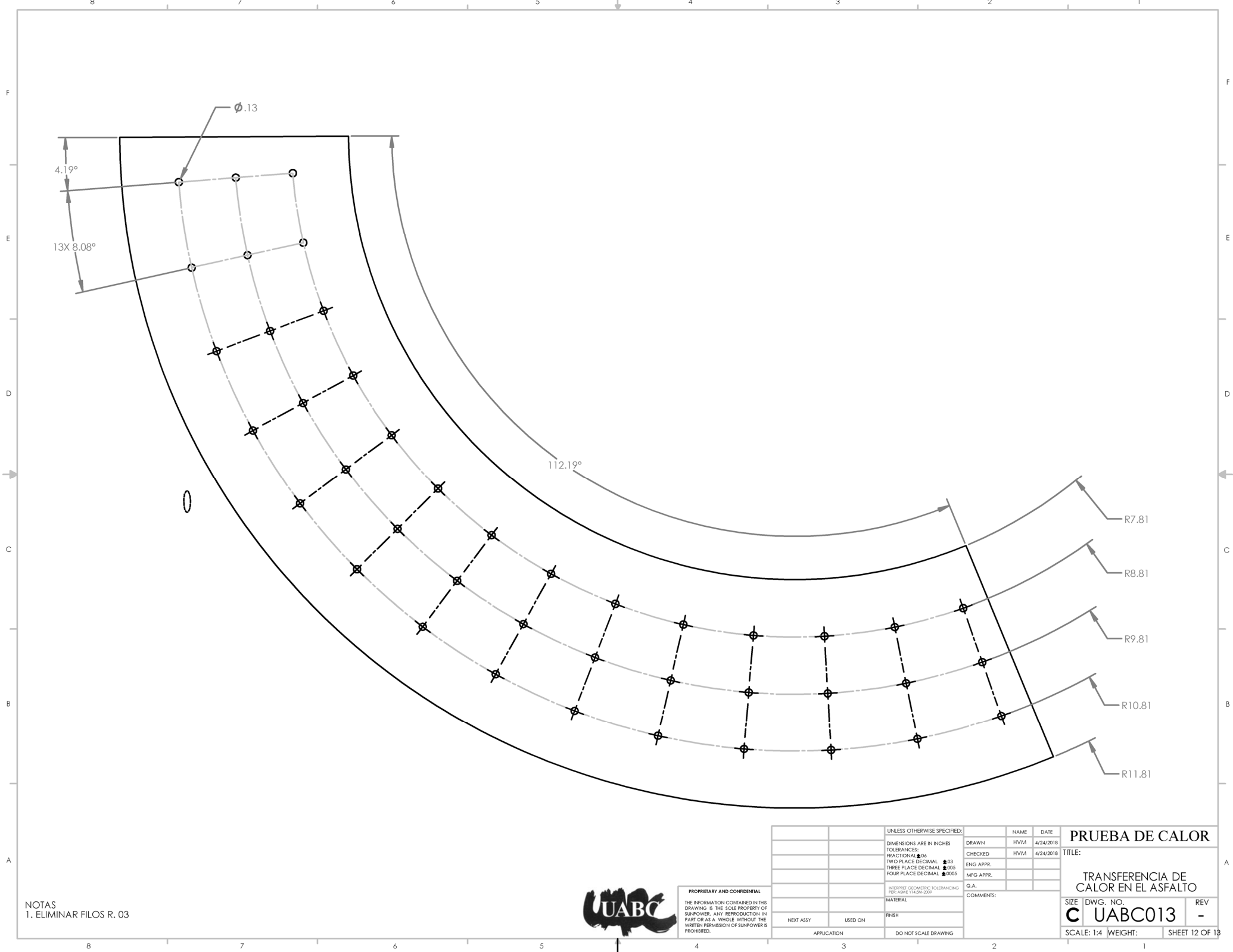


NOTAS
1. ELIMINAR FILOS R. 03



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF SUNPOWER. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF SUNPOWER IS PROHIBITED.

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME		DATE		PRUEBA DE CALOR TITLE: TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL ASFALTO SIZE DWG. NO. C UABC014 REV - SCALE: 1:4 WEIGHT: SHEET 11 OF 13			
DIMENSIONS ARE IN INCHES		DRAWN		HVM				4/24/2018	
TOLERANCES:		CHECKED		HVM				4/24/2018	
FRACTIONAL: $\frac{1}{16}$		ENG APPR.							
TWO PLACE DECIMAL: $\pm .03$		MFG APPR.							
THREE PLACE DECIMAL: $\pm .005$		Q.A.							
FOUR PLACE DECIMAL: $\pm .0005$		COMMENTS:							
INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER ASME Y14.5M-2009									
MATERIAL									
FINISH									
DO NOT SCALE DRAWING									

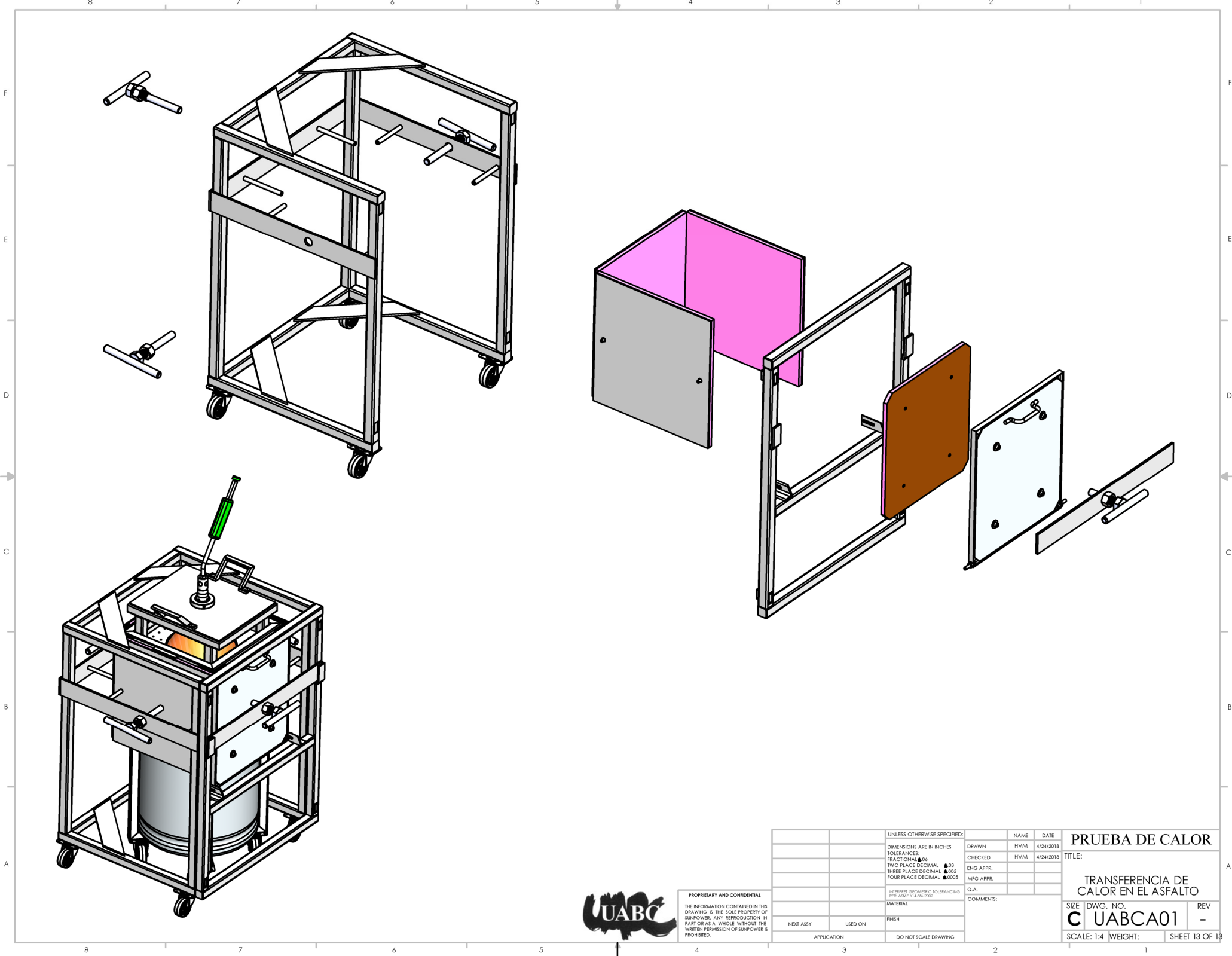


NOTAS
1. ELIMINAR FILOS R. 03



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS
DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF
SUNPOWER. ANY REPRODUCTION IN
PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE
WRITTEN PERMISSION OF SUNPOWER IS
PROHIBITED.

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME		DATE		PRUEBA DE CALOR	
		DIMENSIONS ARE IN INCHES		DRAWN		HVM		4/24/2018	
		TOLERANCES:		CHECKED		HVM		4/24/2018	
		FRACTIONAL: $\pm .06$		ENG APPR.				TITLE:	
		TWO PLACE DECIMAL: $\pm .03$		MFG APPR.				TRANSFERENCIA DE	
		THREE PLACE DECIMAL: $\pm .005$		Q.A.				CALOR EN EL ASFALTO	
		FOUR PLACE DECIMAL: $\pm .0005$		COMMENTS:				SIZE DWG. NO.	
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER ASME Y14.5M-2009						C UABC013	
		MATERIAL						REV	
		FINISH						-	
NEXT ASSY		USED ON		APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING		SCALE: 1:4 WEIGHT: SHEET 12 OF 13	



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS
DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF
SUNPOWER. ANY REPRODUCTION IN
PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE
WRITTEN PERMISSION OF SUNPOWER IS
PROHIBITED.

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		NAME	DATE	PRUEBA DE CALOR	
		DIMENSIONS ARE IN INCHES		DRAWN	HVM		4/24/2018
		TOLERANCES:		CHECKED	HVM		4/24/2018
		FRACTIONAL: $\pm .06$		ENG APPR.			
		TWO PLACE DECIMAL: $\pm .03$		MFG APPR.			
		THREE PLACE DECIMAL: $\pm .005$					TITLE: TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL ASFALTO
		FOUR PLACE DECIMAL: $\pm .0005$					
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER ASME Y14.5M-2009		Q.A.			
		MATERIAL		COMMENTS:			
		FINISH					
NEXT ASSY	USED ON	FINISH		SIZE DWG. NO.			REV
				C UABCA01			-
APPLICATION		DO NOT SCALE DRAWING		SCALE: 1:4 WEIGHT:			SHEET 13 OF 13

ANEXO 7 (Diseño del circuito de adquisición de datos 1)

El siguiente anexo es la memoria de cálculo para el desarrollo de los circuitos electrónicos para las pruebas de calentamiento.

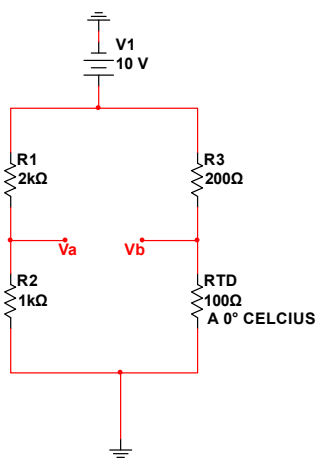
Una de las necesidades para poder incorporar los sensores RTD a la lectura de la temperatura, fue desarrollar unas tarjetas electrónicas, entre estas necesidades están las siguientes:

1. Amplificar las señales para poder tener un rango medible de voltaje.
2. Puente Wheatstone para poder registrar las variaciones de voltaje en relación a la variación de la resistencia de los sensores RTD.
3. Regulador de voltaje para las 3 fuentes.
4. Conexiones entre sensores, adquisidor de datos y sensores.

Los diseños de los circuitos fueron diseñados en el programa NI Multisim®

Puente Wheatstone.

El puente Wheatstone de la figura A, es un arreglo de 4 resistencias y sus valores para las resistencias R1, R2 y R3 fueron seleccionados en favor a componentes de valores comerciales; La intención es poder tener un registro de la variación de voltaje que se presenta, cada vez que el valor de la resistencia del RTD este variando.



El motivo de esto es que bajo el supuesto de que la relación $(R1/R2) = (Rx/R3)$ es cierta, la diferencia de potencial (Voltaje) entre los puntos Va y Vb es igual a 0v. La razón de la utilización de este arreglo es que las variaciones de la resistencia de nuestro RTD en base a la temperatura que se presenten de Va a Vb se estarán registrando en el sistema adquisidor de datos.

Figura A

Supuestos matemáticos para los puentes Wheatstone

$$\frac{R2}{R2 + R1} * V_{cc} = \frac{1000\Omega}{1000\Omega + 2000\Omega} * 5v = 1.6\bar{6}v = Va$$

$$\frac{RTD}{R3 + RTD} * V_{cc} = \frac{100\Omega}{200\Omega + 100\Omega} * 5v = 1.6\bar{6}v = Vb$$

Por lo tanto, cuando la temperatura este a 0°C la diferencia de potencial (Va-Vb) es igual a 0v.

Una vez hecha la calibración de nuestro puente Wheatstone procedemos a la utilización de un amplificador de instrumentación. Dicho amplificador consta de un arreglo de múltiples amplificadores operacionales que amplifican nuestra señal para poder interpretar adecuadamente la variación de nuestra RTD. Para crear lo anterior empezaremos con la utilización de 2 amplificadores operacionales con un arreglo no inversor, este tipo de arreglo amplificará nuestro voltaje en los puntos Va y Vb, este arreglo se utilizará en cada punto, como se muestra en la figura B.

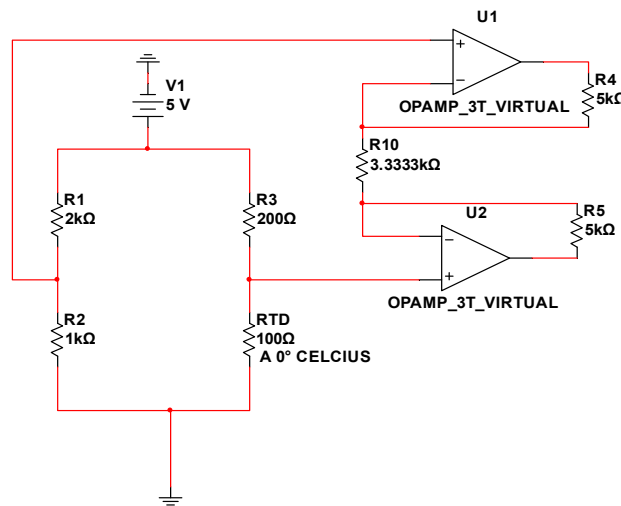
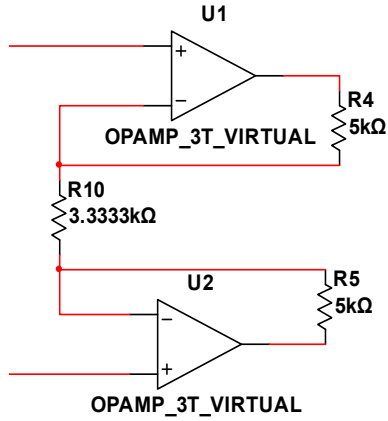


Figura B Circuito del puente y amplificador



Dentro del circuito anterior, la parte que nos proporcionaría la ganancia sería como muestra la figura C.

El valor de la ganancia de este arreglo de amplificadores (Modo amplificador no inversor en un amplificador de instrumentación) lo desarrollaremos bajo dos supuestos matemáticos para lograr así el despeje de las fórmulas que veremos a continuación.

Figura C Circuito de amplificación pre-diferencial

Supuesto 1: Suponemos que la entrada no inversora del Opam U2 está conectada a tierra y que existe un generador de voltaje aplicado en la entrada no inversora del Opam U1. En este caso las fórmulas de salida para cada Opam son las siguientes:

$$V_{out1} = V1 \left(\frac{RG + R4}{RG} \right) \quad V_{out2} = V1 \left(-\frac{R5}{RG} \right)$$

Supuesto 2: Ahora suponemos una entrada de voltaje en la entrada no inversora del Opam U2 y que la entrada no inversora del Opam U1 está a tierra, por lo que las fórmulas de los voltajes de salida serían las siguientes:

$$V_{out1} = V2 \left(-\frac{R4}{RG} \right) \quad V_{out2} = V2 \left(\frac{RG + R5}{RG} \right)$$

Después de esto, usamos el método de superposición para obtener los valores totales de los voltajes de salida:

$$V_{out1} = V1 \left(\frac{RG + R4}{RG} \right) + V2 \left(-\frac{R4}{RG} \right) \quad V_{out2} = V1 \left(-\frac{R5}{RG} \right) + V2 \left(\frac{RG + R5}{RG} \right)$$

Ahora se calcula la diferenciación algebraica $V_{out1} - V_{out2}$:

$$V_{out1} - V_{out2} = V1 \left(\frac{RG + R4}{RG} \right) + V2 \left(-\frac{R4}{RG} \right) - V1 \left(-\frac{R5}{RG} \right) + V2 \left(\frac{RG + R5}{RG} \right)$$

Si el voltaje a la salida del circuito amplificador de instrumentación es igual a $V_{out1}-V_{out2}$, y el voltaje de entrada es igual a V_a-V_b , el valor de la ganancia vendría dado por la siguiente formula:

$$Ganancia = \left(1 + \frac{R4}{RG} + \frac{R5}{RG}\right)$$

Si definimos que $R4=R5$, entonces decimos:

$$Ganancia = \left(1 + \frac{2R}{RG}\right) ; \left(1 + \frac{2(5000)}{3333}\right) = \text{que para este caso, es igual a } 4$$

Una vez obtenida la amplificación individual procederemos al acoplamiento de un amplificador operacional en modo diferenciador. Esto con la intención de obtener la relación $(V_{out1}-V_{out2})$, con esta relación obtendremos por medio de métodos matemáticos los valores de la RTD. El diagrama final es el siguiente:

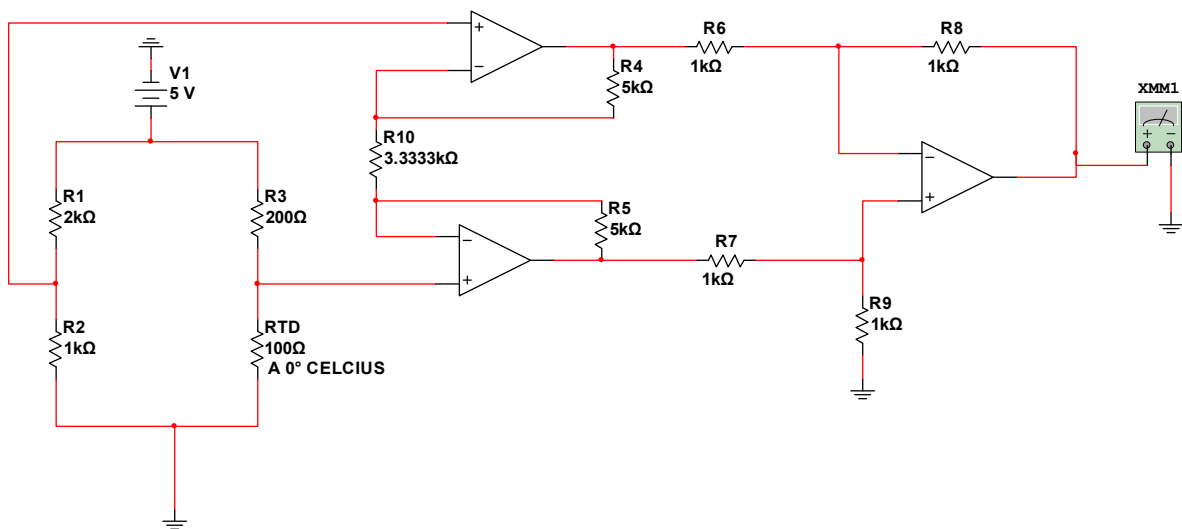


Figura D Circuito completo de la tarjeta electrónica

La fórmula para obtener el valor del voltaje final es la siguiente:

$$\left(\frac{R2}{R2+R1} - \frac{RTD}{R3+RTD}\right) * V_{cc} * Ganancia = Vf;$$

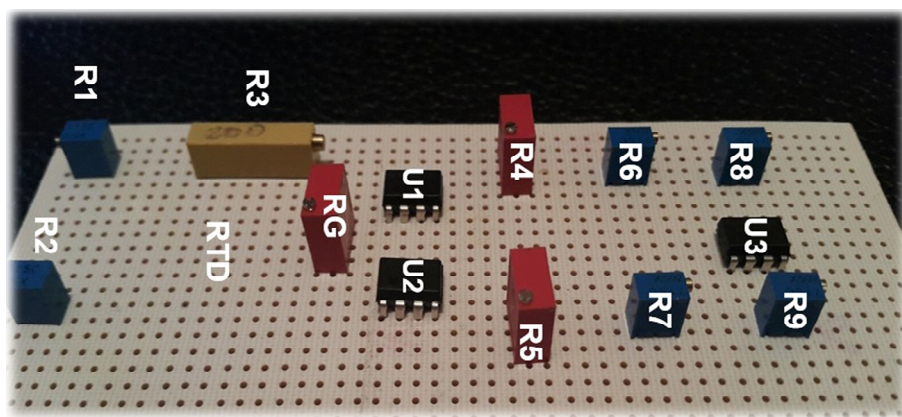


Figura E Arreglo de componentes en relación a la Figura D

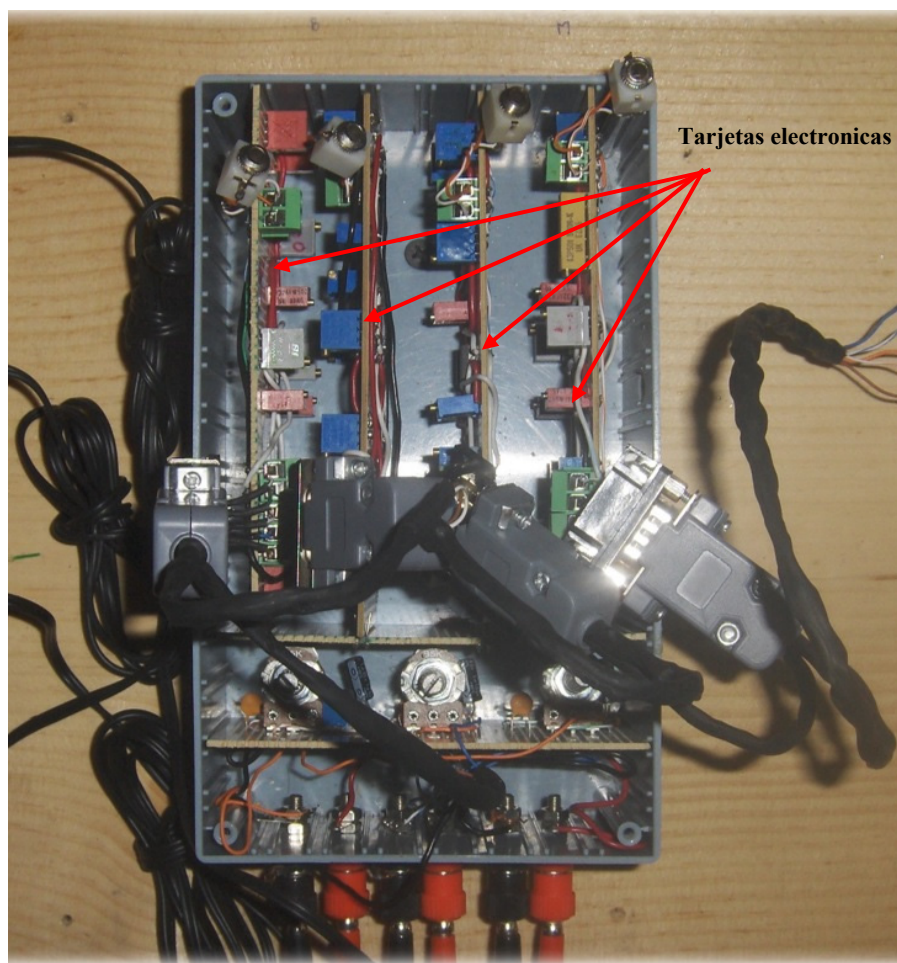


Figura F Tarjetas electrónicas dispuestas para cada sensor

Se requirió de regular el voltaje de las fuentes, para esto se calcularon los circuitos para las fuentes de 5 volts y para 10 volts. En la figura G podemos ver el diagrama electrónico y el cálculo de la resistencia.

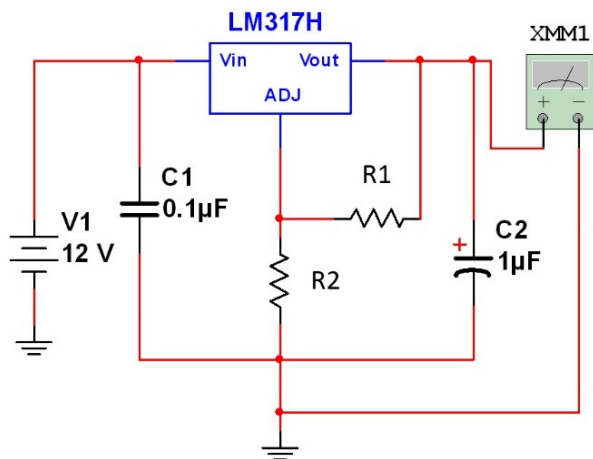


Figura G Circuito electrónico para reguladores de voltaje

Fuente de 10 volts

$$R2 = \frac{R1}{1.2} * (v_{out} - 1.2)$$

$$R2 = \frac{500}{1.2} * (10 - 1.2) = 3.6K\Omega$$

Fuente de 5 volts

$$R2 = \frac{R1}{1.2} * (v_{out} - 1.2)$$

$$R2 = \frac{500}{1.2} * (5 - 1.2) = 1.6K\Omega$$

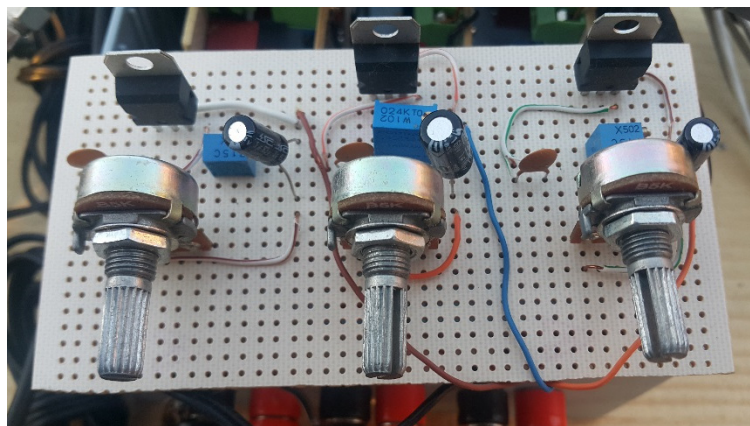


Figura H Reguladores de voltaje para las fuentes

Para la conexión entre las tarjetas, regulador y el adquisidor de datos fueron utilizados unos conectores del tipo DP9 para esto podemos ver en la figura J.

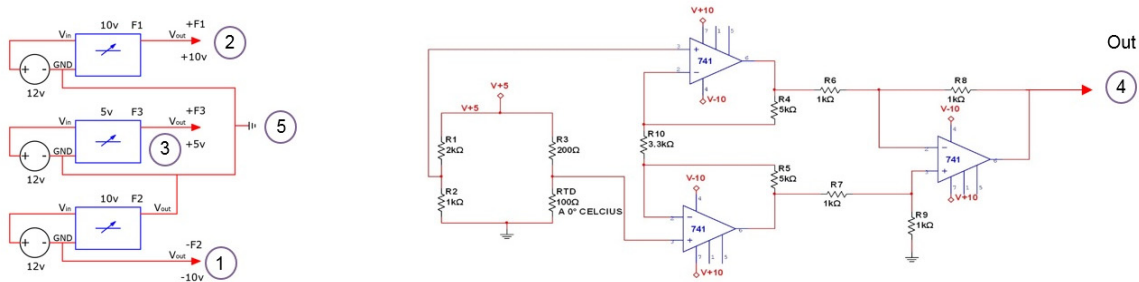


Figura I Esquemas electrónicos y sus 5 conexiones hacia el conector DP9

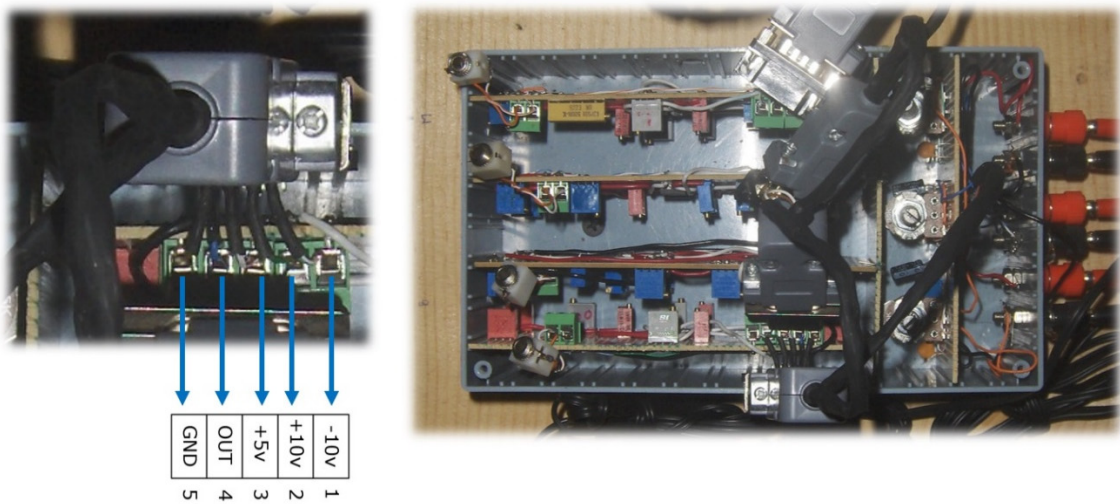


Figura J Conector DP9 y su arreglo de configuración de los cables

Una vez conectada una tarjeta se fueron conectando las unas con otras entre los conectores DP9, para esto se utilizaron las otras líneas disponibles del conector ver figura I. (OUT1, OUT2, OUT3, y OUT4)



Figura K conexiones entre tarjetas por medio del conector DP9

Al final en la última salida del 4to conector DP9 que contenía todas las salidas de cada tarjeta, se conectan al DATAQ®, en la figura L podemos ver el diagrama electrónico.

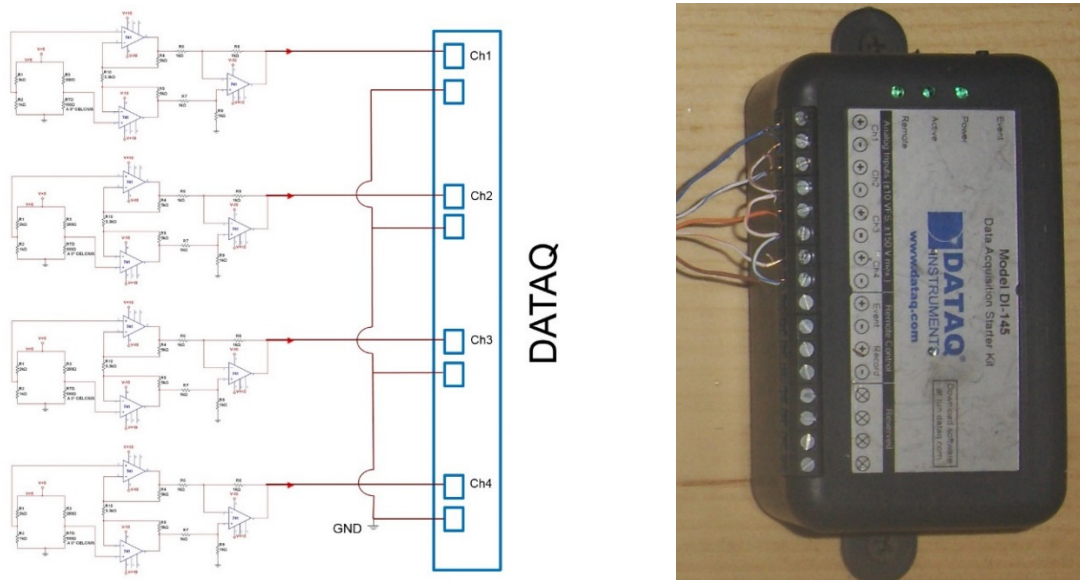


Figura L Conexión de tarjetas hacia el adquisidor de datos

Al final todo el sistema de adquisición de datos lo podemos ver en la figura M, cada tarjeta tenía provisto un conector TRS para la conexión de los sensores RTD.

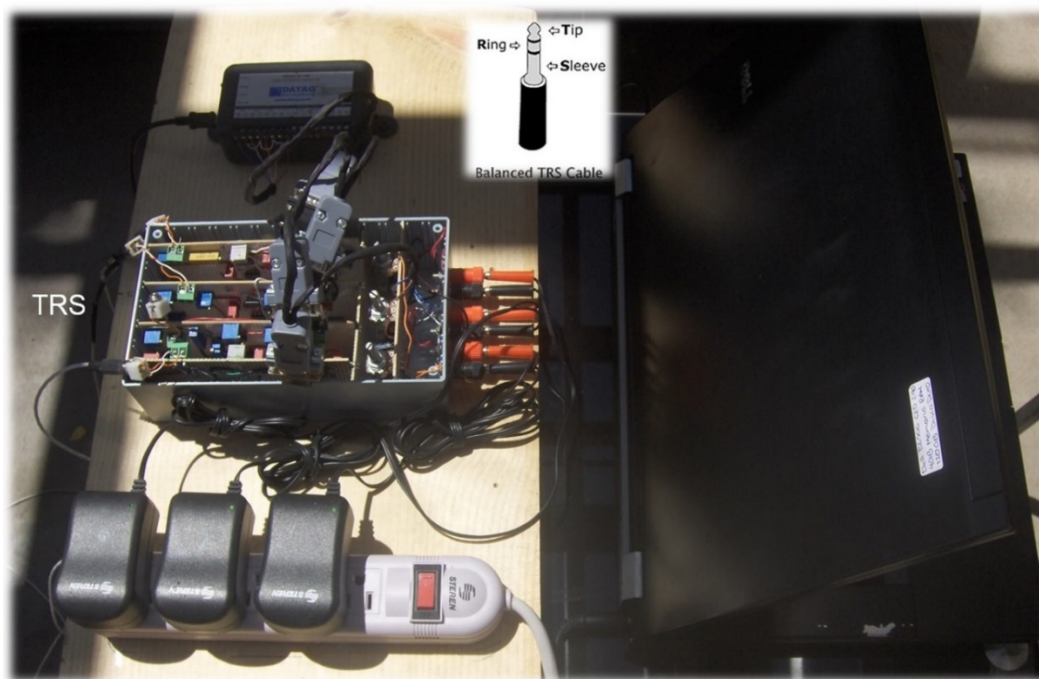


Figura M Sistema completo del adquisidor de datos

ANEXO 8 (Diseño del circuito de adquisición de datos 2)

La presente es la portada referente al registro público del derecho de autor, para el sistema de software desarrollado para pruebas de calentamiento del asfalto, con el propósito de conocer los tiempos de la transferencia de calor.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: FLORES ZAMORA MARCO ANTONIO
PRIETO BALIMANN TOMAS RAFAEL
VALDEZ SALAS BENJAMIN
VELASCO MORALES HECTOR

TITULO: MONITOREO DE VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE CALOR

RAMA: PROGRAMAS DE COMPUTACION

TITULARES: FLORES ZAMORA MARCO ANTONIO
PRIETO BALIMANN TOMAS RAFAEL
VALDEZ SALAS BENJAMIN
VELASCO MORALES HECTOR

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2017-091811220900-01

México D.F., a 23 de octubre de 2017

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESUS PARETS GOMEZ

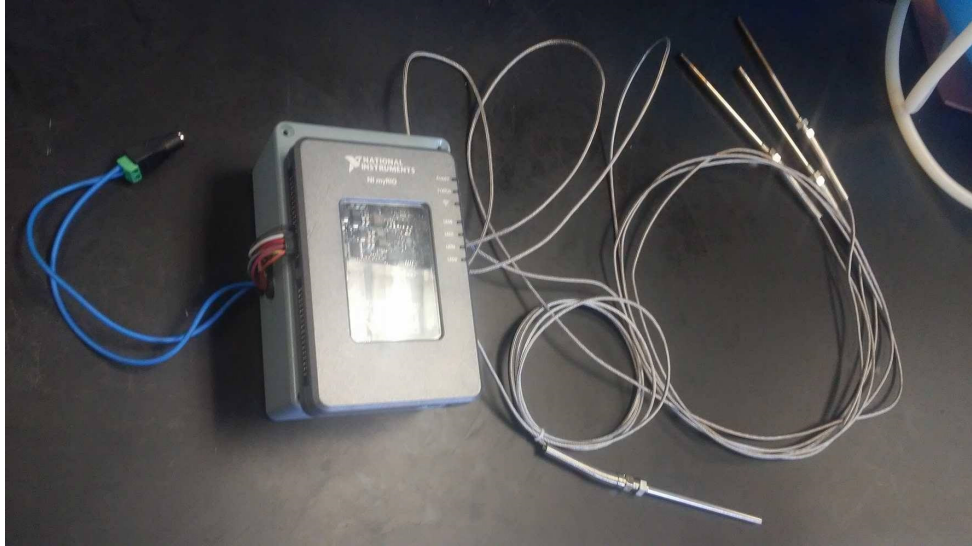

SECRETARÍA DE CULTURA
INSTITUTO NACIONAL DEL
DERECHO DE AUTOR
DIRECCIÓN DEL REGISTRO
PÚBLICO
DEL DERECHO DE AUTOR



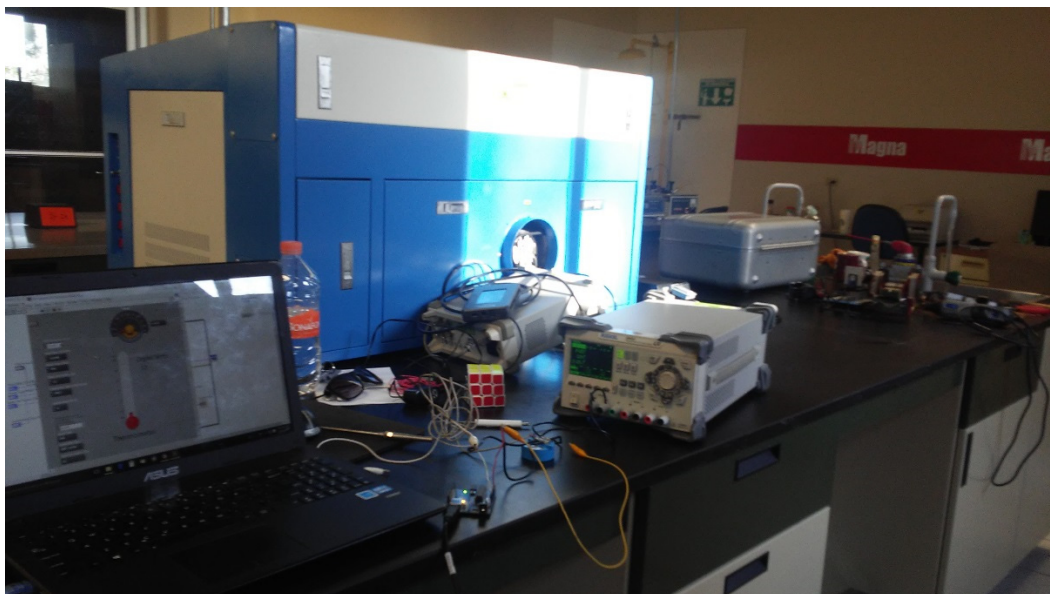
CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA


INDAUTOR
Instituto Nacional del Derecho de Autor

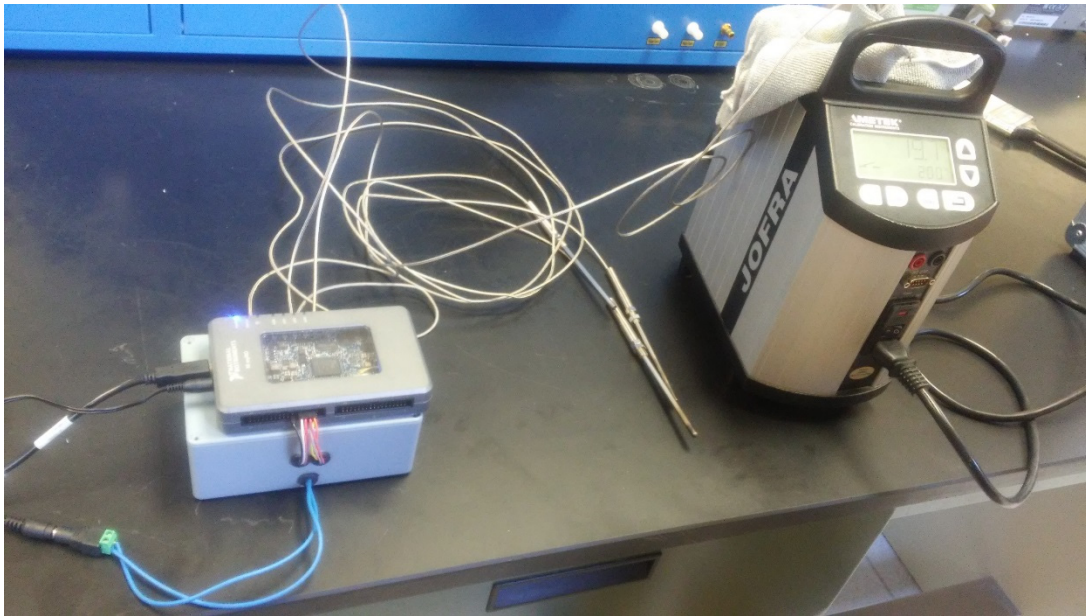
En la siguiente figura podemos ver todo el sistema electrónico, donde cuenta con un conector de 24V para la alimentación de los controladores, los 4 transmisores están en la caja y estos son conectados tanto a los sensores RTD y al MyRIO®.



Para el desarrollo del sistema electrónico se consideró la calibración de los transmisores, sensores RTD y del sistema MyRIO®.



En la imagen de arriba podemos ver la calibración de los transmisores de señal y los sensores, para esto se utilizó un calibrador Fluke.

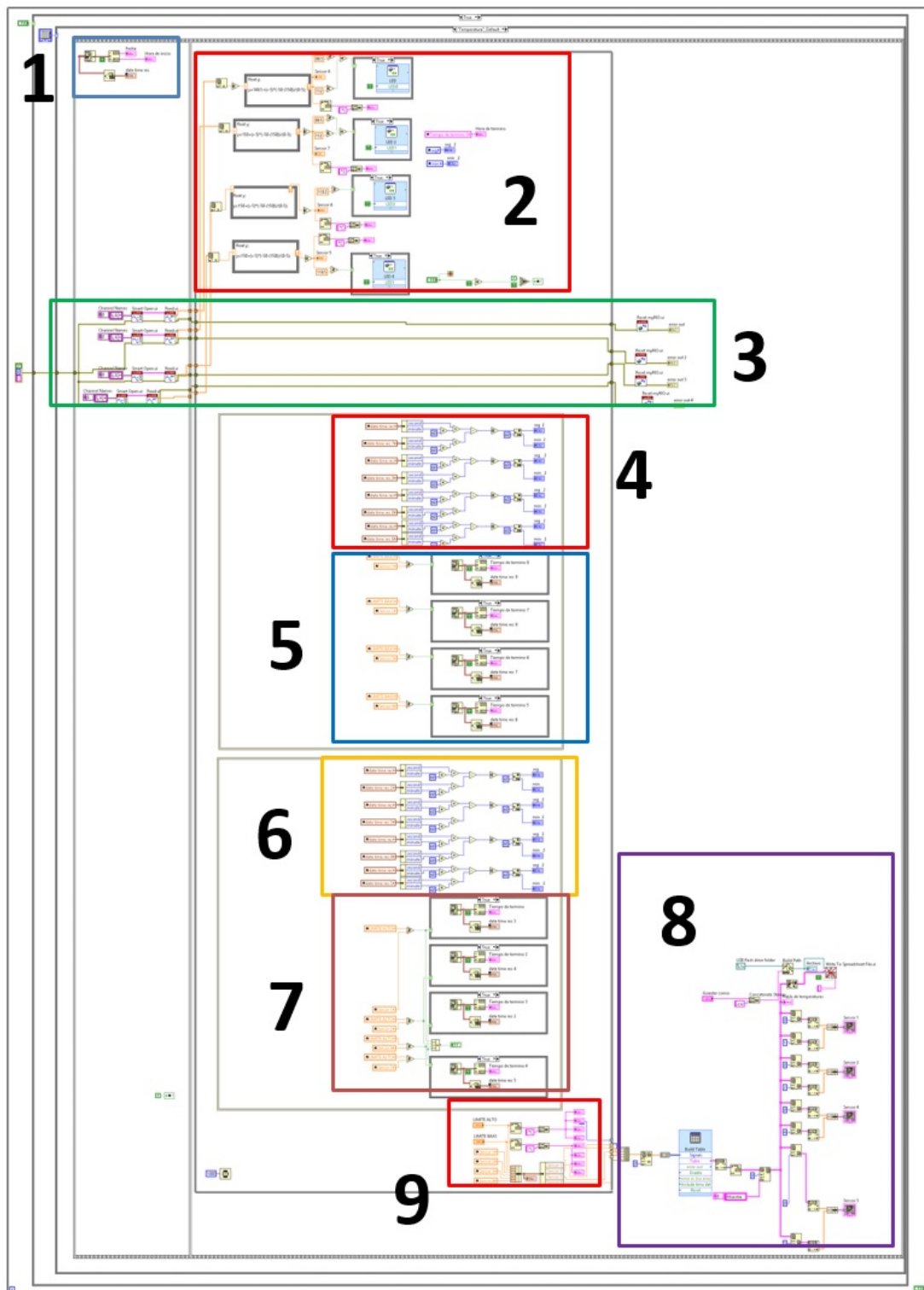


En la imagen de arriba podemos ver la calibración de los sensores con un calibrador de temperatura de la marca Ametek® de la serie CTC-140A donde se calibraba una temperatura constante para verificar su funcionamiento y calibración.

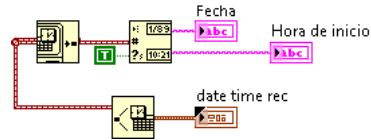


En la imagen de arriba podemos ver el dispositivo Fluke 5500A que fue utilizado para la calibración de MyRIO® se enviaba una señal de voltaje para asegurarnos que el MyRIO® diera una lectura correspondiente a esta misma señal.

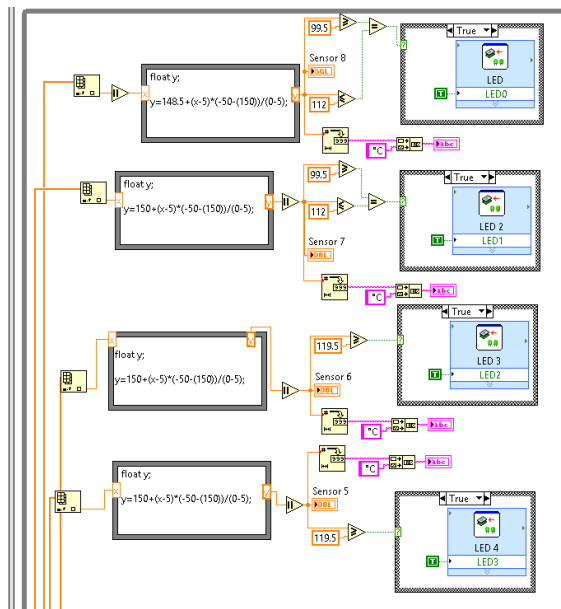
Explicación en el funcionamiento del software desarrollado en LabVIEW®.



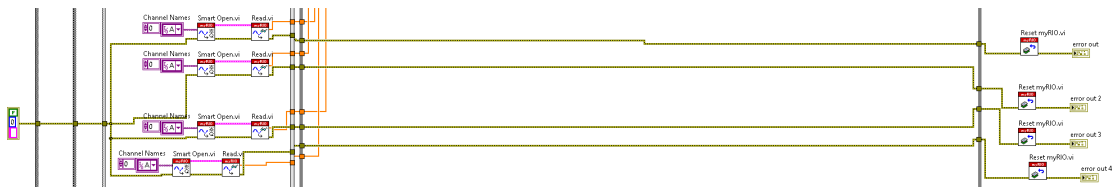
1. En esta parte del código se captura la fecha y la hora de inicio de las mediciones.



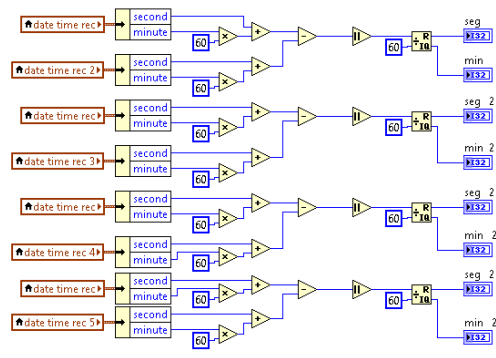
2. En este bloque se caracteriza la señal de los sensores de temperatura, para posteriormente mostrarse en la pantalla principal. Se compara la señal con temperaturas establecidas; Dado el caso que llegue al valor establecido se encenderá un led del NI MyRIO®.



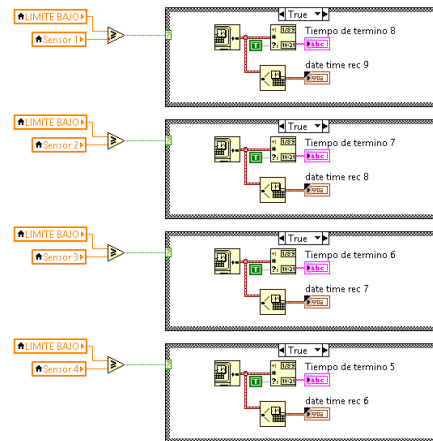
3. En este bloque se inicializa y cierra la instrumentación con NI MyRIO®, también se da la lectura de los sensores, se eligen las terminales a las que se conectaran para su lectura.



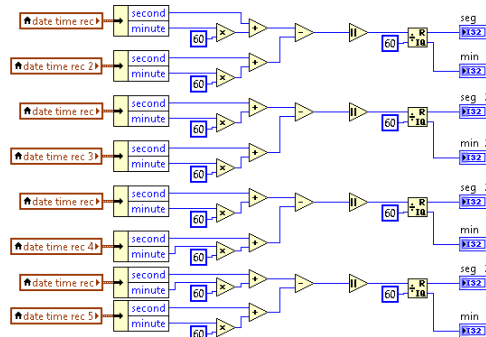
- Se obtiene y se calcula el tiempo en alcanzar el limite más bajo para posteriormente mostrarlo en la pantalla principal.



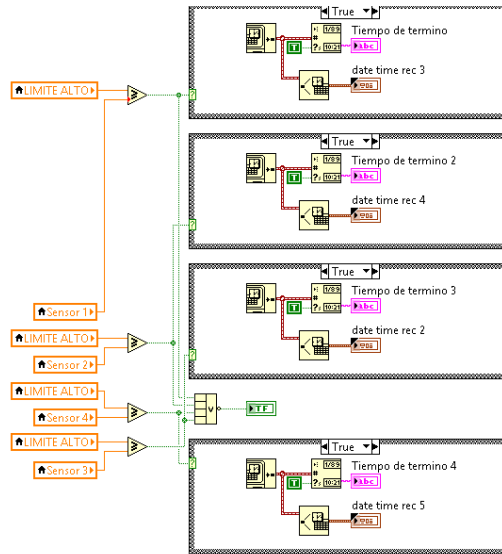
- Se guarda el tiempo cuando llega al límite más bajo de temperatura.



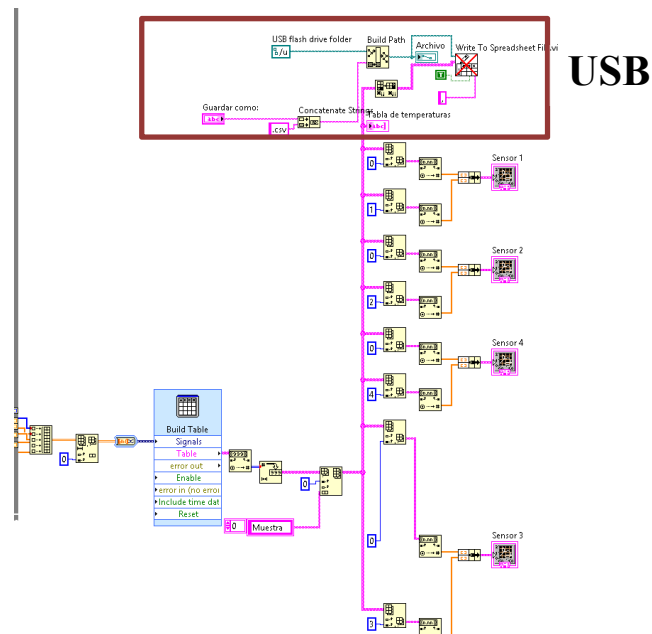
- Se obtiene y se calcula el tiempo en alcanzar el limite más alto para posteriormente mostrarlo en la pantalla principal.



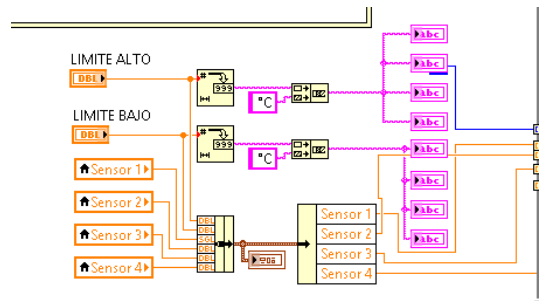
7. Se guarda el tiempo cuando llega al límite más alto de temperatura.



8. Se extraen los datos de cada sensor para mostrarlos en la tabla, así como en sus respectivas gráficas. En la parte superior se encuentra el código que se usa para que los datos sean guardados en una memoria USB.



9. Se guardan los datos de las lecturas de los sensores, así como los límites para ser mostrados en tiempo real en la gráfica principal de manera conjunta.



ANEXO 9 (Obra y máquina utilizada en Mexicali)

En la prolongación Venustiano Carranza se elaboró una obra de mantenimiento en noviembre del 2014 y se realizó una investigación de campo para poder analizar la tecnología que se está utilizando. Esta tecnología no es la única tecnología que se utiliza en México, dentro de la investigación elaborada, se determinó que el gobierno de México, también recurre al arrendamiento de maquinaria de la industria privada. Pero en este caso la maquinaria es de adquisición gubernamental, las obras son diseñadas para reciclar 50 milímetros y agregar una capa nueva de 50 milímetros de material asfáltico nuevo.



En la imagen de arriba podemos ver la maquinaria utilizada para el reciclaje, se utiliza un pre calentador y después un troque que aporta material asfáltico virgen a una máquina que escarifica 50 milímetros y esparce una capa de 50 milímetros con este material recuperado y el material virgen lo transporta a una nueva capa de 50 milímetros.



En la imagen de arriba podemos ver el pre calentador, este utiliza gas LP, el problema principal es que la flama impacta directo a la carpeta asfáltica y esta tecnología ya está prohibida en Canada, EUA y Europa por la alta generación de humos.



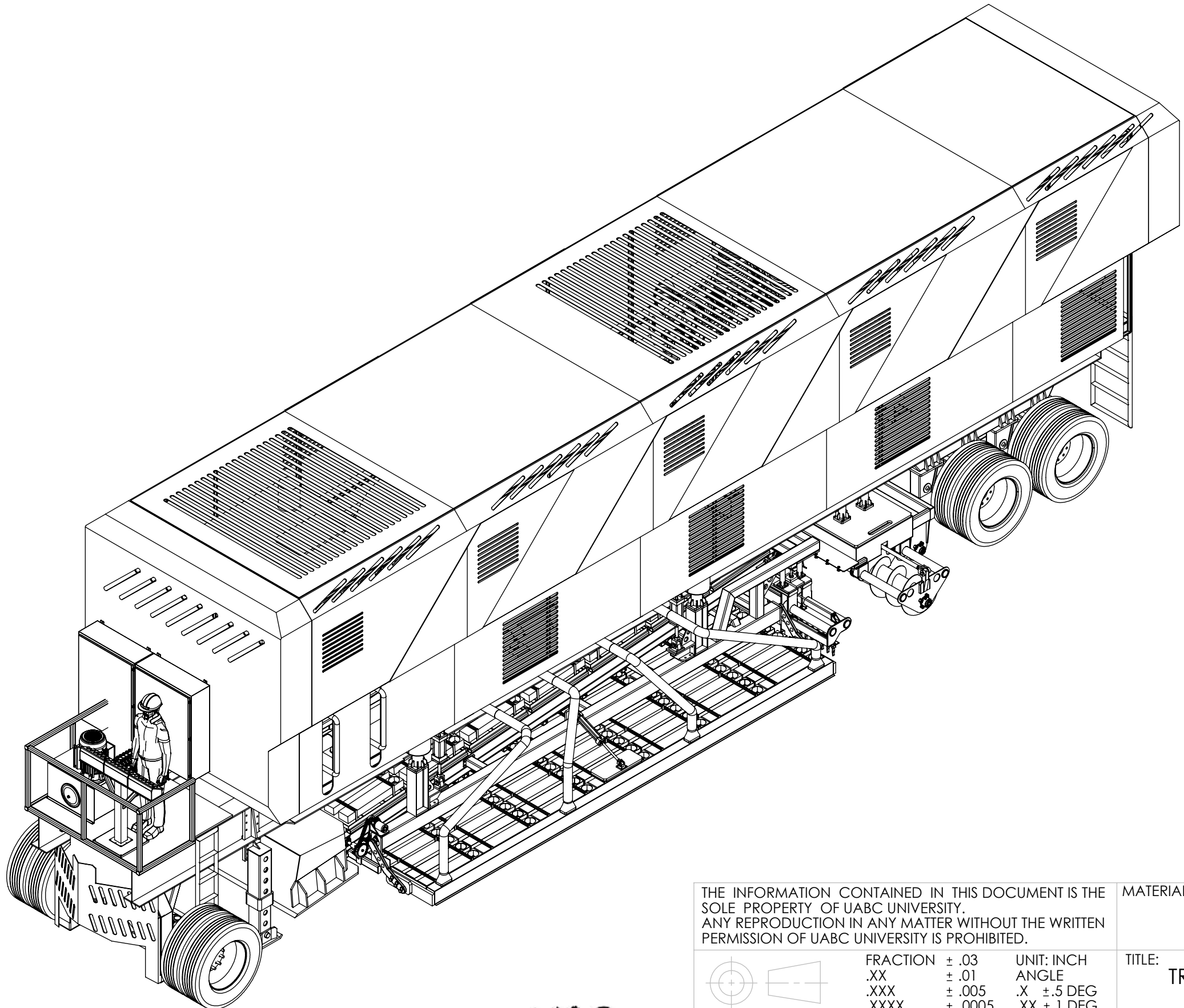
En la imagen de arriba podemos ver la máquina que se encarga de recibir el asfalto nuevo, además tiene una cama de calentamiento, seguido tiene unos escarificadores que desprenden el asfalto a 50 milímetros. En la imagen de abajo, podemos ver que están dispuesto unos aspersores de cemento asfáltico después de los escarificadores.



En la imagen de abajo podemos ver la salida del asfalto por la parte trasera de la máquina escarificadora.



ANEXO 10 (Planos del Mecanismo)



THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.

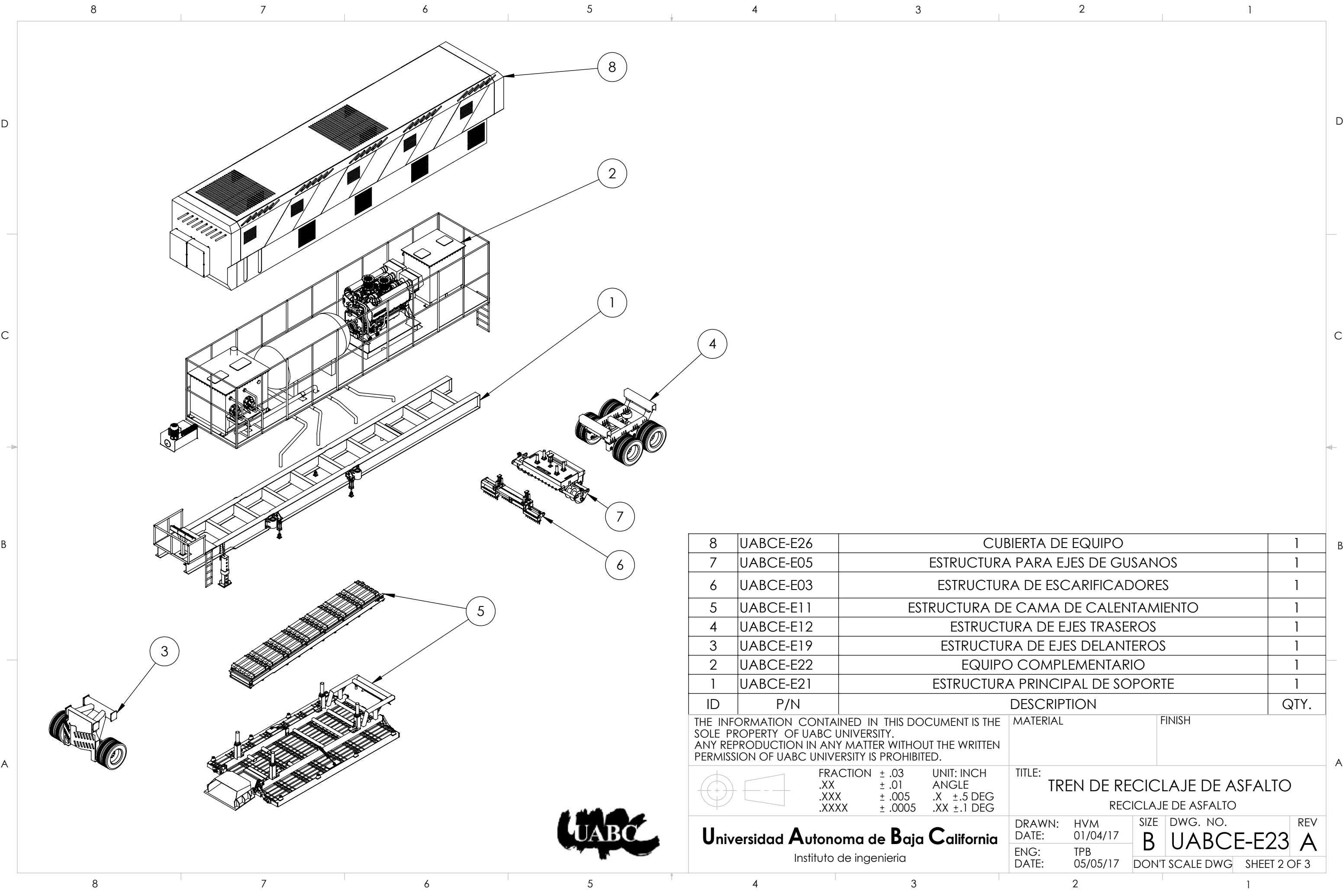
	FRACTION	± .03	UNIT: INCH
	.XX	± .01	ANGLE
	.XXX	± .005	.X ±.5 DEG
	.XXXX	± .0005	.XX ±.1 DEG

Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

MATERIAL	FINISH
----------	--------

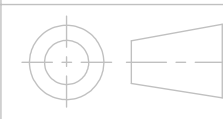
TITLE:
TREN DE RECICLAJE DE ASFALTO
RECICLAJE DE ASFALTO

DRAWN: HVM	SIZE	DWG. NO.	REV
DATE: 01/04/17	B	UABCE-E23	A
ENG: TPB	DON'T SCALE DWG	SHEET 1 OF 3	
DATE: 05/05/17			



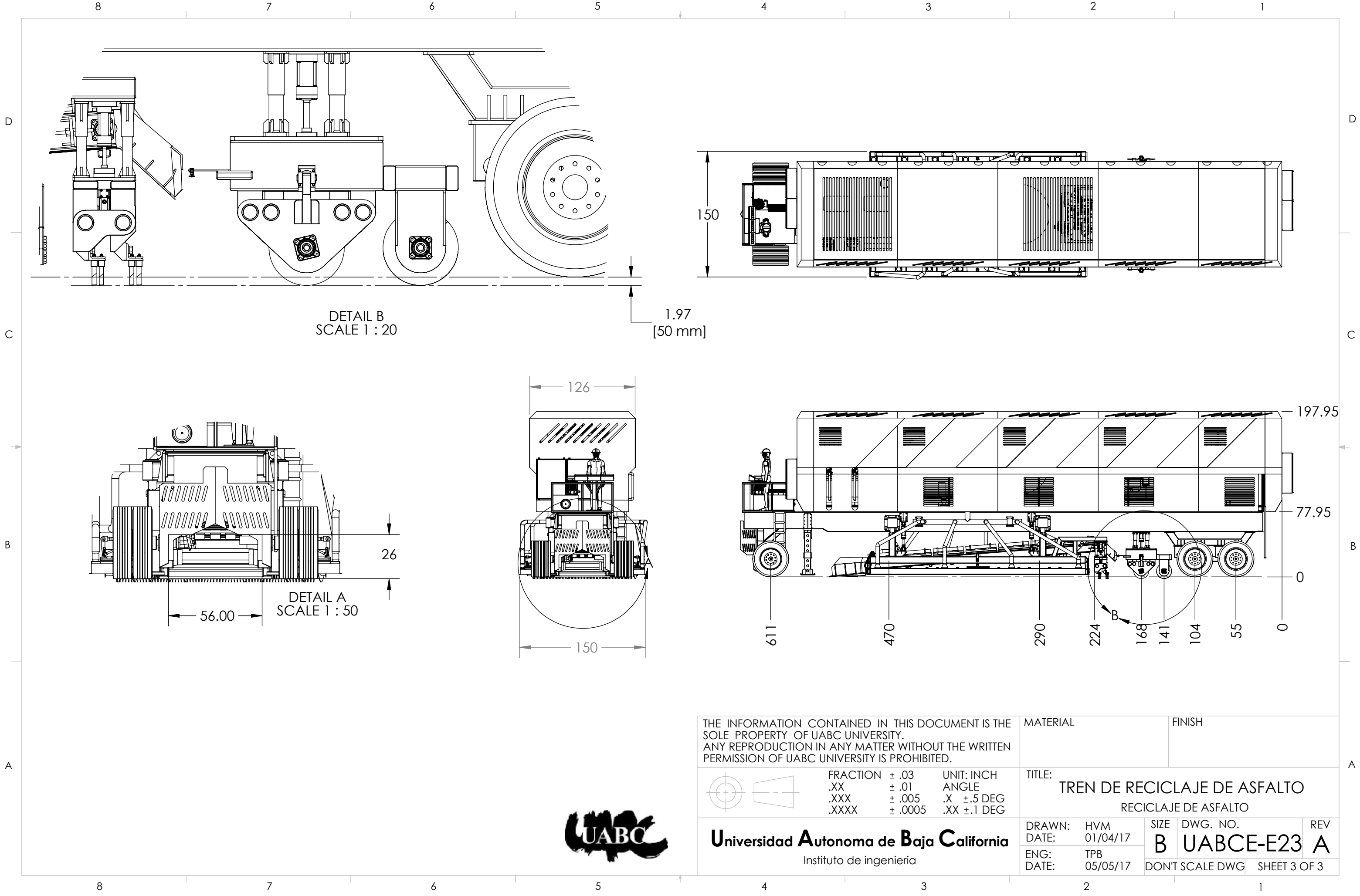
8	UABCE-E26	CUBIERTA DE EQUIPO	1
7	UABCE-E05	ESTRUCTURA PARA EJES DE GUSANOS	1
6	UABCE-E03	ESTRUCTURA DE ESCARIFICADORES	1
5	UABCE-E11	ESTRUCTURA DE CAMA DE CALENTAMIENTO	1
4	UABCE-E12	ESTRUCTURA DE EJES TRASEROS	1
3	UABCE-E19	ESTRUCTURA DE EJES DELANTEROS	1
2	UABCE-E22	EQUIPO COMPLEMENTARIO	1
1	UABCE-E21	ESTRUCTURA PRINCIPAL DE SOPORTE	1
ID	P/N	DESCRIPTION	QTY.

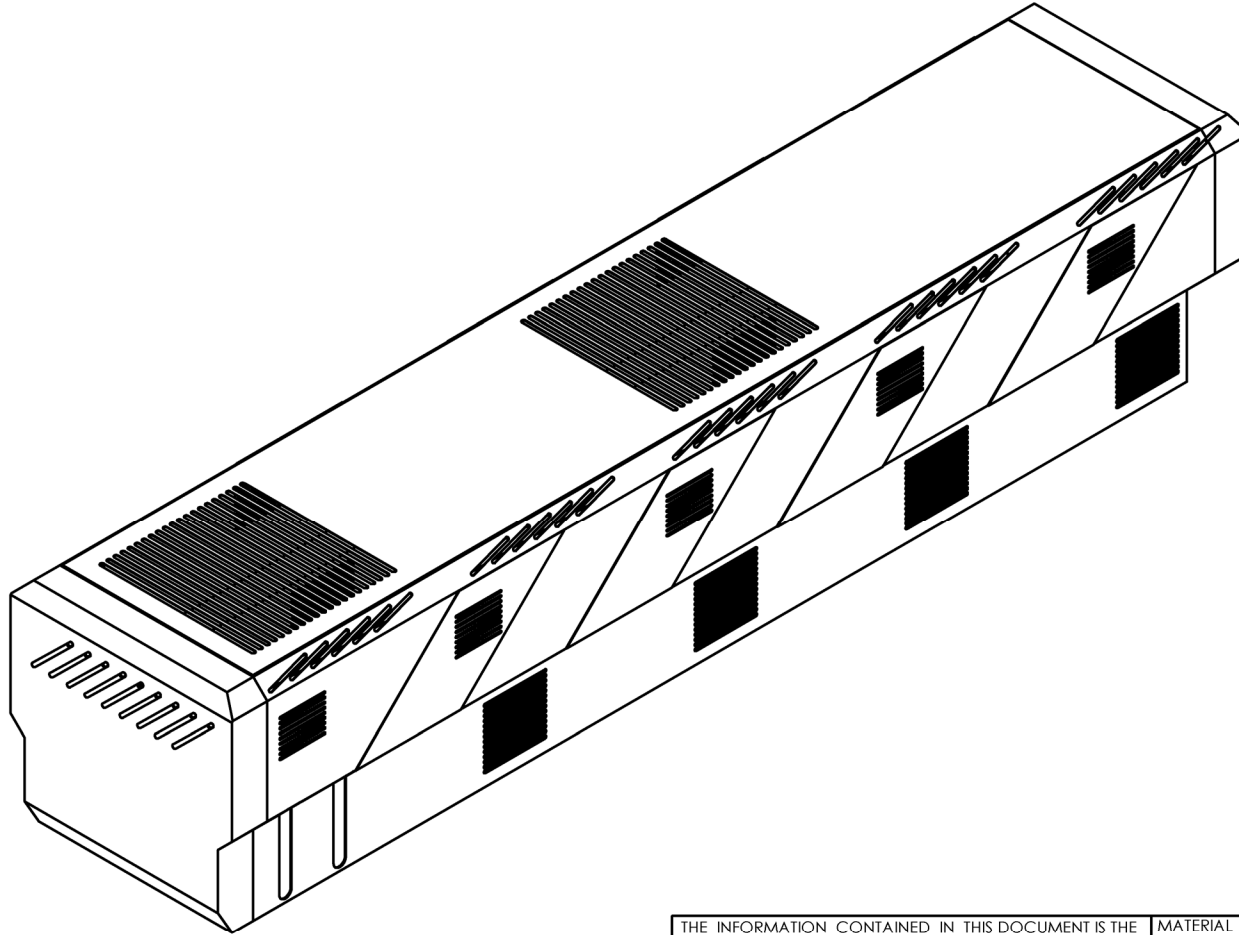
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.

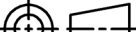
	FRACTION	± .03	UNIT: INCH
	.XX	± .01	ANGLE
	.XXX	± .005	.X ±.5 DEG
	.XXXX	± .0005	.XX ±.1 DEG

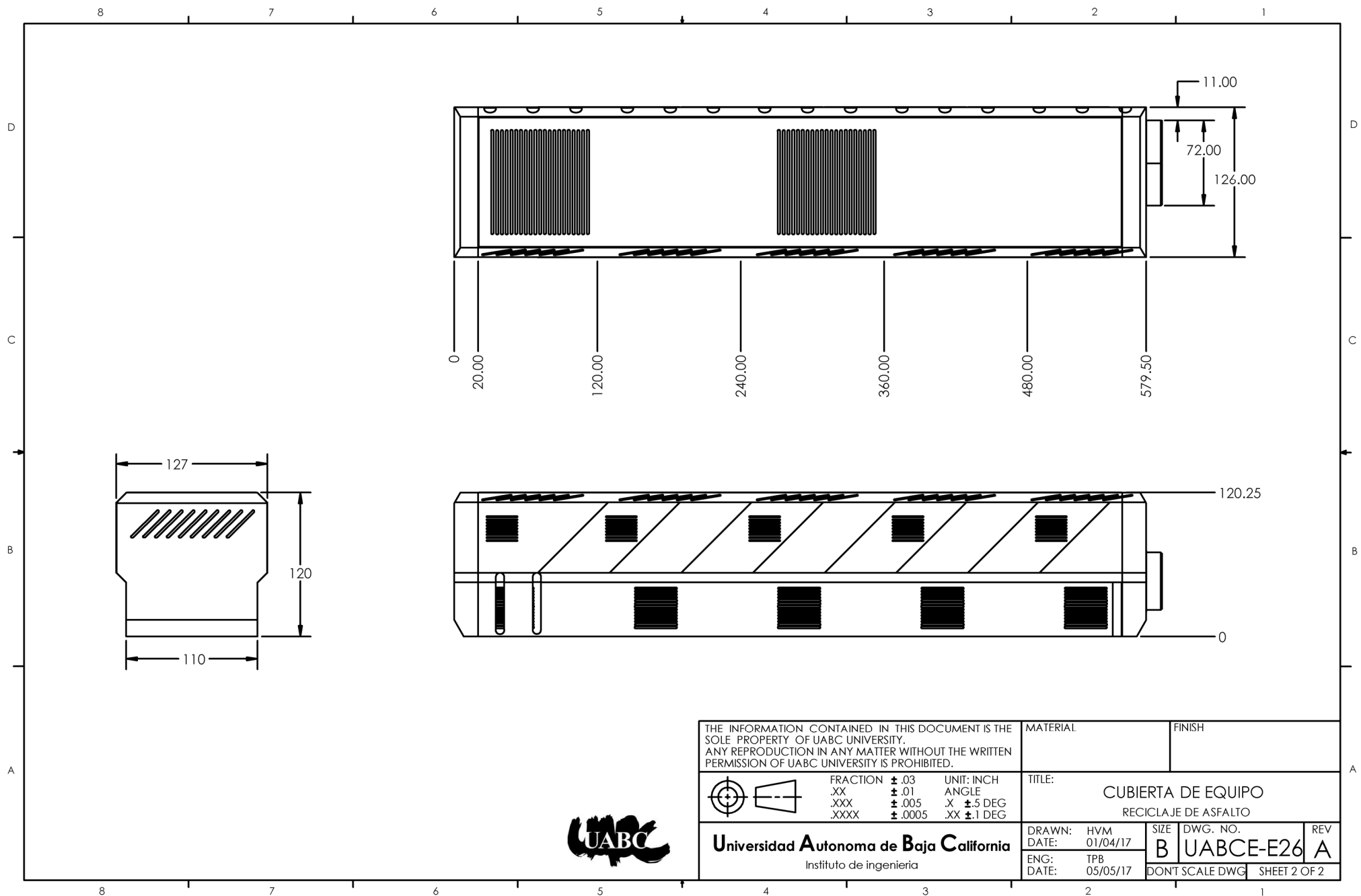
Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

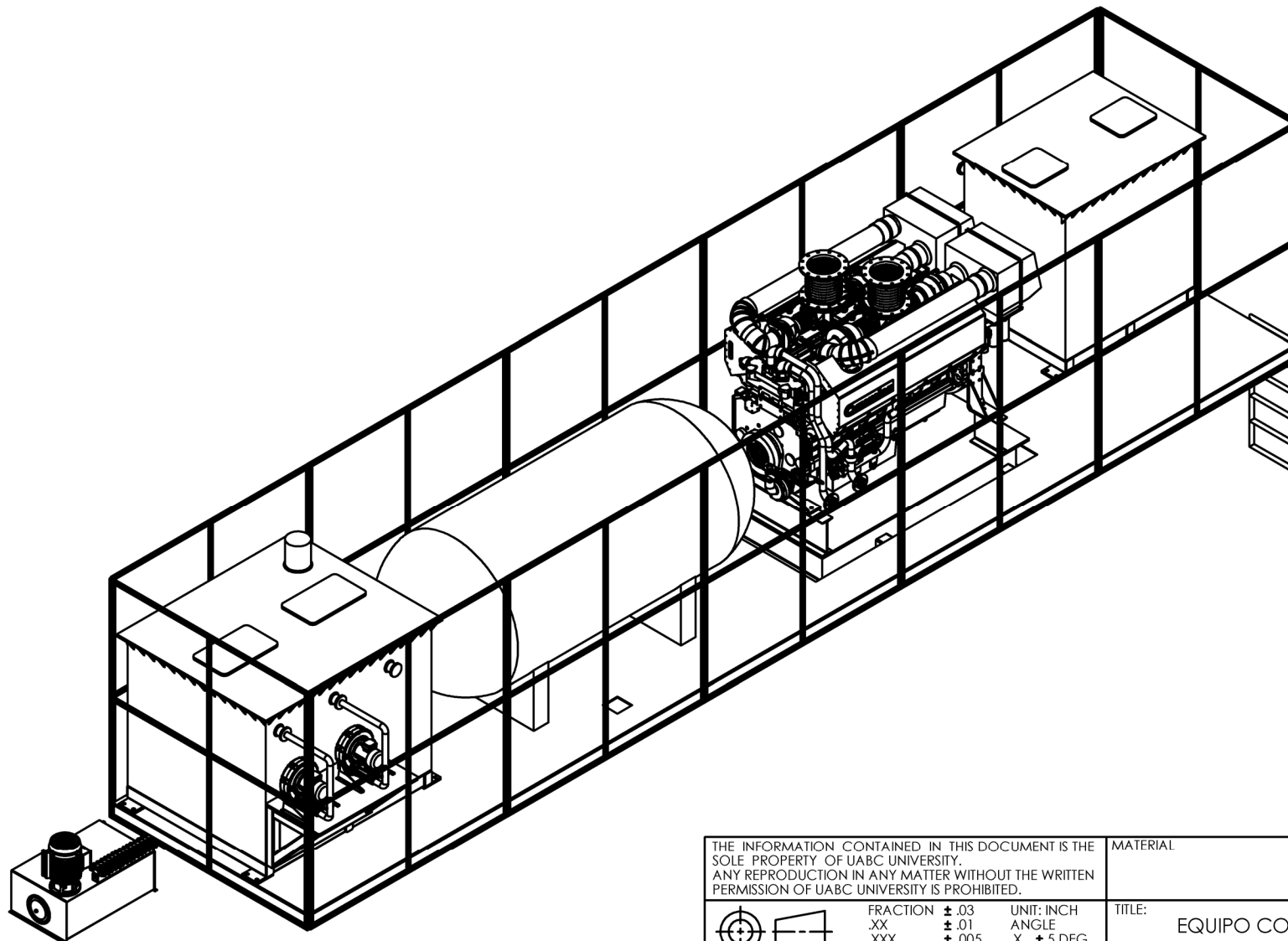
MATERIAL		FINISH		
TITLE: TREN DE RECICLAJE DE ASFALTO RECICLAJE DE ASFALTO				
DRAWN:	HVM	SIZE	DWG. NO.	REV
DATE:	01/04/17	B	UABCE-E23	A
ENG:	TPB	DON'T SCALE DWG	SHEET 2 OF 3	
DATE:	05/05/17			



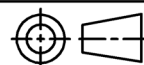


THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.			MATERIAL		FINISH		
 FRACTION ±.03 UNIT: INCH .XX ±.01 ANGLE .XXX ±.005 .X ±.5 DEG .XXXX ±.0005 .XX ±.1 DEG			TITLE: CUBIERTA DE EQUIPO RECICLAJE DE ASFALTO				
Universidad Autónoma de Baja California Instituto de ingeniería			DRAWN: HVM DATE: 01/04/17		SIZE B	DWG. NO. UABCE-E26	REV A
			ENG: TPB DATE: 05/05/17		DON'T SCALE DWG		SHEET 1 OF 2





THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE
SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY.
ANY REPRODUCTION IN ANY MANNER WITHOUT THE WRITTEN
PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



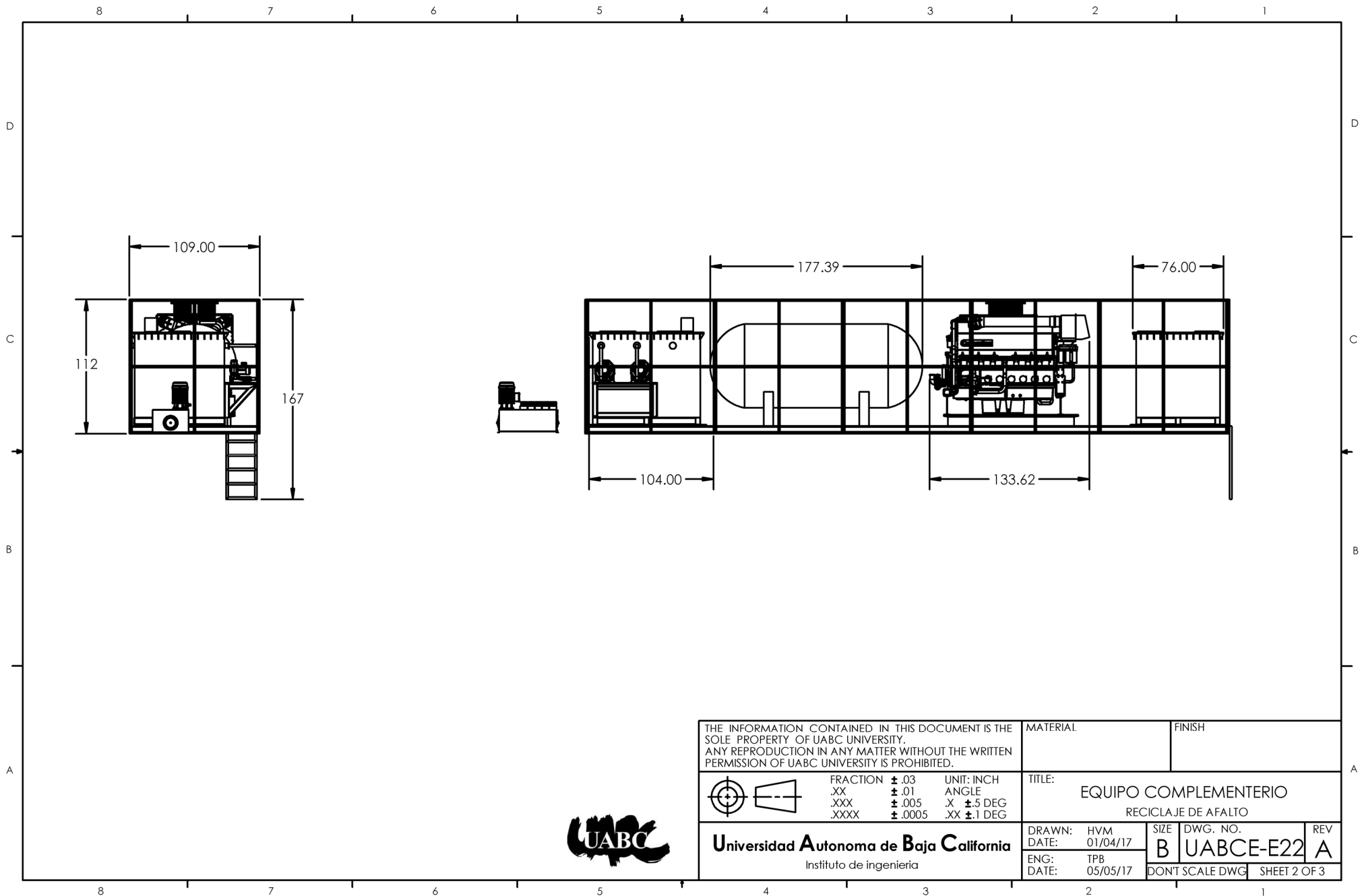
FRACTION	$\pm .03$	UNIT: INCH
.XX	$\pm .01$	ANGLE
.XXX	$\pm .005$	.X $\pm .5$ DEG
.XXXX	$\pm .0005$	.XX $\pm .1$ DEG

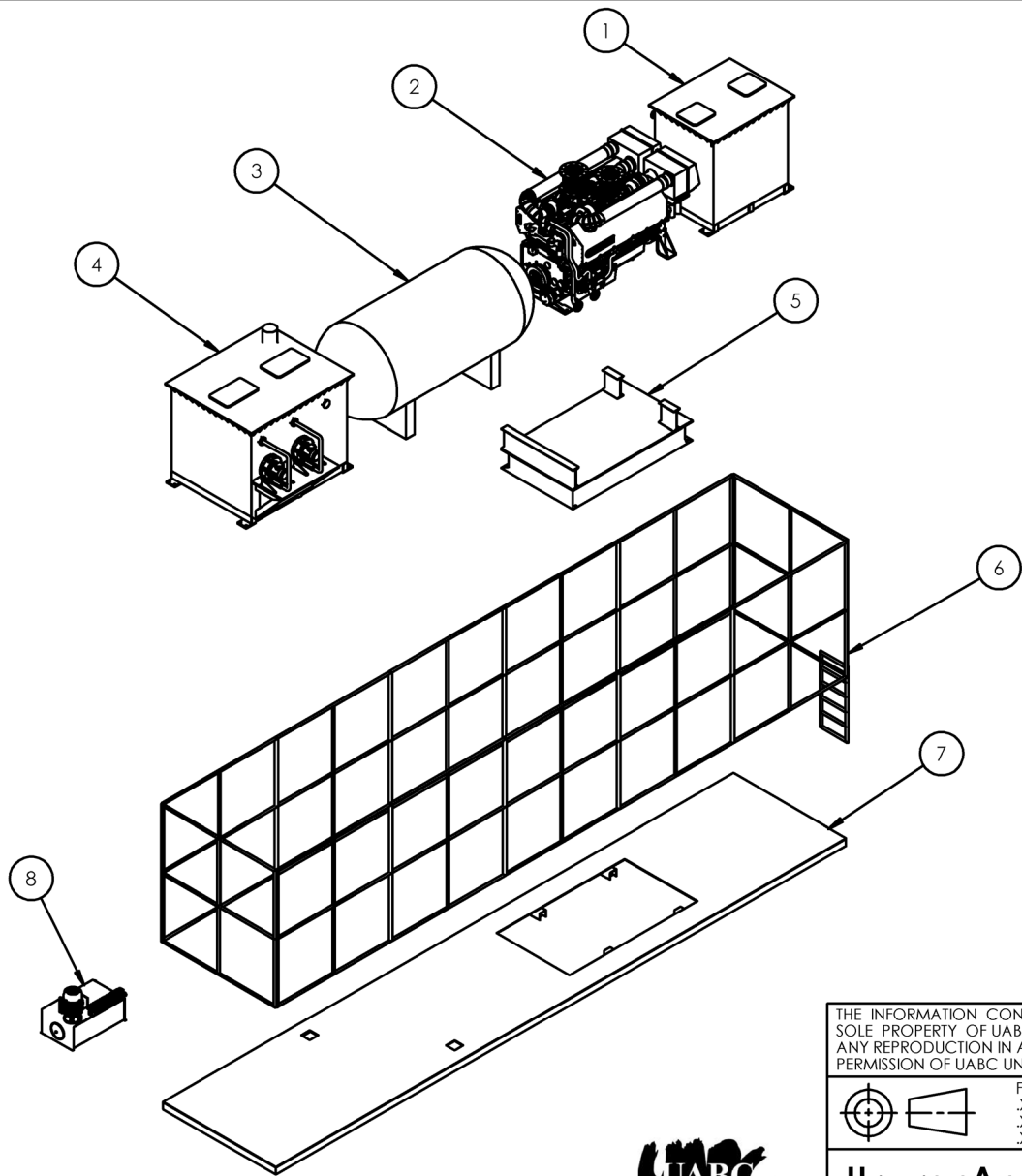
Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

MATERIAL	FINISH
----------	--------

TITLE:	EQUIPO COMPLEMENTARIO RECICLAJE DE ASFALTO		
--------	---	--	--

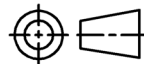
DRAWN:	HVM	SIZE	DWG. NO.	REV
DATE:	01/04/17	B	UABCE-E22	A
ENG:	TPB	DON'T SCALE DWG		SHEET 1 OF 3
DATE:	05/05/17			





8	ESTACION HIDRAULICA	1
7	BASE GENERAL	1
6	ESTRUCTURA PARA CUBIERTA DE EQUIPO	1
5	BASE PARA MOTOR	1
4	TANQUE PARA INCINERADOR	1
3	TANQUE DE GAS LP	1
2	MOTOR DIESEL	1
1	TANQUE PARA EMULSION O REJUVENECADOR	1
ID	DESCRIPTION	QTY.

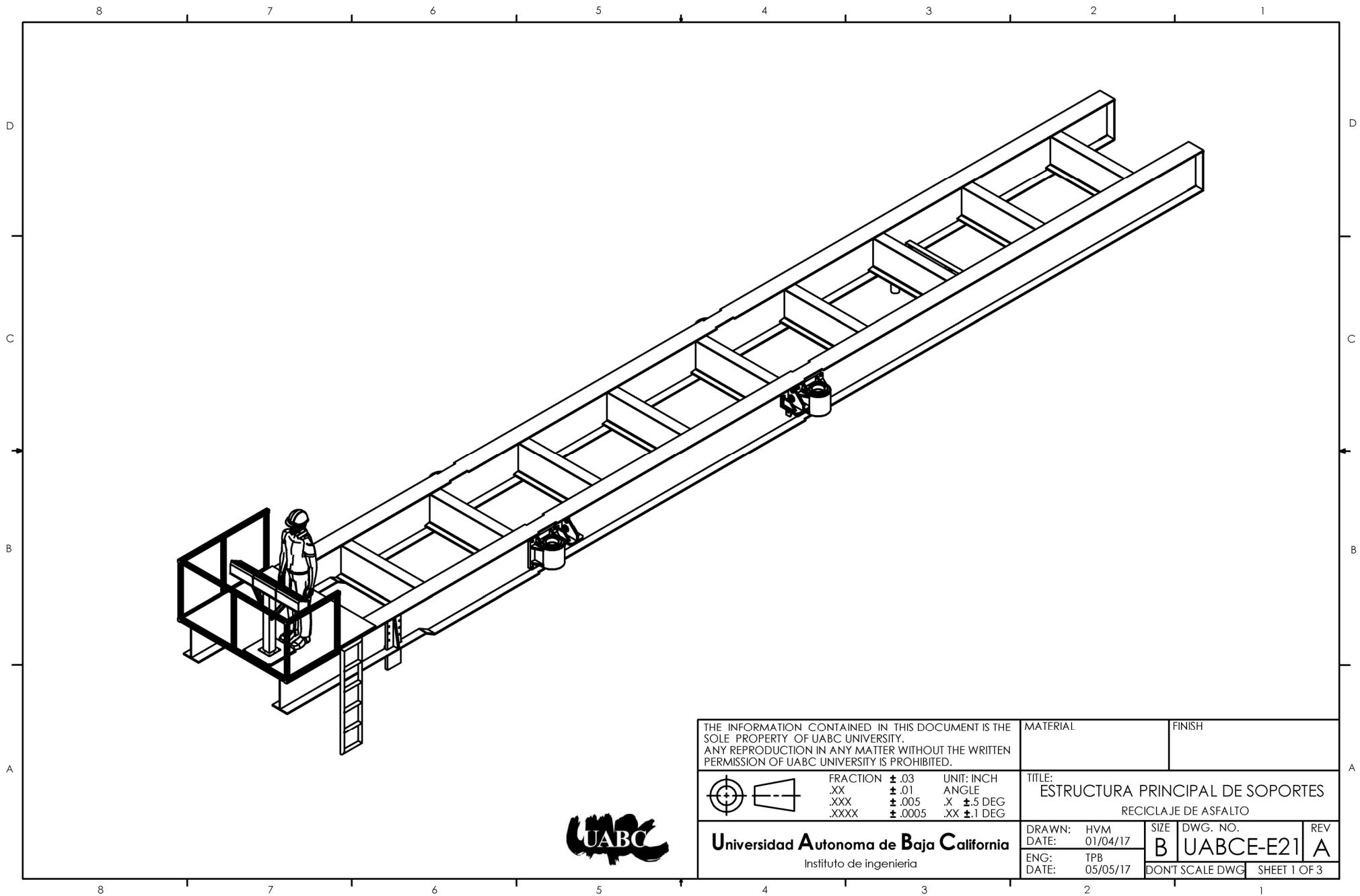
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MANNER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.

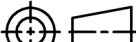


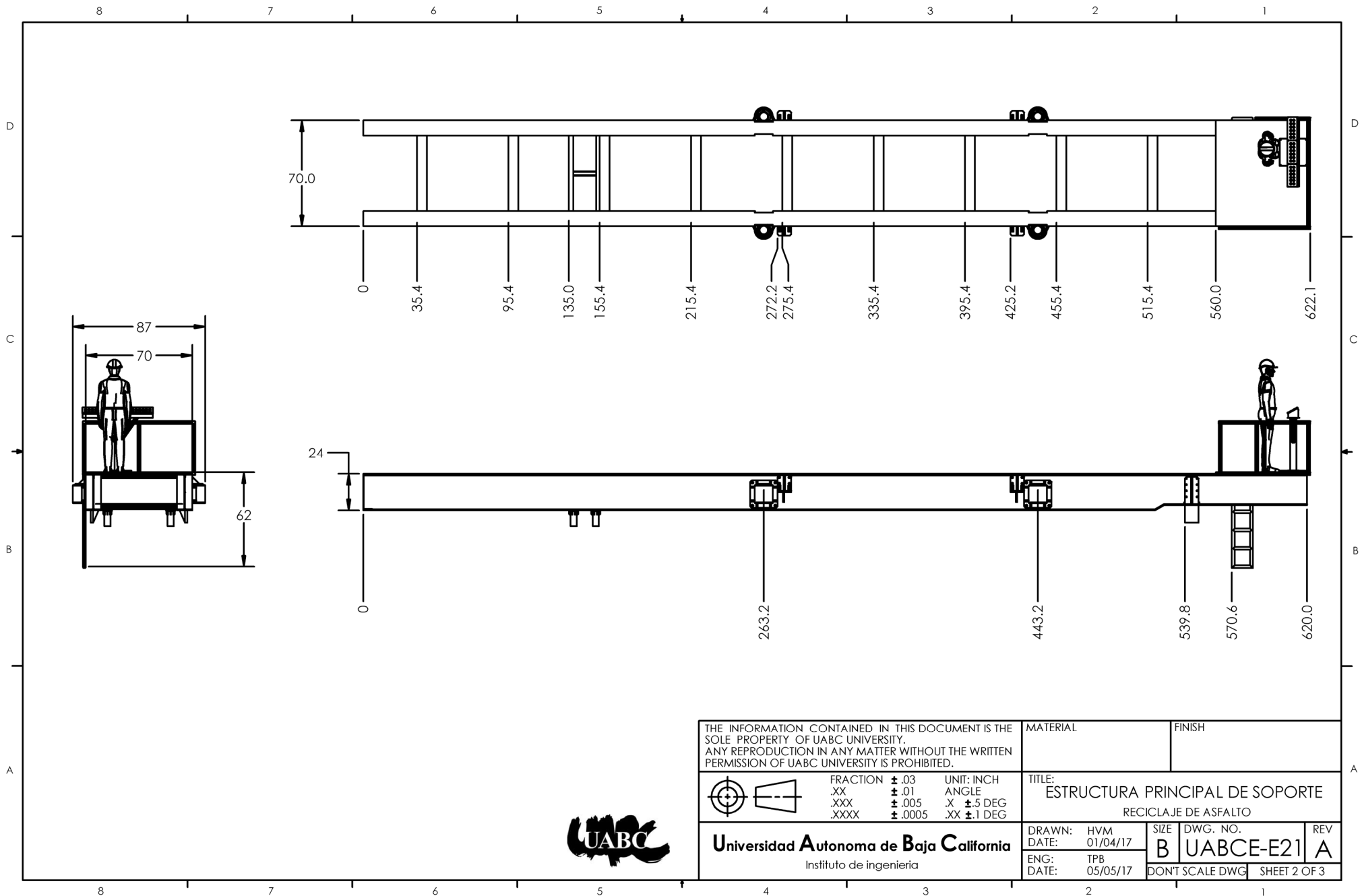
FRACTION $\pm .03$ UNIT: INCH
.XX $\pm .01$ ANGLE
.XXX $\pm .005$.X $\pm .5$ DEG
.XXXX $\pm .0005$.XX $\pm .1$ DEG

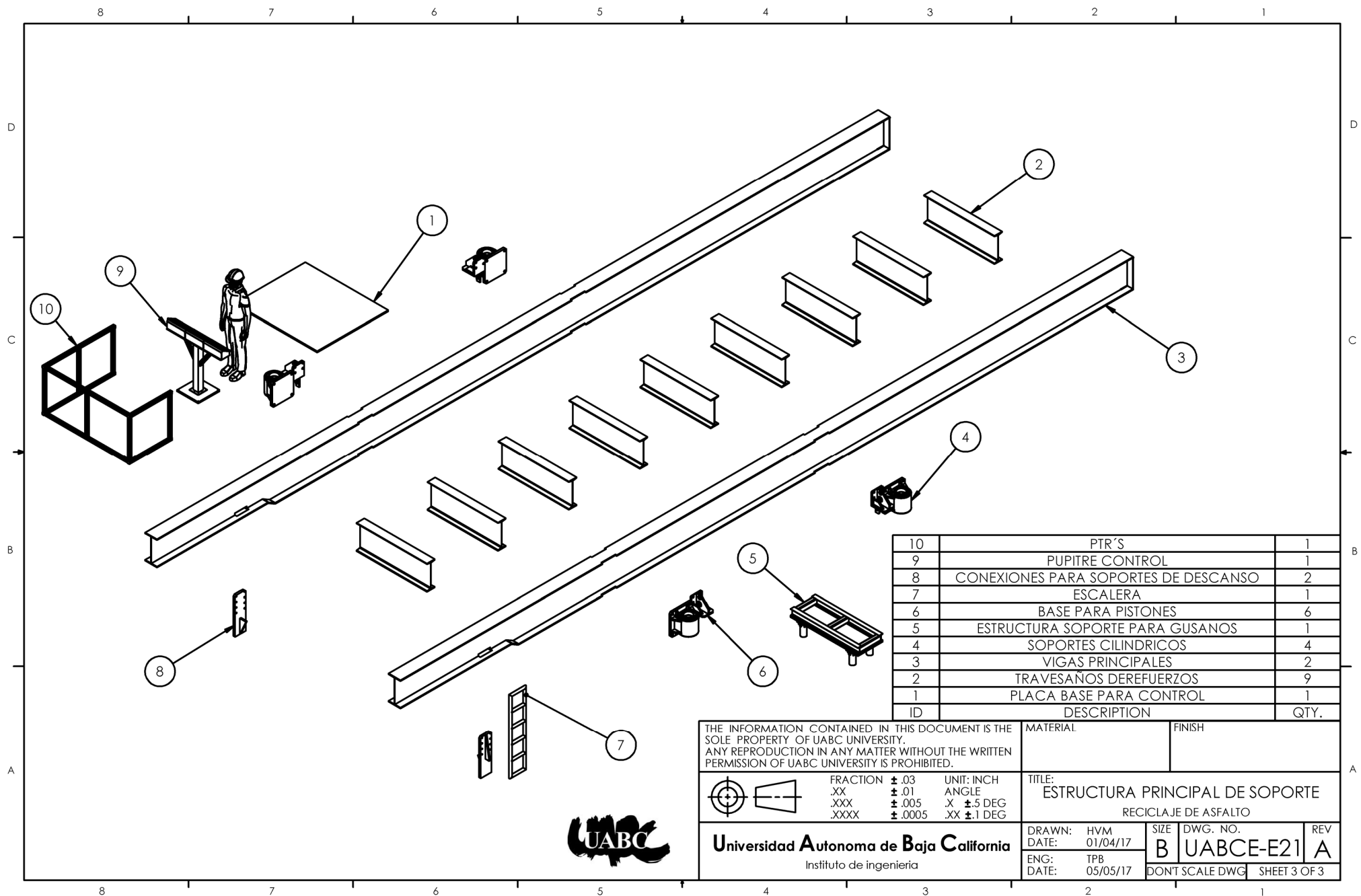
Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

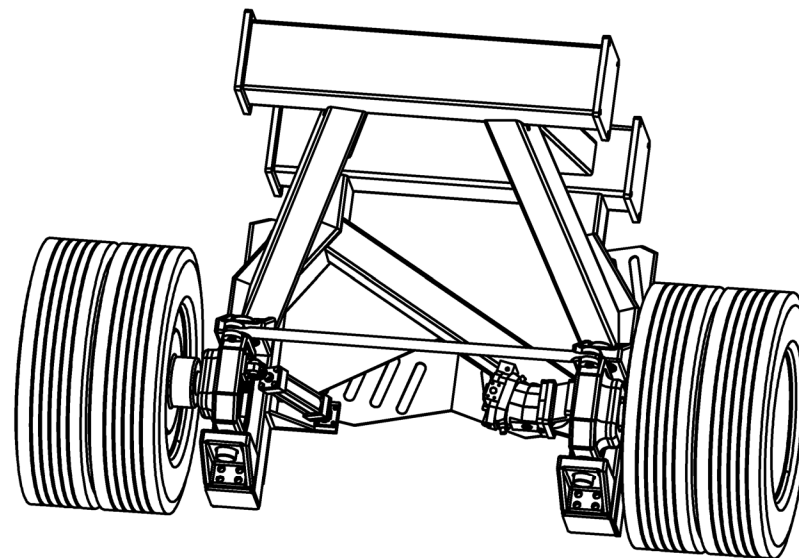
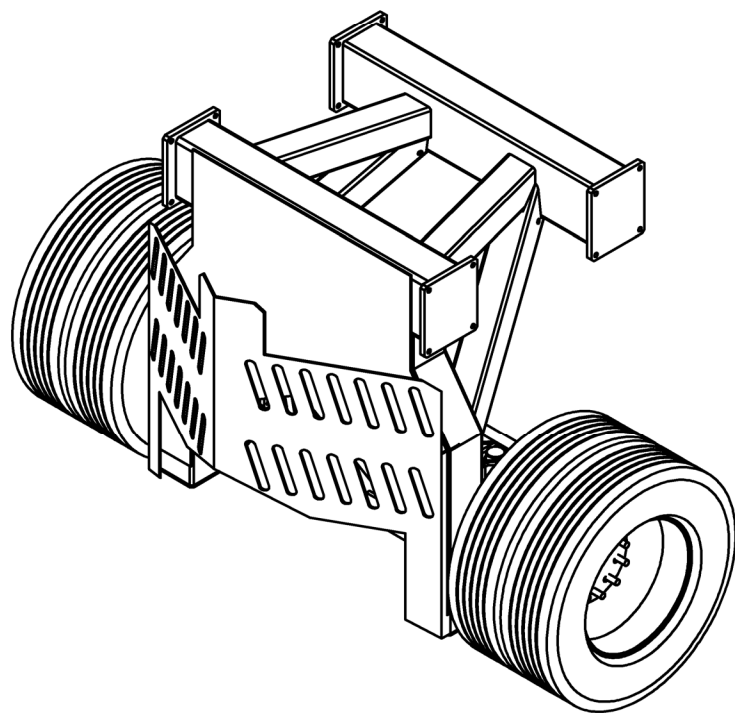
MATERIAL		FINISH	
TITLE: EQUIPO COMPLEMENTARIO RECICLAJE DE ASFALTO			
DRAWN: HVM	DATE: 01/04/17	SIZE B	DWG. NO. UABCE-E22
ENG: TPB	DATE: 05/05/17	DONT SCALE DWG	SHEET 3 OF 3
		REV A	



THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.				MATERIAL		FINISH		
		FRACTION		±.03	UNIT: INCH		TITLE: ESTRUCTURA PRINCIPAL DE SOPORTES RECICLAJE DE ASFALTO	
		.XX		±.01	ANGLE			
		.XXX		±.005	X ±.5 DEG			
		.XXXX		±.0005	.XX ±.1 DEG			
Universidad Autonoma de Baja California Instituto de ingenieria				DRAWN: HVM DATE: 01/04/17		SIZE B	DWG. NO. UABCE-E21	REV A
				ENG: TPB DATE: 05/05/17		DON'T SCALE DWG		SHEET 1 OF 3



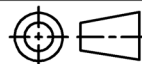




NOTA:
LA ESTRUCTURA TIENE LA OPCION DE COLOCAR 2
PISTONES Ó DOS MOTORES HIDRAULICOS Ó COMO SE
MUESTRA, DE MANERA COMBINADA.



THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE
SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY.
ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN
PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



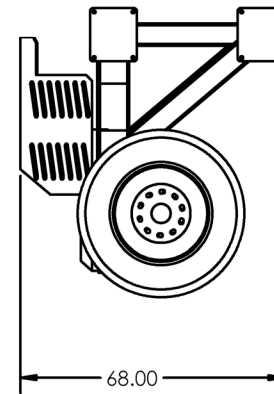
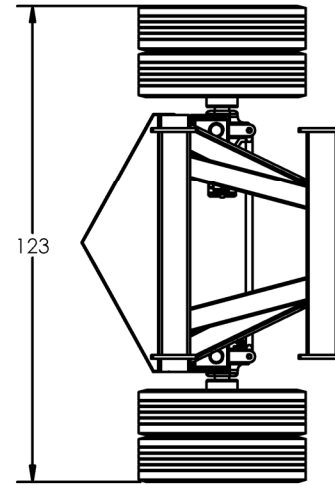
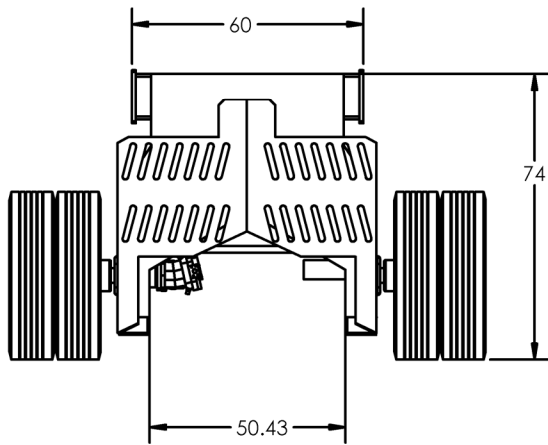
FRACTION	± .03	UNIT: INCH
.XX	± .01	ANGLE
.XXX	± .005	.X ±.5 DEG
.XXXX	± .0005	.XX ±.1 DEG

Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

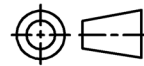
MATERIAL	FINISH
----------	--------

TITLE: ESTRUCTURA DE EJES DELANTEROS RECICLAJE DE ASFALTO	
--	--

DRAWN: HVM	SIZE	DWG. NO.	REV
DATE: 01/04/17	B	UABCE-E19	A
ENG: TPB	DON'T SCALE DWG		SHEET 1 OF 3
DATE: 05/05/17			



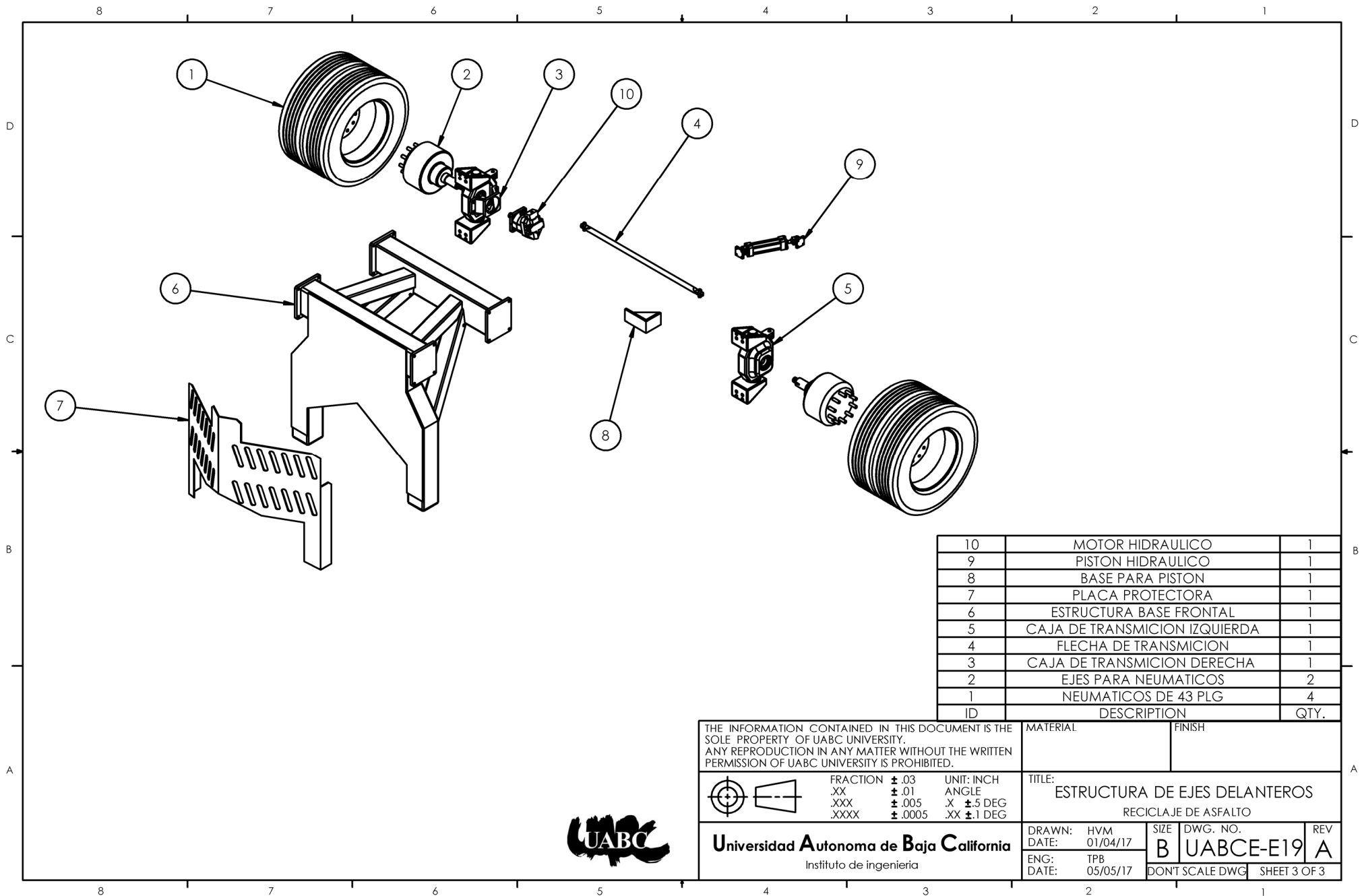
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE
SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY.
ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN
PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



FRACTION	± .03	UNIT: INCH
.XX	± .01	ANGLE
.XXX	± .005	.X ± .5 DEG
.XXXX	± .0005	.XX ± .1 DEG

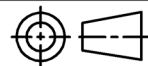
Universidad Autónoma de Baja California
Instituto de ingeniería

MATERIAL		FINISH	
TITLE: ESTRUCTURA DE EJES DELANTEROS RECICLAJE DE ASFALTO			
DRAWN: DATE:	HVM 01/04/17	SIZE B	DWG. NO. UABCE-E19
ENG: DATE:	TPB 05/05/17	DONT SCALE DWG	REV A
		SHEET 2 OF 3	



10	MOTOR HIDRAULICO	1
9	PISTON HIDRAULICO	1
8	BASE PARA PISTON	1
7	PLACA PROTECTORA	1
6	ESTRUCTURA BASE FRONTAL	1
5	CAJA DE TRANSMICION IZQUIERDA	1
4	FLECHA DE TRANSMICION	1
3	CAJA DE TRANSMICION DERECHA	1
2	EJES PARA NEUMATICOS	2
1	NEUMATICOS DE 43 PLG	4
ID	DESCRIPTION	QTY.

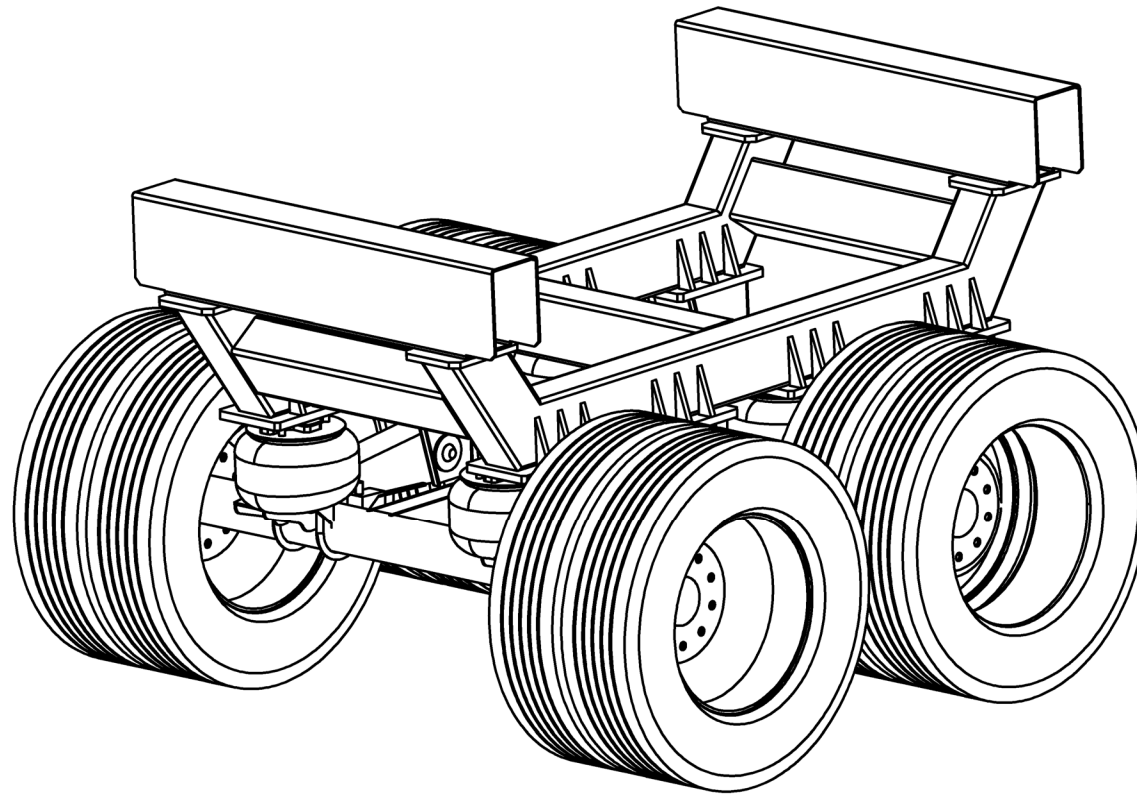
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



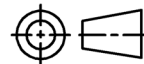
FRACTION	±.03	UNIT: INCH
.XX	±.01	ANGLE
.XXX	±.005	.X ±.5 DEG
.XXXX	±.0005	.XX ±.1 DEG

Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

MATERIAL		FINISH		
TITLE: ESTRUCTURA DE EJES DELANTEROS RECICLAJE DE ASFALTO				
DRAWN: DATE:	HVM 01/04/17	SIZE B	DWG. NO. UABCE-E19	REV A
ENG: DATE:	TPB 05/05/17	DON'T SCALE DWG		SHEET 3 OF 3



THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE
SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY.
ANY REPRODUCTION IN ANY MANNER WITHOUT THE WRITTEN
PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



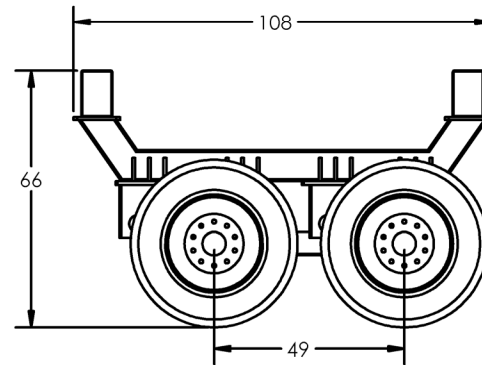
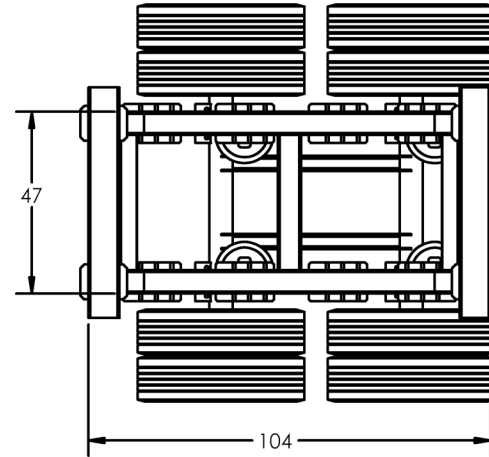
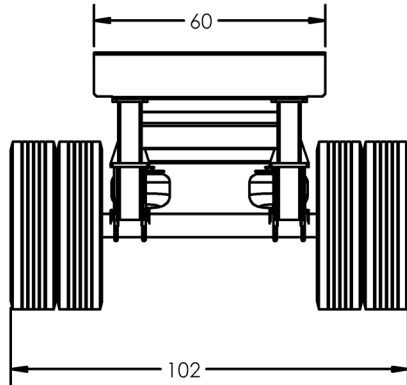
FRACTION	±.03	UNIT: INCH
.XX	±.01	ANGLE
.XXX	±.005	.X ±.5 DEG
.XXXX	±.0005	.XX ±.1 DEG

Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

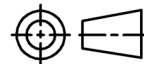
MATERIAL	FINISH
----------	--------

TITLE:	
ESTRUCTURA DE EJES TRASEROS	
RECICLAJE DE ASFALTO	

DRAWN:	HVM	SIZE	DWG. NO.	REV
DATE:	01/04/17	B	UABCE-E12	A
ENG:	TPB	DON'T SCALE DWG		SHEET 1 OF 3
DATE:	05/05/17			



THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



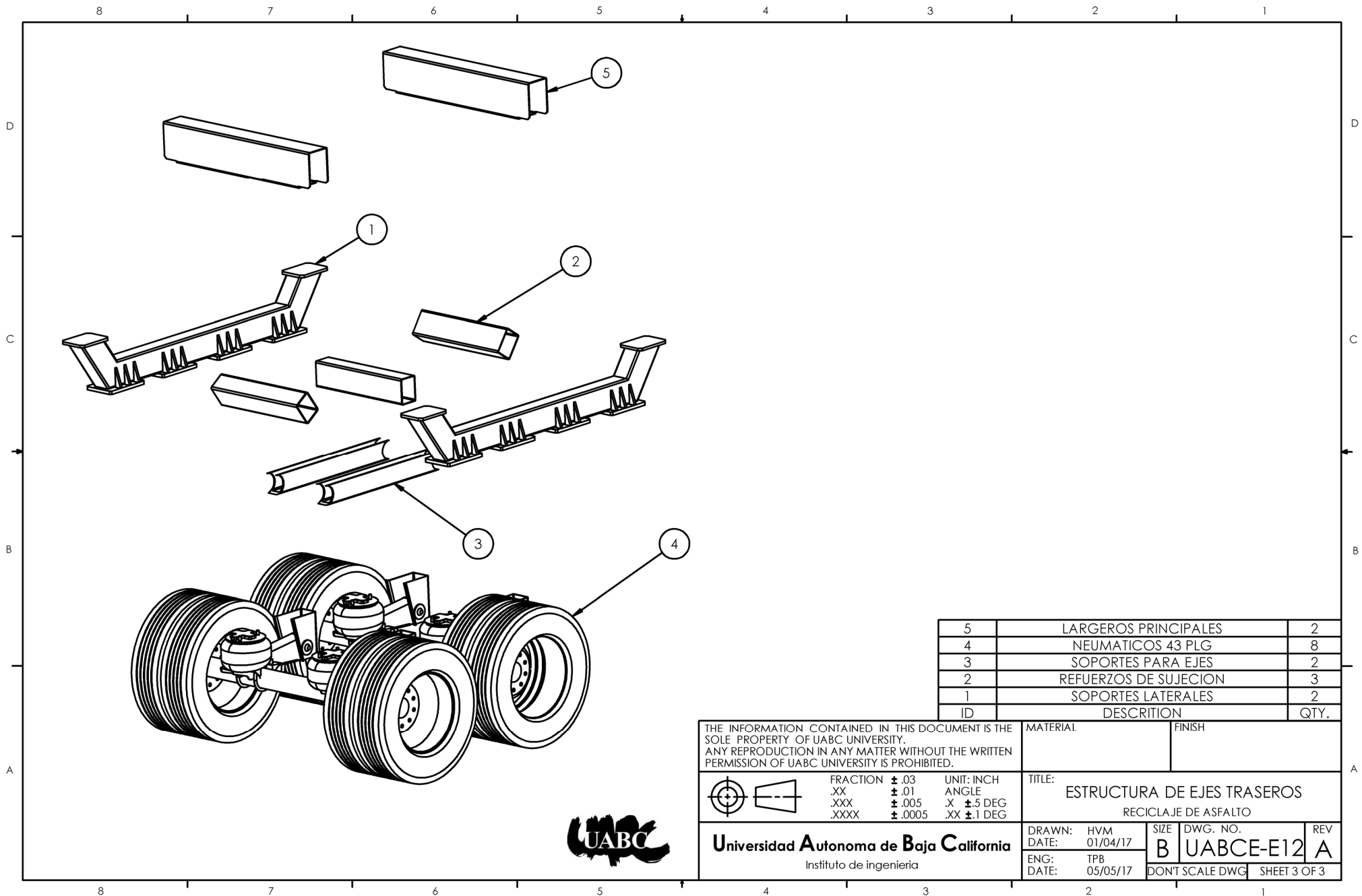
FRACTION	±	UNIT: INCH
.XX	±.01	ANGLE
.XXX	±.005	.X ±.5 DEG
.XXXX	±.0005	.XX ±.1 DEG

Universidad Autónoma de Baja California
Instituto de ingeniería

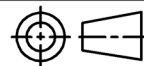
MATERIAL	FINISH

TITLE: ESTRUCTURA DE EJES TRASEROS RECICLAJE DE ASFALTO			
DRAWN: HVM	DATE: 01/04/17	SIZE: B	DWG. NO. UABCE-E12
ENG: TPB	DATE: 05/05/17	DON'T SCALE DWG	REV: A

SHEET 2 OF 3	



THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



FRACTION	± .03	UNIT: INCH
.XX	± .01	ANGLE
.XXX	± .005	.X ±.5 DEG
.XXXX	± .0005	.XX ±.1 DEG

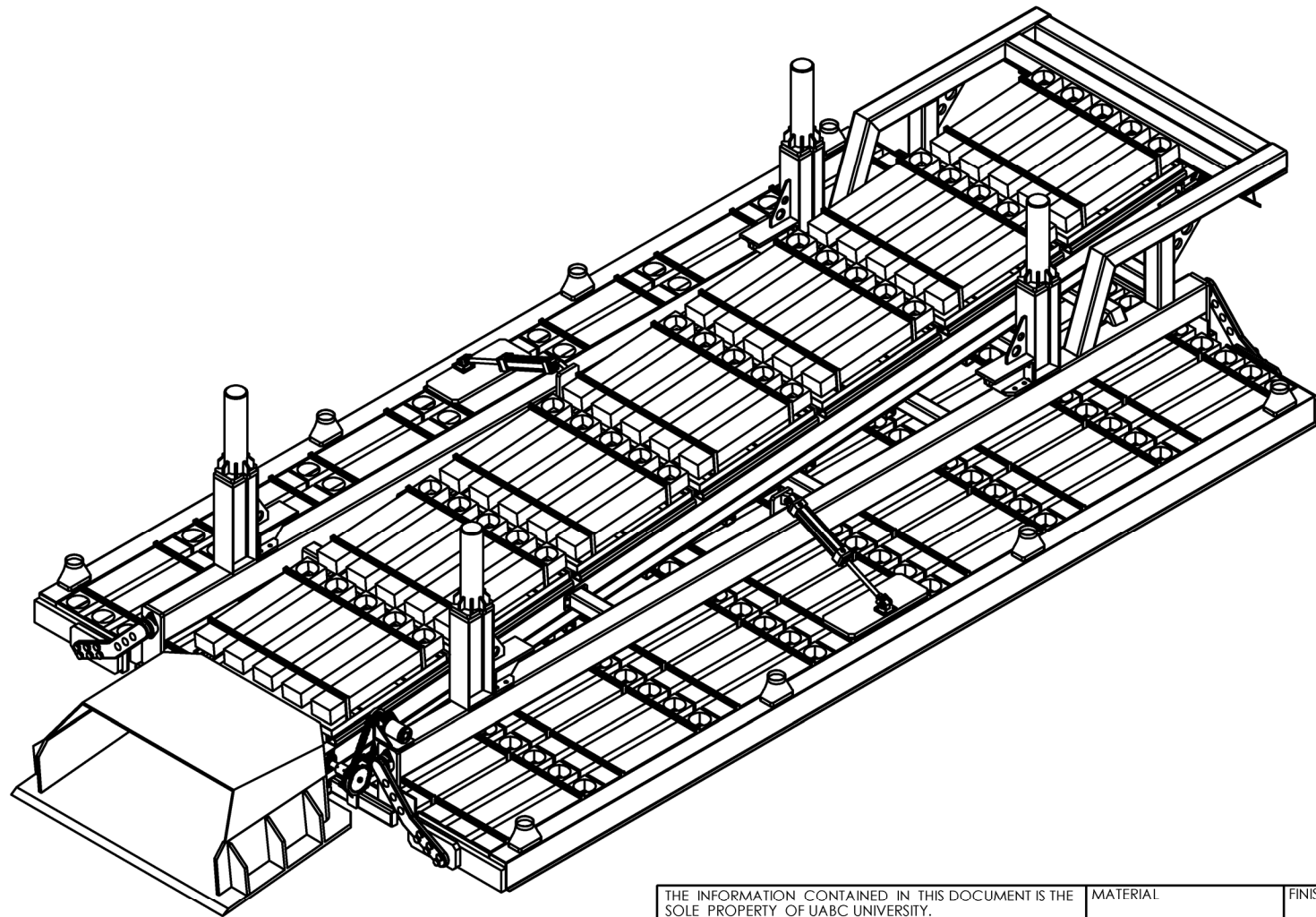
Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

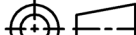
5	LARGEROS PRINCIPALES	2
4	NEUMATICOS 43 PLG	8
3	SOPORTES PARA EJES	2
2	REFUERZOS DE SUJECION	3
1	SOPORTES LATERALES	2
ID	DESCRIPCION	QTY.

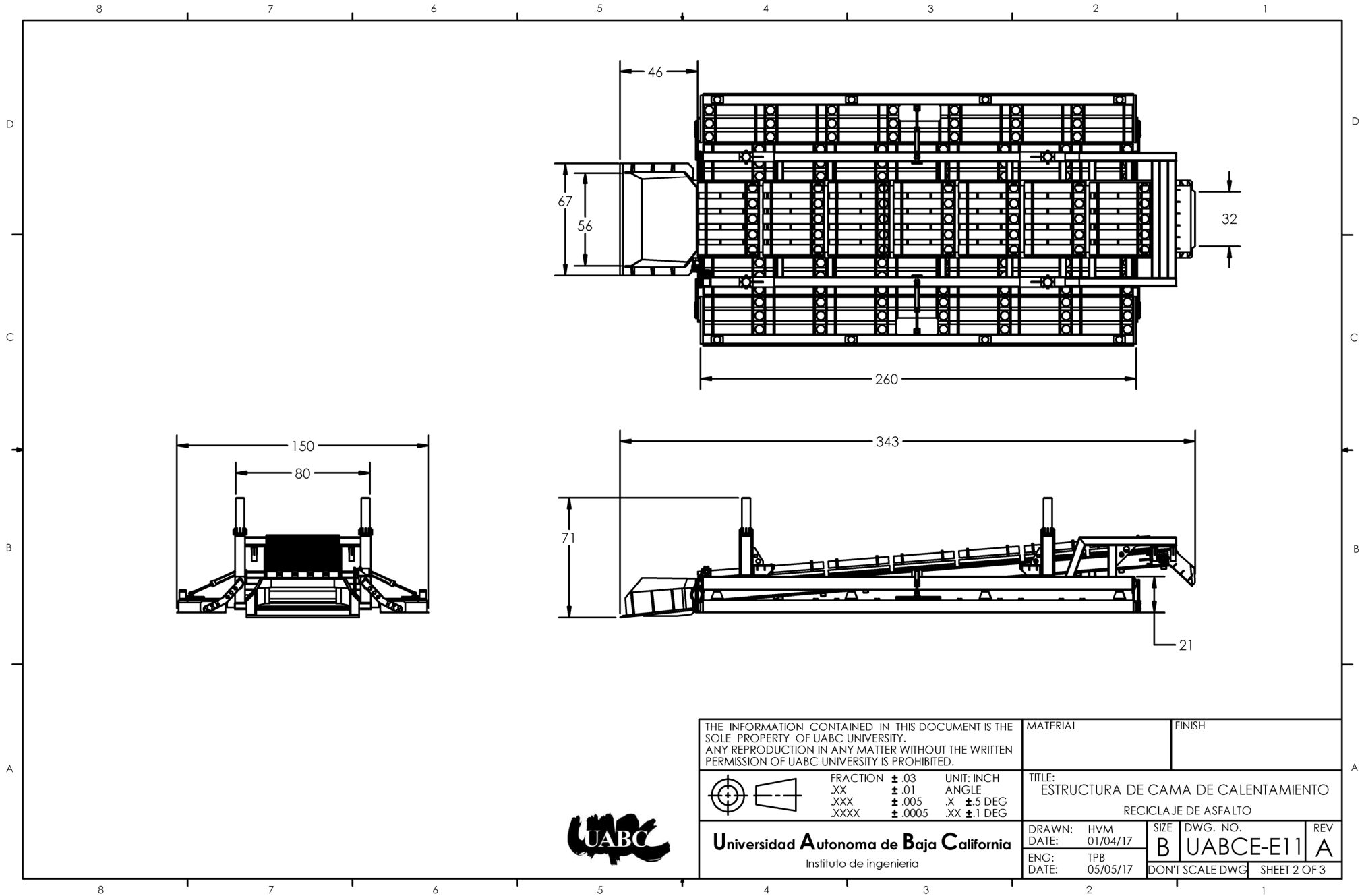
MATERIAL	FINISH
----------	--------

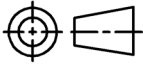
TITLE: **ESTRUCTURA DE EJES TRASEROS**
RECICLAJE DE ASFALTO

DRAWN: HVM	SIZE	DWG. NO.	REV
DATE: 01/04/17	B	UABCE-E12	A
ENG: TPB	DON'T SCALE DWG	SHEET 3 OF 3	
DATE: 05/05/17			

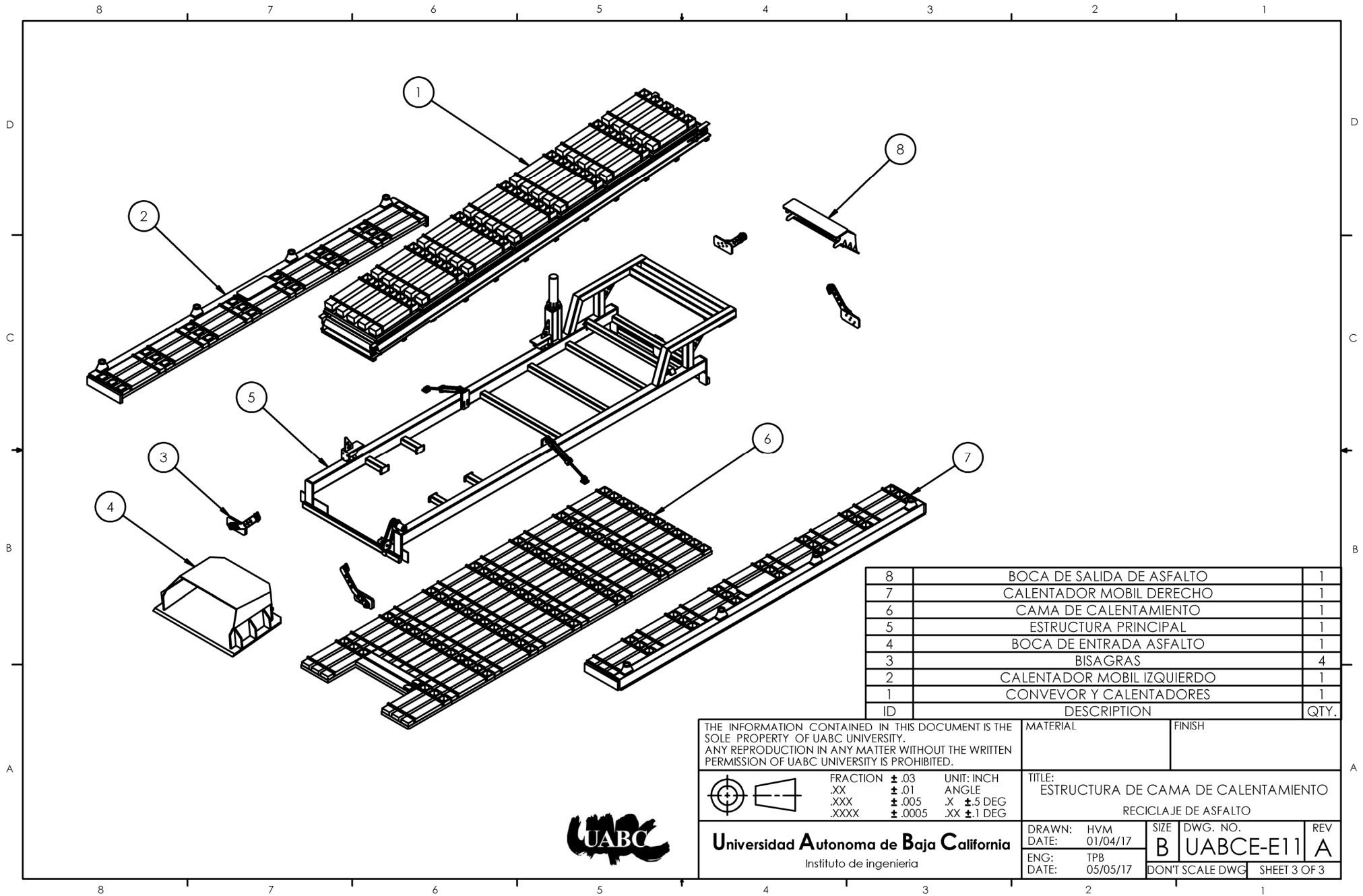


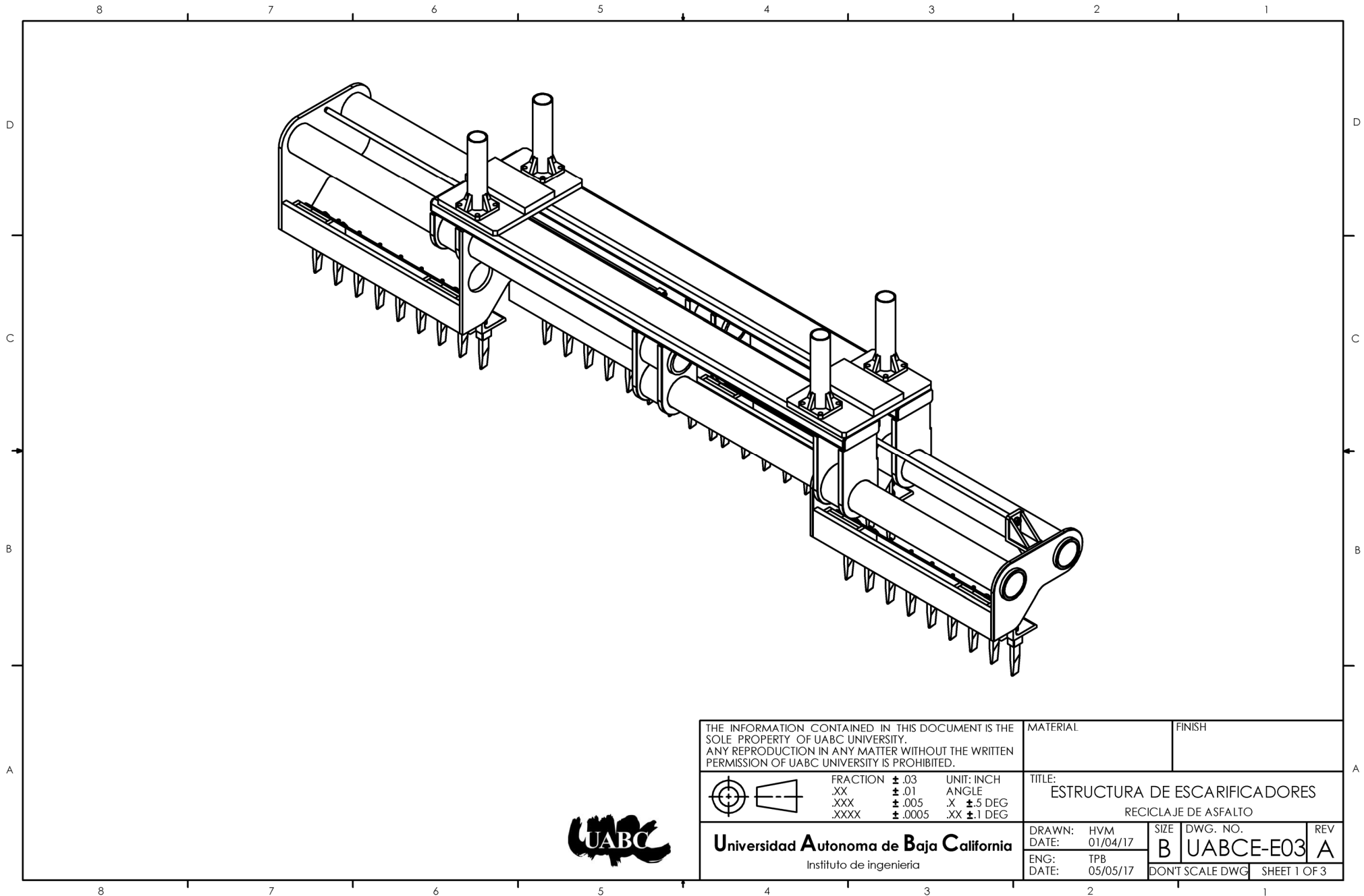
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.			MATERIAL		FINISH		
			FRACTION $\pm .03$ $\pm .01$ $\pm .005$ $\pm .0005$		UNIT: INCH ANGLE .X $\pm .5$ DEG .XX $\pm .1$ DEG		
Universidad Autonoma de Baja California Instituto de ingenieria			TITLE: ESTRUCTURA DE CAMA DE CALENTAMIENTO RECICLAJE DE ASFALTO				
			DRAWN: HVM		SIZE	DWG. NO.	REV
			DATE: 01/04/17		B	UABCE-E11	A
			ENG: TPB		DON'T SCALE DWG SHEET 1 OF 3		
DATE: 05/05/17							

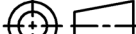


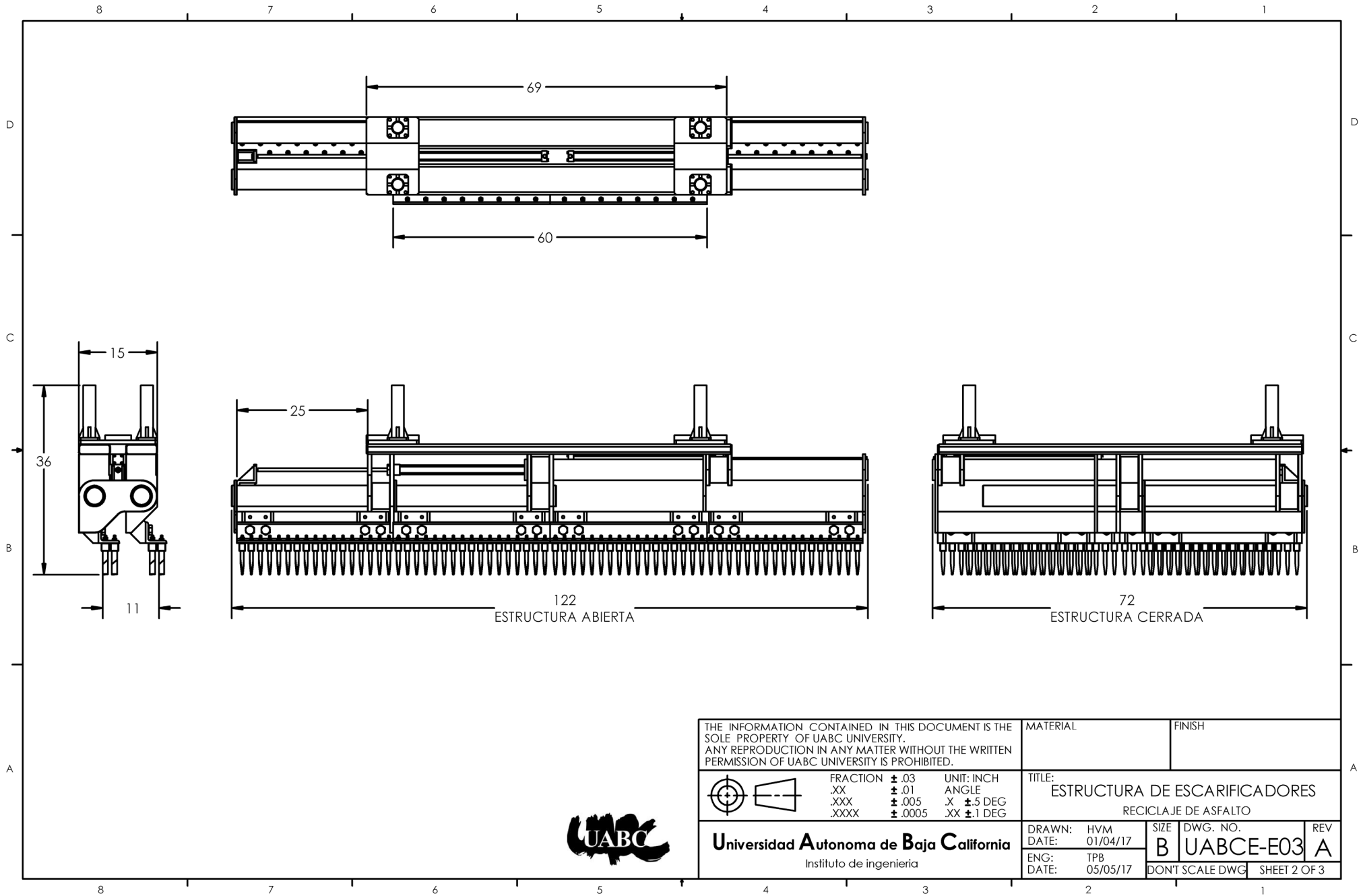
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.			MATERIAL		FINISH		
			FRACTION ± .03 .XX ± .01 .XXX ± .005 .XXXX ± .0005		UNIT: INCH ANGLE .X ± .5 DEG .XX ± .1 DEG		
Universidad Autónoma de Baja California Instituto de ingeniería			TITLE: ESTRUCTURA DE CAMA DE CALENTAMIENTO RECICLAJE DE ASFALTO				
			DRAWN: HVM DATE: 01/04/17		SIZE DWG. NO. B UABCE-E11		REV A
			ENG: TPB DATE: 05/05/17		DONT SCALE DWG		SHEET 2 OF 3

Universidad Autonoma de Baja California
 Instituto de ingenieria

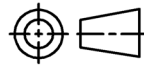




THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.			MATERIAL		FINISH			
			FRACTION ± .03 UNIT: INCH .XX ± .01 ANGLE .XXX ± .005 .X ±.5 DEG .XXXX ± .0005 .XX ±.1 DEG			TITLE: ESTRUCTURA DE ESCARIFICADORES RECICLAJE DE ASFALTO		
Universidad Autonoma de Baja California Instituto de ingenieria			DRAWN: HVM DATE: 01/04/17		SIZE B	DWG. NO. UABCE-E03	REV A	
			ENG: TPB DATE: 05/05/17		DON'T SCALE DWG		SHEET 1 OF 3	



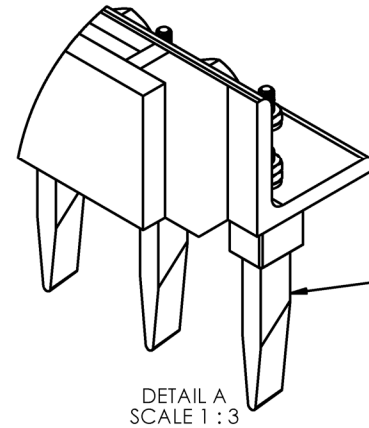
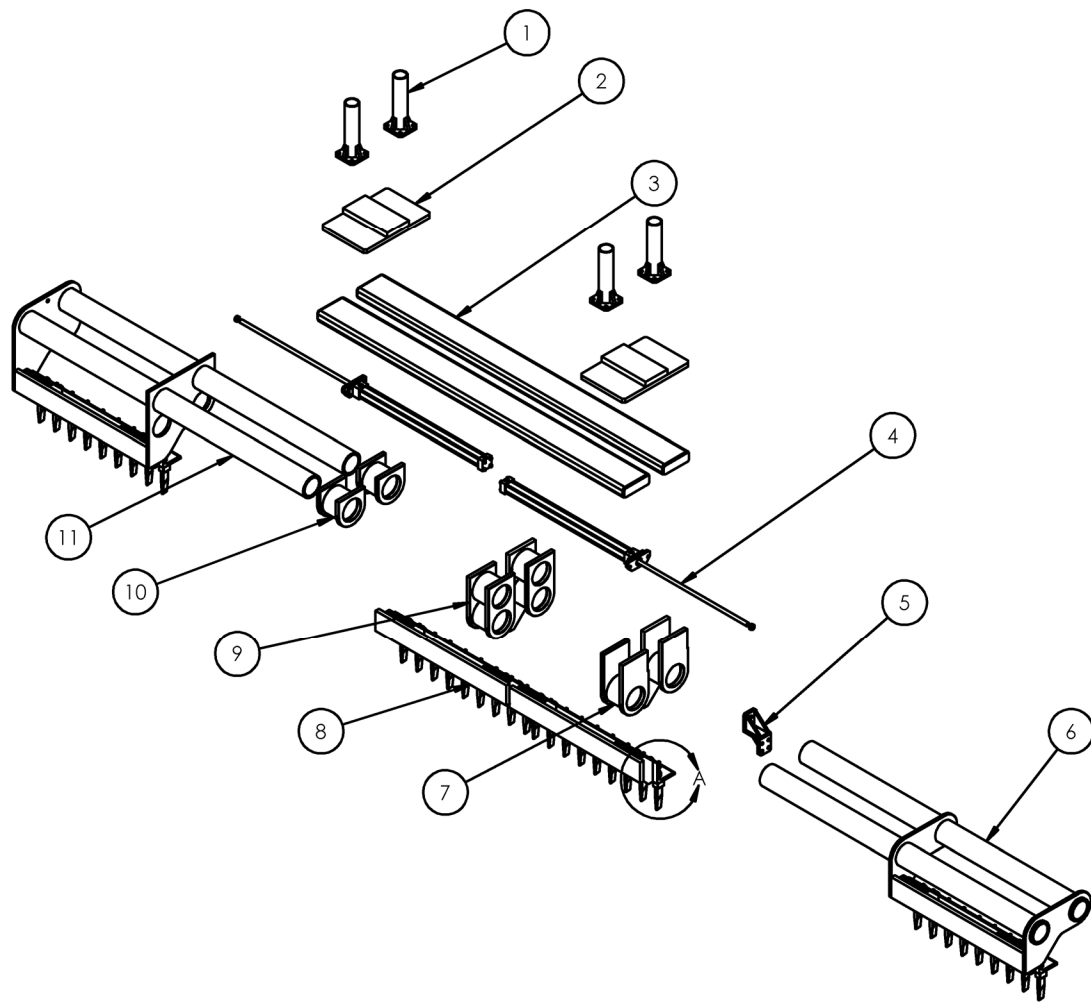
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MANNER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



FRACTION	± .03	UNIT: INCH
.XX	± .01	ANGLE
.XXX	± .005	.X ±.5 DEG
.XXXX	± .0005	.XX ±.1 DEG

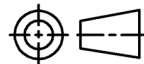
Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

MATERIAL		FINISH	
TITLE: ESTRUCTURA DE ESCARIFICADORES RECICLAJE DE ASFALTO			
DRAWN: DATE:	HVM 01/04/17	SIZE B	DWG. NO. UABCE-E03
ENG: DATE:	TPB 05/05/17	REV A	
		DON'T SCALE DWG	SHEET 2 OF 3



12	ESCARIFICADOR	54
11	QUIJADA MOBIL DERECHA	1
10	SOPORTES DE APOYO CORTOS	2
9	SOPORTES DE APOYO DOBLE	2
8	RASTRILLO DE ESCARIFICADORES	4
7	SOPORTES DE APOYO LARGOS	2
6	QUIJADA MOBIL IZQUIERDA	1
5	SUJESION DE PISTONES	2
4	PISTONES PARA DISTANCIA	2
3	TRAVESAÑOS ESTRUCTURALES	2
2	BASES DE SOPORTES	2
1	SOPORTES DE ESTRUCTURA	4
ID	DESCRIPTION	QTY.

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



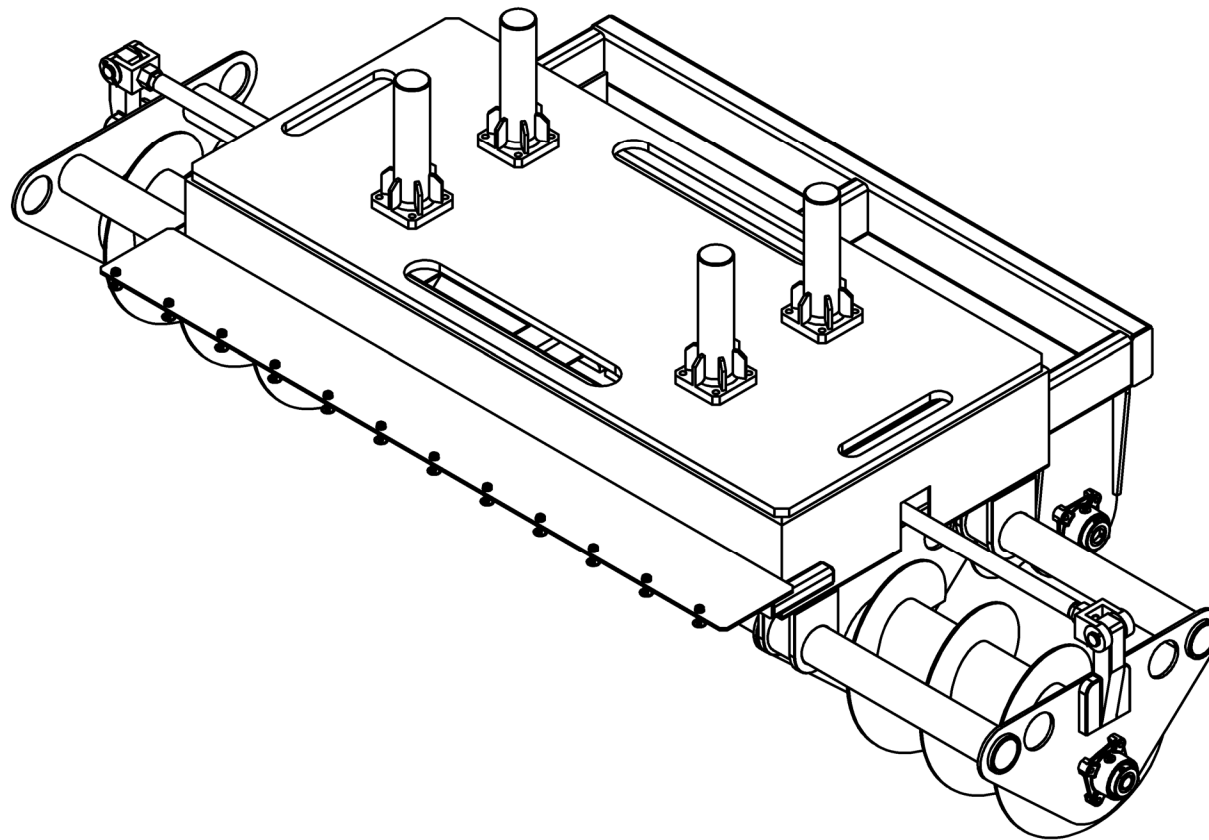
FRACTION $\pm .03$ UNIT: INCH
XX $\pm .01$ ANGLE
XXX $\pm .005$.X $\pm .5$ DEG
XXXX $\pm .0005$.XX $\pm .1$ DEG

Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

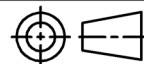
MATERIAL FINISH

TITLE:
ESTRUCTURA DE ESCARIFICADORES
RECICLAJE DE ASFALTO

DRAWN: HVM
DATE: 01/04/17
ENG: TPB
DATE: 05/05/17
SIZE B
DWG. NO. UABCE-E03
REV A
DON'T SCALE DWG SHEET 3 OF 3



THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE
SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY.
ANY REPRODUCTION IN ANY MANNER WITHOUT THE WRITTEN
PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



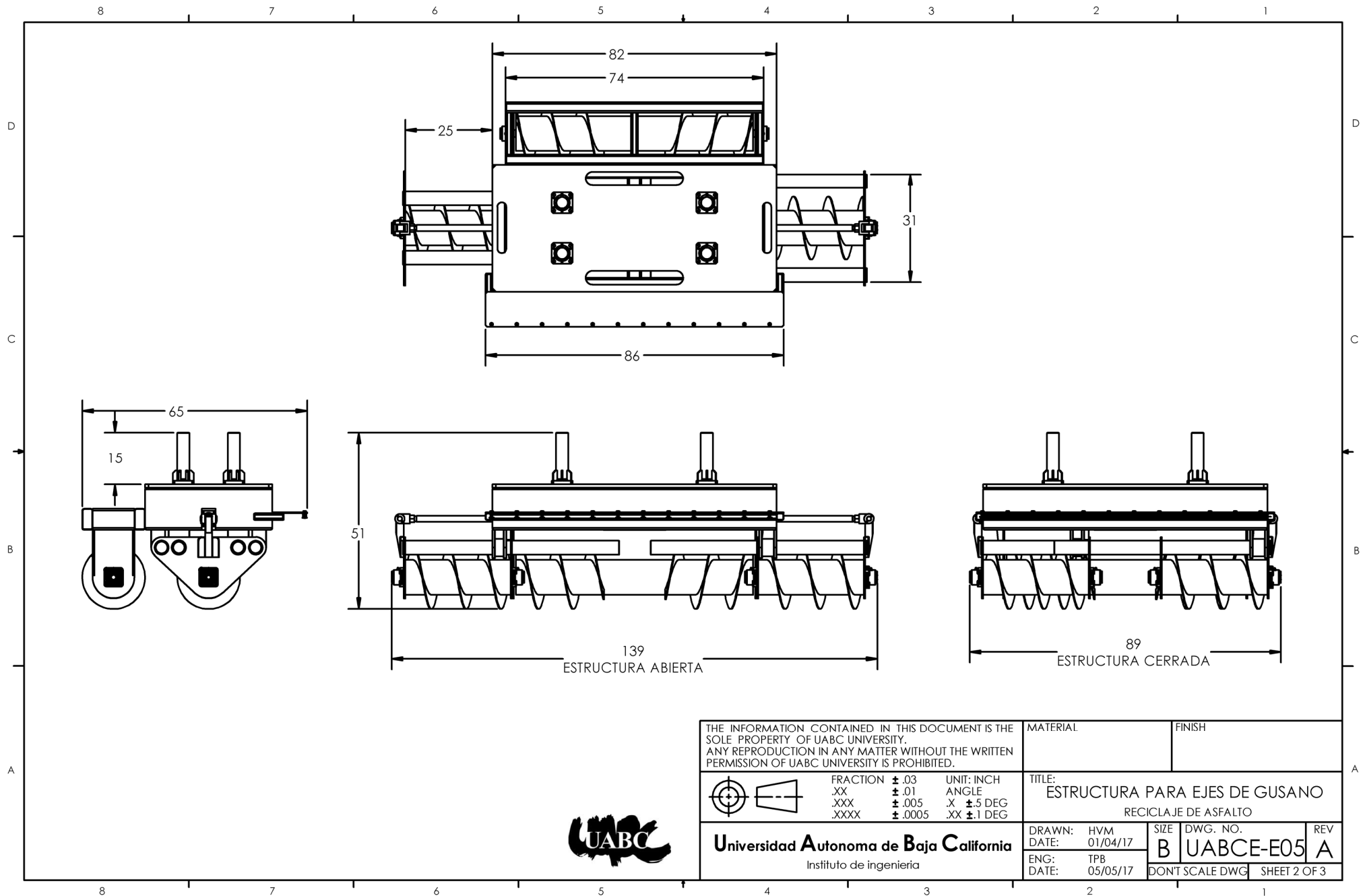
FRACTION	±	UNIT: INCH
.XX	± .01	ANGLE
.XXX	± .005	.X ±.5 DEG
.XXXX	± .0005	.XX ±.1 DEG

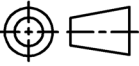
Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

MATERIAL	FINISH

TITLE:			
ESTRUCTURA PARA EJES DE GUSANO			
RECICLAJE DE ASFALTO			

DRAWN:	HVM	SIZE	DWG. NO.	REV
DATE:	01/04/17	B	UABCE-E05	A
ENG:	TPB	DON'T SCALE DWG		SHEET 1 OF 3
DATE:	05/05/17			



THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY. ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.			MATERIAL		FINISH		
			FRACTION $\pm .03$.XX $\pm .01$.XXX $\pm .005$.XXXX $\pm .0005$		UNIT: INCH ANGLE .X $\pm .5$ DEG .XX $\pm .1$ DEG		
			TITLE: ESTRUCTURA PARA EJES DE GUSANO RECICLAJE DE ASFALTO				
Universidad Autonoma de Baja California Instituto de ingenieria			DRAWN: HVM DATE: 01/04/17		SIZE B	DWG. NO. UABCE-E05	REV A
			ENG: TPB DATE: 05/05/17		DON'T SCALE DWG		SHEET 2 OF 3

Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

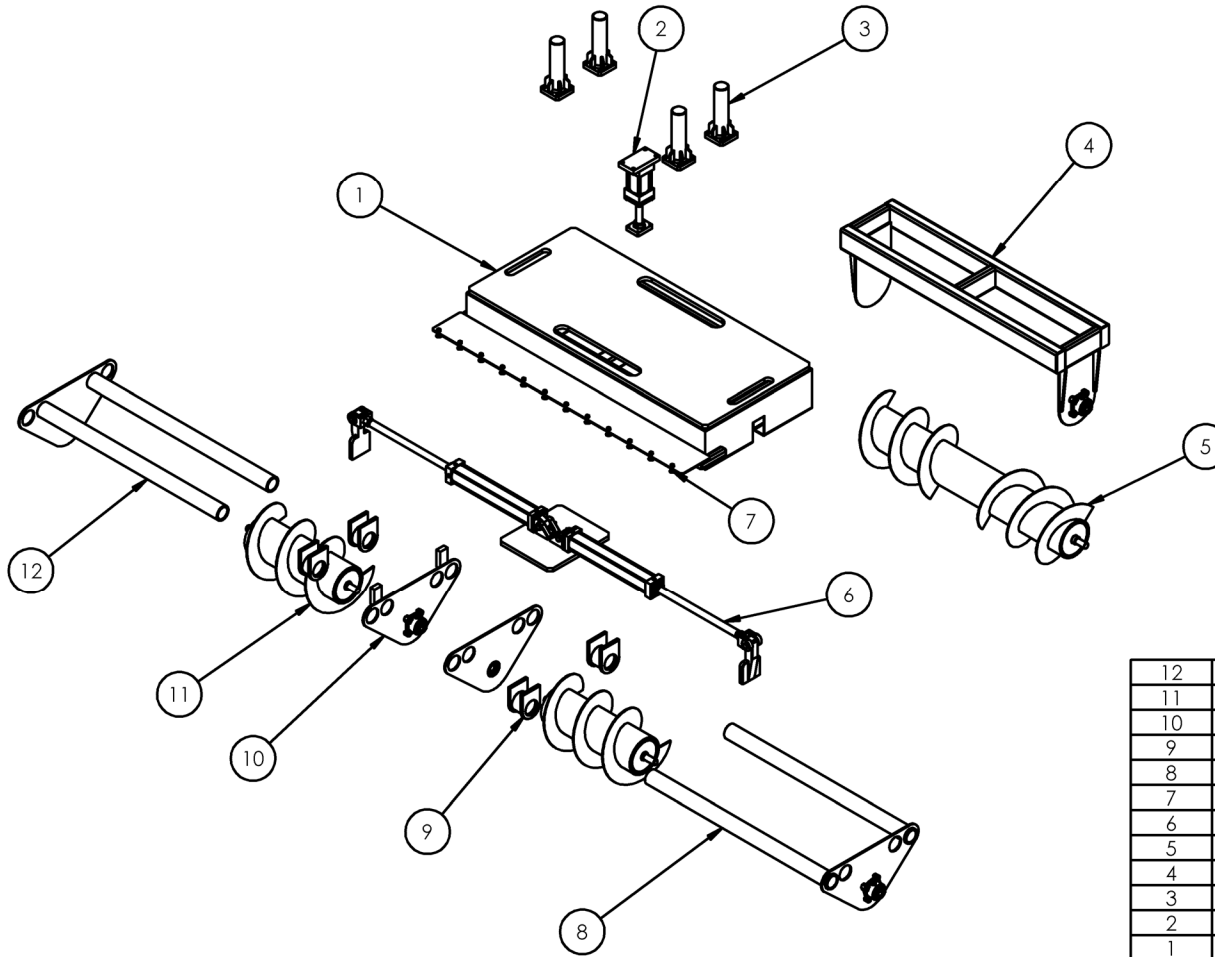
8 7 6 5 4 3 2 1

D

C

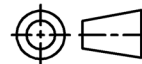
B

A



12	QUIJADA MOBIL	1
11	GUSANOS CORTOS	2
10	SOPORTES LARGOS	2
9	SOPORTES	4
8	QUIJADA MOBIL IZQUIERDA	2
7	ASPERSORES DE EMULSION	12
6	PISTONES PARA AUMENTAR DISTANCIA	2
5	EJE DE GUSANO PRINCIPAL	1
4	ESTRUCTURA DE GUSANO PRINCIPAL	1
3	SOPORTES DE ESTRUCTURA	1
2	PISTON HIDRAULICO	1
1	CAJA DE ESTRUCTURA PRINCIPAL	1
ID	DESCRIPTION	QTY.

THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DOCUMENT IS THE
SOLE PROPERTY OF UABC UNIVERSITY.
ANY REPRODUCTION IN ANY MATTER WITHOUT THE WRITTEN
PERMISSION OF UABC UNIVERSITY IS PROHIBITED.



FRACTION	±.03	UNIT: INCH
.XX	±.01	ANGLE
.XXX	±.005	.X ±.5 DEG
.XXXX	±.0005	.XX ±.1 DEG

MATERIAL	FINISH
----------	--------

TITLE: ESTRUCTURA PARA EJES DE GUSANO RECICLAJE DE ASFALTO	
--	--

Universidad Autonoma de Baja California
Instituto de ingenieria

DRAWN: HVM	SIZE	DWG. NO.	REV
DATE: 01/04/17	B	UABCE-E05	A
ENG: TPB	DON'T SCALE DWG	SHEET 3 OF 3	
DATE: 05/05/17			

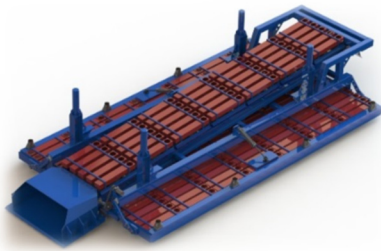


8 7 6 5 4 3 2 1

ANEXO 11 (Memoria de cálculo)

Calculo para la selección de pistones hidráulicos para levantar la estructura de la cama de calentamiento:

Datos para selección



- Peso de la estructura total: 6.5ton
- Presión hidráulica de operación: 800 PSI
- Peso total entre 4 pistones: 1.63ton (3,594lbf)
- Factor seguridad: 1.5

Para el cálculo del diámetro de embolo se considera la presión mínima de operación del sistema a 800 psi y la fuerza de 3594 lbf que el pistón debe levantar, por lo tanto:

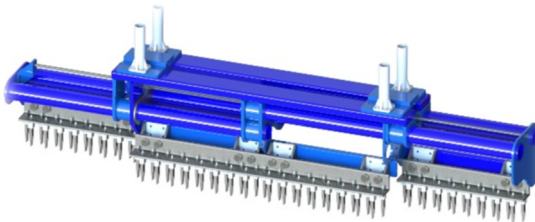
$$A = F/P; (3594 \text{ lbf}) / (800 \text{ psi}) = 4.49 \text{ plg}^2$$

$$A = .785 \cdot D^2, \text{ se debe despejar la } D \text{ diámetro embolo; } D = \sqrt{(4.49/.785)} = 2.39''$$

$$\text{Diámetro final} = f.s. \cdot D = 1.5 \cdot 2.39 = 3.58''; \text{ El valor comercial próximo superior a } 3.58'' \text{ es } 4''$$

Calculo para la selección de pistones hidráulicos para levantar la estructura de los escarificadores.

Datos para selección



- Peso de la estructura total: 551kg
- Presión hidráulica: 800
- Peso total entre 2 pistones: 276kg (609lbf)
- Factor seguridad: 1.5

Para el cálculo del diámetro de embolo se considera la presión mínima de operación del sistema a 800 psi y la fuerza de 609 lbf que el pistón debe levantar, por lo tanto:

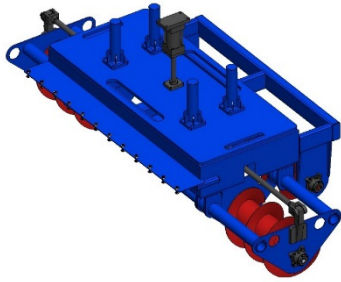
$$A = (609 \text{ lbf}) / (800 \text{ psi}) = .761 \text{ plg}^2$$

$$A = .785 \cdot D^2, \text{ se debe despejar la } D = \text{diámetro embolo; } D = \sqrt{(.761/.785)} = .99''$$

$$\text{Diámetro final} = f.s. \cdot D = 1.5 \cdot .99 = 1.47''; \text{ El valor comercial próximo es } 2''$$

Calculo para la selección de pistones hidráulicos para levantar la estructura de los gusanos.

Datos para selección



- Peso de la estructura total: 1,560kg
- Presión hidráulica de operación: 800 psi
- Peso a accionar por un pistón: 1560kg(3,439lbf)
- Factor seguridad: 1.5

Para el cálculo del diámetro de embolo se considera la presión mínima de operación del sistema a 800 psi y la fuerza de 609 lbf que el pistón debe levantar, por lo tanto:

$$A = (3439 \text{ lbf}) / (800 \text{ psi}) = 4.29 \text{ plg}^2$$

$$A = .785 \cdot D^2 \text{ se debe despejar la } D = \text{diámetro embolo}; D = \sqrt{(4.29 / .785)} = 2.33''$$

Diámetro final= f.s.*D = 1.5 * 2.33 = 3.51'' El valor comercial próximo superior a 3.51'' es 4''

MANUFACTURA DE VIGA UABC001

Las dos vigas utilizadas en la estructura principal se denominan largueros longitudinales, los cuales son personalizados de acuerdo a la necesidad del diseño.

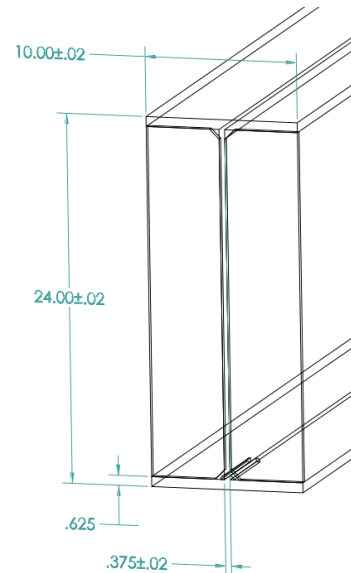
Los siguientes datos son necesarios para la fabricación de la viga:

Dimensiones patín: 10'' x 5/8''

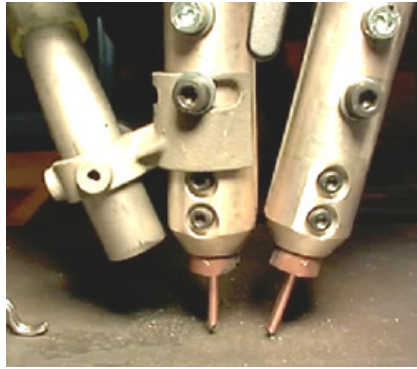
Espesor del alma: 3/8''

Peralte: 24''

El proceso es denominado en la industria de acero estructural **“proceso de tres placas”**.



El proceso de soldadura puede variar, sin embargo, el más utilizado en este proceso de tres placas es la soldadura de arco sumergido (SAW) en la modalidad de electrodo doble como se muestra a continuación:



Proceso secuencial para obtener nuestra viga personalizada:

Entrada de placas acero A36 en área de corte (máquinas de corte plasma u oxicorte son utilizadas para realizar el trabajo de corte de patines y alma)

El material cortado (patines y alma) pasan a la máquina de sub ensamble llamada tack station. Básicamente se realiza un pre-ensamble con ligeros puntos de soldadura MIG.

Posterior la viga pre-ensamblada se dirige a la máquina de ensamble y soldadura SAW para finalmente ser llevado al proceso de limpieza.

La viga ya soldada por ambos lados, pasa por el proceso de shot-blast conocido mejor como sand-blast para eliminar oxidaciones y así tener la preparación para el proceso de pintura.

Análisis estructural de las vigas principales.

Una vez definido las medidas de las vigas principales, realizamos las estimaciones de los pesos de todas las estructuras para estimar todas las fuerzas implicadas, en la figura A, podemos ver todos los equipos que fueron considerados para el análisis. En la figura B podemos ver la vista lateral de todos los equipos, algunos equipos estaban directamente en los soportes de los ejes, como el tanque hidráulico y el tanque de la emulsión, estos no fueron considerados en el análisis. Y la estructura de los gusanos fueros dispersan hacia el motor, para simplificar el análisis.

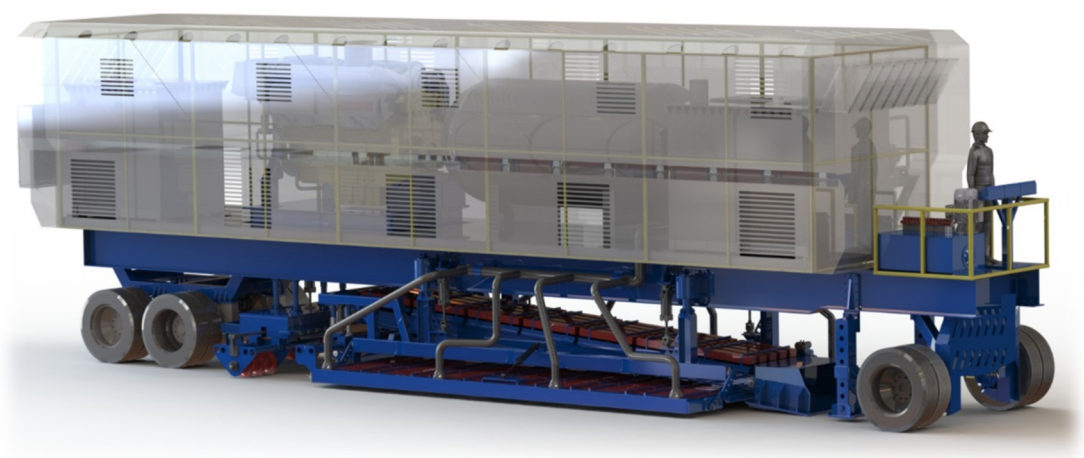


Figura A Estructura general de la máquina



Figura B Vista lateral de toda la estructura sin la cobertura

Calculo estático para una viga de la estructura principal.

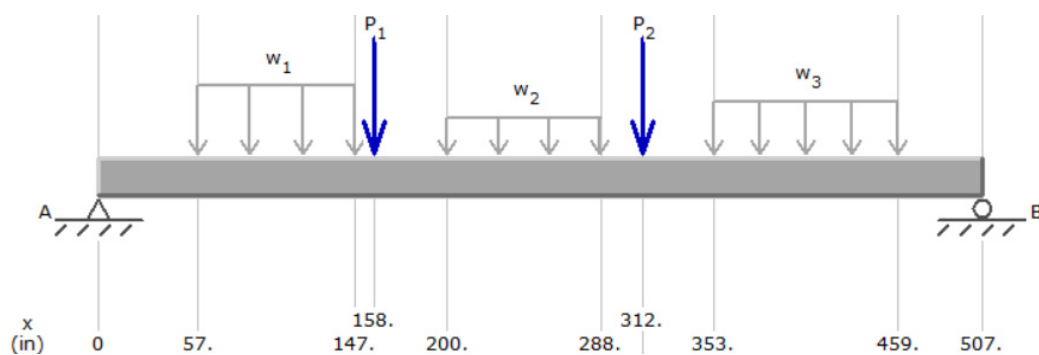


Figura C Diagrama de distribución de las cargas

Para poder convertir a un solo vector las 3 fuerzas distribuidas uniformemente, se utilizó NDSolid® para después poder realizar la suma de fuerzas en “Y”

Start by finding the equivalent loads caused by the distributed loads (DLs). Remember that the equivalent load of a DL has a magnitude equal to its area, acting through the area's centroid.

W1

Equivalent load(s) of the DL from $x=57\text{in}$ to $x=147\text{in}$:

Rectangular Load Magnitude: $(147\text{in}-57\text{in}) \times (-49.22\text{lb/in}) = -4,429.8 \text{ lb}$

Rectangular Load Position: $57\text{in} + (147\text{in}-57\text{in}/2) = +102\text{in}$

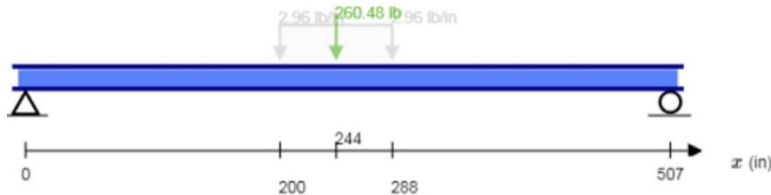


W2

Equivalent load(s) of the DL from $x=200\text{in}$ to $x=288\text{in}$:

Rectangular Load Magnitude: $(288\text{in}-200\text{in}) \times (-2.96\text{lb/in}) = -260.48 \text{ lb}$

Rectangular Load Position: $200\text{in} + (288\text{in}-200\text{in}/2) = +244\text{in}$

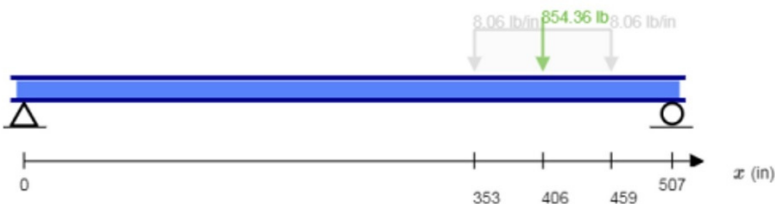


W3

Equivalent load(s) of the DL from $x=353\text{in}$ to $x=459\text{in}$:

Rectangular Load Magnitude: $(459\text{in}-353\text{in}) \times (-8.06\text{lb/in}) = -854.36 \text{ lb}$

Rectangular Load Position: $353\text{in} + (459\text{in}-353\text{in}/2) = +406\text{in}$



En la figura C podemos ver la distribución de las cargas y esta corresponden como sigue:

Valores de las fuerzas implicadas en el diagrama de distribución de las cargas de la figura C

W1: Colector de humos = **4,430 lbs/90"** = **49.22 lb-in**↓

P1: Fuerza pistón hidráulico actuando estructura cama calentadores = **1617lbs**↓ = P2

W2: Tanque Gas propano = **261 lbs/88"** = **2.96 lb-in**↓

W3: Motor diesel Cummins = **855 lbs/106"** = **8.06 lb-in**↓

RA: Reacción en soporte A↑

RB: Reacción en soporte B↑

Calculo de las reacciones en los soportes A y B que corresponden a los ejes delanteros y traseros de la máquina.

Ecuación de equilibrio conocer valor de Reacciones en soportes A y B

Suma de fuerzas verticales (Y)

$$A_y + B_y = (49.22 \text{ lb/in} \times 90.00 \text{ in} + 2.90 \text{ lb/in} \times 88.00 \text{ in} + 8.06 \text{ lb/in} \times 106.00 \text{ in} + 1,617.00 \text{ lb} + 1,617.00 \text{ lb})$$

$$A_y = (49.22 \text{ lb/in} \times 90.00 \text{ in} + 2.90 \text{ lb/in} \times 88.00 \text{ in} + 8.06 \text{ lb/in} \times 106.00 \text{ in} + 1,617.00 \text{ lb} + 1,617.00 \text{ lb}) - 3191.18 =$$

$$A_y = \mathbf{5,576.18 \text{ lb}} \uparrow \text{ (Reacción A en el eje delantero de la maquina)}$$

Suma de momentos en el soporte A

$$(507.00 \text{ in}) B_y = 49.22 \text{ lb/in} \times 90.00 \text{ in} \times 102.00 \text{ in} + 2.90 \text{ lb/in} \times 88.00 \text{ in} \times 244.00 \text{ in} + 8.06 \text{ lb/in} \times 106.00 \text{ in} \times 406.00 \text{ in} + 1,617.00 \text{ lb} \times 158.00 \text{ in} + 1,617.00 \text{ lb} \times 312.00 \text{ in}$$

$$B_y = (49.22 \text{ lb/in} \times 90.00 \text{ in} \times 102.00 \text{ in} + 2.90 \text{ lb/in} \times 88.00 \text{ in} \times 244.00 \text{ in} + 8.06 \text{ lb/in} \times 106.00 \text{ in} \times 406.00 \text{ in} + 1,617.00 \text{ lb} \times 158.00 \text{ in} + 1,617.00 \text{ lb} \times 312.00 \text{ in}) / 507.00 \text{ in}$$

$$B_y = \mathbf{3,197.18 \text{ lb}} \uparrow \text{ (Reacción B en el eje trasero de la maquina)}$$

Calculo de vectores cortantes para realizar el diagrama de cortantes. Utilizando NDSolid®

$$V1 = A_y - P0 = 5576.18 \uparrow - 4429.8 \downarrow = \mathbf{1,146.38 \text{ Lb} \uparrow}$$

Dónde: $V1$ = Cortante de $W1$; A_y = Reacción en apoyo A

$$P0 = \text{Conversión de } W1 \text{ a Fuerza puntual} \downarrow = (49.22 \text{ lb/in}) * (147 \text{ in} - 57 \text{ in}) = -4,429.8 \text{ Lb} \downarrow$$

The total magnitude of the distributed load in this region is 49.22 lb/in, acting **DOWNWARD**. The area under the load diagram between $x = 57.00$ in and $x = 147.00$ in is -4,429.80 lb (i.e., $-49.22 \text{ lb/in} \times 90.00 \text{ in}$). The change in shear between $x = 57.00$ in and $x = 147.00$ in is equal to the area under the load diagram between these two points. At $x = 57.00$ in, the shear force is 5,576.18 lb. Adding -4,429.80 lb to this value gives a shear force of $V = 1,146.38$ lb at $x = 147.00$ in. The slope of the shear curve is equal to the magnitude of the distributed load w (i.e., $w = -49.22 \text{ lb/in}$). Since its slope is constant, the shear curve is **linear** in this region.

$$V2 = P1 - V1 = -1617 \text{ Lb} \downarrow + 1146.38 \text{ Lb} \uparrow = \mathbf{-470.62 \text{ Lb} \downarrow}$$

Dónde: $V2$ = Cortante en $P1$; $V1$ = Cortante de $W1$

$$P1 = \text{Fuerza de pistón hidráulico} = 1617 \text{ Lb} \downarrow$$

At $x = 158.00$ in, a concentrated load of 1,617.00 lb acts **downward** on the beam. Concentrated forces create discontinuities in the shear diagram. The load of 1,617.00 lb causes the shear diagram to jump **DOWN** by 1,617.00 lb at $x = 158.00$ in. Just slightly to the left of $x = 158.00$ in, the shear force is 1,146.38 lb. Adding -1,617.00 lb to this value gives a shear force of -470.62 lb just slightly to the right of $x = 158.00$ in.

$$V3 = V2 + P3 = -470.62 \text{ Lb} \downarrow - 255.20 \text{ Lb} \downarrow = \mathbf{-725.82 \text{ Lb} \downarrow}$$

Dónde: $V3$ = Cortante en $W3$; $V2$ = Cortante en $P1$

$$P3 = \text{Conversión de } W2 \text{ a Fuerza puntual} \downarrow = (-2.9 \text{ Lb/in}) * (288 \text{ in} - 200 \text{ in}) = -255.20 \text{ Lb} \downarrow$$

The total magnitude of the distributed load in this region is 2.90 lb/in, acting **DOWNWARD**. The area under the load diagram between $x = 200.00$ in and $x = 288.00$ in is -255.20 lb (i.e., $-2.90 \text{ lb/in} \times 88.00 \text{ in}$). The change in shear between $x = 200.00$ in and $x = 288.00$ in is equal to the area under the load diagram between these two points. At $x = 200.00$ in, the shear force is -470.62 lb. Adding -255.20 lb to this value gives a shear force of $V = -725.82$ lb at $x = 288.00$ in. The slope of the shear curve is equal to the magnitude of the distributed load w (i.e., $w = -2.90 \text{ lb/in}$). Since its slope is constant, the shear curve is **linear** in this region.

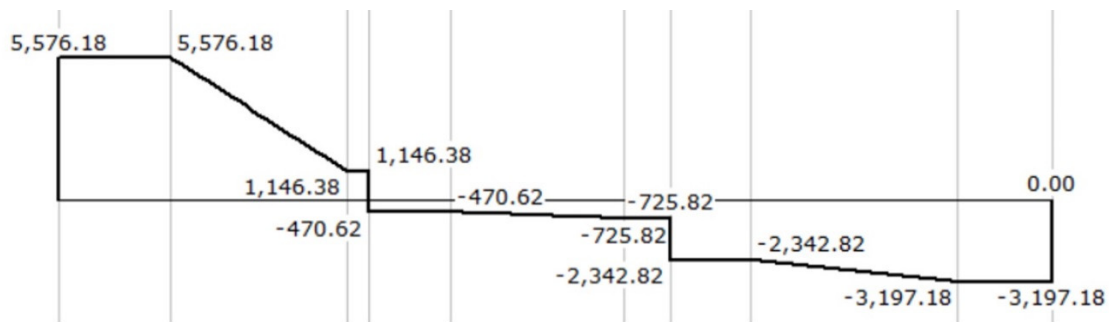
$$V_4 = V_3 + P_2 = -725.82 \text{ Lb} \downarrow - 1617 \text{ Lb} = \mathbf{-2342.82 \text{ Lb} \downarrow}$$

Dónde: V_4 = Cortante en P2; V_3 = Cortante en W3

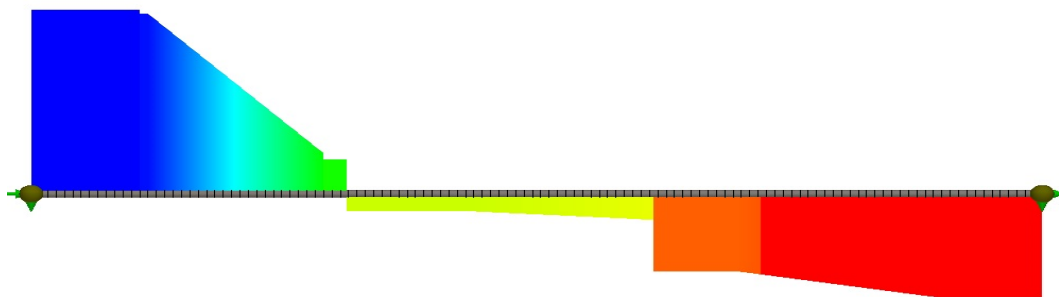
P_2 = Fuerza de pistón hidráulico = 1617 Lb ↓

At $x = 312.00$ in, a concentrated load of 1,617.00 lb acts **downward** on the beam. Concentrated forces create discontinuities in the shear diagram. The load of 1,617.00 lb causes the shear diagram to jump **DOWN** by 1,617.00 lb at $x = 312.00$ in. Just slightly to the left of $x = 312.00$ in, the shear force is -725.82 lb. Adding -1,617.00 lb to this value gives a shear force of - 2,342.82 lb just slightly to the right of $x = 312.00$ in.

Diagramas de cortantes con NDSolid®



Diagramas de cortantes con SolidWorks®



Para poder determinar el esfuerzo máximo se requiere calcular el momento máximo este se buscó utilizando NDSolid®

Take a cut for $0 \leq x \leq 57$: $+\sum M_x = 0$; $+(5,578.922)(x-0) - M_1(x) = 0$; $M_1(x) = +5,578.922x$
 $\therefore M_1(x) = +5,578.922x$ for $0 \leq x \leq 57 = +5,578.922 \text{ Lb} \cdot (57 \text{ in}) = \mathbf{317,842.45 \text{ Lb-in}}$
 $M_1(x) = 317,842.45 \text{ Lb-in}$

Take a cut for $57 \leq x \leq 147$: Find the moments due to the DL from $x=57$ to $x=147$: The rectangular DL acts at distance of $x-57/2$ from the cut with a force of:

$$b \times h = -49.22(x-57) = +2,805.54 - 49.22x; \text{ So the moment force is: } (+2,805.54 - 49.22x)(x-57/2) \\ = -79,957.89 + 2,805.54x - 24.61x^2 + \sum M_x = 0 \\ + (5,578.922)(x-0) + [-79,957.89 + 2,805.54x - 24.61x^2] - M_2(x) = 0; M_2(x) = -79,957.89 \\ + 8,384.462x - 24.61x^2; \therefore M_2(x) = -79,957.89 + 8,384.462x - 24.61x^2 = -79,957.89 \\ + 8,384.462(147) - 24.61(147^2) = -79,957.89 + 1,232,515 - 531,797.49 = 620,759.6 \text{ Lb-in}$$

$M_2(x) = 620,759.6 \text{ Lb-in}$

Take a cut for $147 \leq x \leq 158$:

$$+\sum M_x = 0; + (5,578.922)(x-0) + [+451,839.6 - 4429.8x] - M_3(x) = 0 \\ M_3(x) = +451,839.6 + 1,149.122x; \therefore M_3(x) = +451,839.6 + 1,149.122x = +451,839.6 + 1,149.122(158) = \\ \mathbf{M_3(x) = +633,400.8 \text{ Lb-in}}$$

Take a cut for $158 \leq x \leq 200$:

$$+\sum M_x = 0; + (5,578.922)(x-0) + (-1,617)(x-158) + [+451,839.6 - 4429.8x] - M_4(x) = 0 \\ M_4(x) = +707,325.6 - 467.878x \therefore M_4(x) = +707,325.6 - 467.878x = +707,325.6 - 467.878(200) = \\ \mathbf{M_4(x) = 613,750 \text{ Lb-in}}$$

(El momento máximo en la viga se presenta en el tramo de las 158 pulgadas a las 200 pulgadas)

Para el cálculo del esfuerzo máximo se calculó en módulo de la sección utilizando NDSolid.

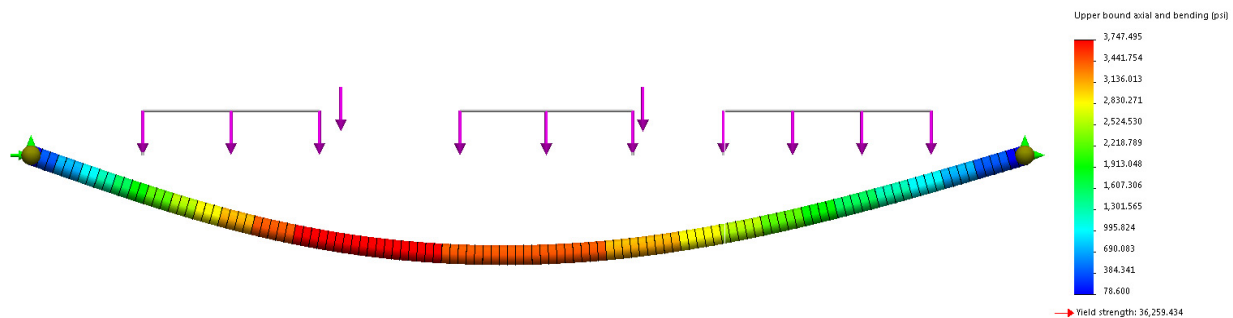
Z Axis Properties			
Elastic Modulus	E	29.0100E+06	psi
From bottom to centroid	y (bot)	12.0000	inch
From centroid to top	y (top)	12.0000	inch
Area of shape	A	21.0313	inch^2
Moment of Inertia	Iz	2,075.8322	inch^4
Section Modulus	Sz	172.9860	inch^3
Section Modulus (bottom)	S (bot)	172.9860	inch^3
Section Modulus (top)	S (top)	172.9860	inch^3
Radius of Gyration	rz	9.9349	inch

$$\sigma_n = M_{\max}/S$$

Donde: σ_n = Esfuerzo Normal en PSI; $M_{\max}$ = Momento máximo en la viga Lb-in; S = Modulo de la sección

$$\sigma_n = M_{\max}/S = 633400.8 \text{ Lb-in} / 172.98 \text{ in}^3 = \mathbf{3,661.69 \text{ psi}}$$

Este cálculo fue comparado en SolidWorks® donde dio un total de = **3747.495 psi**



Calculo del factor de seguridad.

$$F.S. = \sigma_y / \sigma_n$$

Donde: σ_y = El limite elástico = 36,300 psi; σ_n = Esfuerzo Normal = 3,661.69 psi

$$F.S. = \sigma_y / \sigma_n = 36,300 \text{ psi} / 3,661.69 \text{ psi} = \mathbf{9.91}$$

El cálculo en el programa de SolidWorks fue de 9.7

Se concluye que las vigas están soportando un aproximado del 10% de su capacidad antes de llegar al punto máximo de la zona elástica.

Caculo de la deflexión con NDSolid®

For the deflection discontinuity equation, the following units are displayed:

Length units = in

Force units = lb

Moment units = lb-in

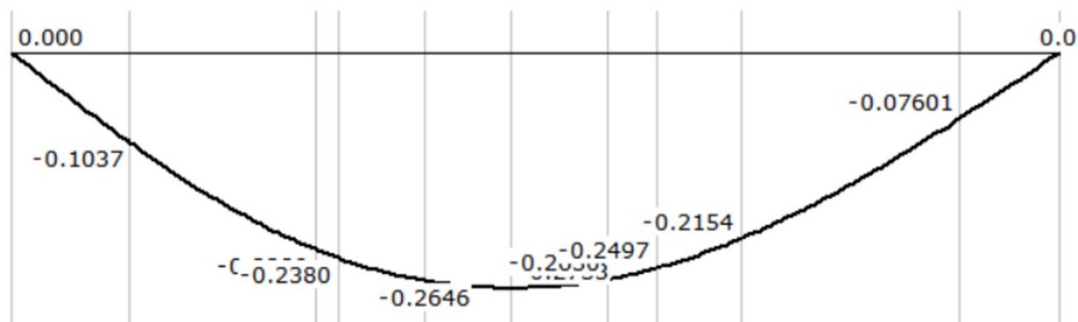
EI = +60,220,062,738.04 lb-in²

Deflection discontinuity equation using symbolic notations:

$$EI \times \text{Deflection} = A_y/6\langle x-0.00 \rangle^3 + B_y/6\langle x-507.00 \rangle^3 - (\text{Slope at } x=0) x - w_1/24\langle x-57.00 \rangle^4 + w_1/24\langle x-147.00 \rangle^4 - P_1/6\langle x-158.00 \rangle^3 - w_2/24\langle x-200.00 \rangle^4 + w_2/24\langle x-288.00 \rangle^4 - P_2/6\langle x-312.00 \rangle^3 - w_3/24\langle x-353.00 \rangle^4 + w_3/24\langle x-459.00 \rangle^4$$

Deflection discontinuity equation showing actual numeric values:

$$EI \times \text{Deflection} = +5,578.92/6\langle x-0.00 \rangle^3 + 3,199.72/6\langle x-507.00 \rangle^3 - 112,571,165.20x - 49.22/24\langle x-57.00 \rangle^4 + 49.22/24\langle x-147.00 \rangle^4 - 1,617.00/6\langle x-158.00 \rangle^3 - 2.96/24\langle x-200.00 \rangle^4 + 2.96/24\langle x-288.00 \rangle^4 - 1,617.00/6\langle x-312.00 \rangle^3 - 8.06/24\langle x-353.00 \rangle^4 + 8.06/24\langle x-459.00 \rangle^4$$



El resultado fue una deflexión máxima de .264 de pulgada.

En SolidWorks la deflexión fue de .285 de pulgada, lo podemos ver en la figura de abajo, si esta flexión afecta a la operación, se puede curvar la viga desde su fabricación, así en el momento de montar todo el equipo esta flexión sería absorbida por la curvatura y el peso la volvería la viga a su forma recta.

