

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UNA BOQUILLA DE TEMPLE POR
FLAMA ACOPLADA A UN TORNO, CON FINES DIDÁCTICOS**

PRESENTADO POR:

NELSON JAVIER MÉNDEZ MONTES

VALERIANO VLADIMIR VALDEZ GALICIA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA AGOSTO DE 2005

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA :

Dra. Maria Isabel Rodríguez

SECRETARIA GENERAL :

Licda. Lidia Margarita Muñoz Vela

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Ing. Mario Roberto Nieto Lovo

SECRETARIO :

Ing. Oscar Eduardo Marroquín Hernández

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

Ing. Juan Antonio Flores Díaz

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de Graduación previo a la opción del Grado de:
INGENIERO MECÁNICO**

Título

:

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE
UNA BOQUILLA DE TEMPLE POR FLAMA
ACOPLADA A UN TORNO CON FINES
DIDÁCTICOS**

Presentado por

:

**NELSON JAVIER MÉNDEZ MONTES
VALERIANO VLADIMIR VALDEZ GALICIA**

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Director

:

Dr. y M. Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz

Docente Director

:

Ing. Francisco Alfredo De León Torres

San Salvador, agosto de 2005

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Director :

Dr. y M. Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz

Docente Director :

Ing. Francisco Alfredo De León Torres

AGRADECIMIENTOS

Extendemos nuestros agradecimientos al coordinador Dr. y M. Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz y al asesor Ing. Francisco Alfredo De León Torres, por el aporte a la realización de el presente Trabajo de Graduación; al igual que a nuestros amigos y compañeros que sin ningún interés apoyaron con su colaboraron a finalizar esta etapa de nuestras vidas.

Valeriano V. Valdez & Nelson J. Méndez

DEDICATORIA

Este triunfo alcanzado se lo dedico especialmente:

A Dios Todopoderoso: Por darme la sabiduría necesaria para alcanzar este triunfo y por estar a mi lado en cada momento de mi vida.

A mis padres: A mi padre Valeriano Valdéz García, soy quien soy gracias a ti, gracias por brindarme tu apoyo y amor, a mi madre Aurelia Galicia Nerio (QGDD), gracias por darme la vida y mis primeras letras; a mi mami Maria Nicolasa Guzmán (QGDD), gracias por todo su apoyo y amor.

A mis maestros: Por tener la responsabilidad de transmitirme sus conocimientos y enseñarme a buscar la riqueza del saber; y en forma particular al cuerpo docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por haberme formado como profesional en todas las áreas, y en forma muy especial por su amistad a el: Ing. Gustavo Salomón Torres Ríos Lazo, Ing. y M. Sc. Leila Marina Jiménez Monroy, Ing. Juan Antonio Flores Díaz, Ing. Rigoberto Velásquez Paz, Ing. Luis Humberto Guidos, Ing. José Francisco Zuleta Morataya, Ing. Oscar Eduardo Marroquín, Ing. Agustín Barrera Carpio, Ing. Miguel Tomás Amaya, Ing. Álvaro Antonio Aguilar Orantes e Ing. Saturnino Gaméz Guadrón

A mis amigos y compañeros graduados Por brindarme su apoyo incondicional y su extraordinaria amistad, en especial a: Ing. Nelson Santos Lima Jaco, Ing. Manuel Campos Pérez, Ing. Juan Carlos Artiga Domínguez, Ing. Edwin Rafael Gonzáles Chicas, Ing. José Efraín García Arias, Ing. Amilcar Leonel Rivera Reyes, Ing. Roberto Carlos Villatoro Andrade, Ing. Christopher Romel López Vásquez, Ing. William Alexander Mendoza Machado, Ing. Carlos Palma Flores, Ing. Juan Carlos López Cortez, Ing. Eileen Ramírez, Ing. Julio Cesar Flores Escalante, Ing. Oscar Ernesto Ayala Sánchez, Ing. Leonardo Mileto Hernández, Ing. Pedro Antonio Martínez, Ing. David Leonel Molina Fuentes, e Ing. Elmer Alexander Lopéz Cisneros.

**A mis amigos y
compañeros de la
Asociación
Salvadoreña de
Estudiantes de
Ingeniería Mecánica:**

Por compartir junto a mí el sueño de una hermandad, la ASEIM como institución surge como el objetivo de explotar la amistad en búsqueda del conocimiento, el desarrollo integral de todos sus miembros y la solidificación de la comunidad que escogió la mejor carrera profesional. Gracias hermanos por estar a mi lado en los momentos cruciales de mi vida, en especial a: Mauricio Antonio Polanco Rugamas, Henry Jiovani Cruz, Misael Ernesto Melgar Escobar, Ricardo Vladimir Jiménez Carranza, Manuel Armando Gonzáles García, José Luis Sanabria Bonilla, Juan de Dios Guzmán, Luis Alonso Meléndez Mozo, Tobias Serrano Mejia, Luis Alonso Miles Hernández, Mario Ernesto Flores, Elvis Henríquez, Guillermo Guevara, Alex Alfonso Rivera Reyes, y a la nueva generación de miembros en quien recae el compromiso de mantener a flote el barco y vivo el ideal de una Asociación al servicio de la comunidad estudiantil, buscando la unificación y la solidaridad de los estudiantes de Ingeniería Mecánica.

A mis amig@s:

Por brindarme lo más hermoso de esta tierra, siendo lo único que llevamos el día en que partimos de este plano terrenal, gracias a: Ing. Jorge Martínez, Prof. Roberto Granados Durán, Lic. Rafael Arévalo, Ing. Marco Antonio Martínez, Sr. Tomás Gaméz, Larisa Yasmín Terezón Segura, Zuleyma Inés Acevedo, Karla Erika Navarrete, Magaly Portillo, Alba Eugenia Salinas Perdomo, Maura Elizabeth Villalta Santos, Flor Ivania Cornejo Pinto, Morena Guadalupe Montano Quijano, Emma Elizabeth Santos, Mario Nazareth Barahona Rosa, Jairo Constantino Barahona Rosa, José Pastor Valle Valle, Fabricio René Jiménez Zelada, Luis Alberto Herrera Medrano, Leonardo Monterrosa, Jorge Armando Campos Leiva, William Alexander Navarrete Mejia, José Vidal Barahona López, Leonardo Torres Pineda, Mauricio García Arias, Fernando Oswaldo Martínez Medina, Blanca Rosa Hernández, Maria Consuelo Benítez, y Helen Marlene Reyes Romero. Aunque he hecho el esfuerzo por no olvidar a nadie, espero que me disculpen a los que se me quedaron.

**Al coordinador y al
asesor de este Trabajo
de Graduación:**

Por no solo brindarme parte de sus conocimientos, sino que también su valiosa amistad: Dr. y M. Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz, e Ing. Francisco De León Torres. Espero que siempre me recuerden, porque donde yo me encuentre siempre los llevare en mis recuerdos.

**Al personal de la
Unidad Productiva
Metal-Mecánica de la
Facultad de Ingeniería
y Arquitectura:**

Por brindarme el apoyo, su amistad, su comprensión en diversas fases de mi formación, gracias a: el Licenciado Méndez, al señor Peralta, al señor Vásquez, y de manera muy especial por sus consejos y asesoría técnica oportuna a: Julio Cesar Quintanilla y a Juan Bautista Perla.

**A mis guías
espirituales:**

Siempre es oportuno una orientación basada en nuestras creencias, reconocer el temor a Dios y el obedecer su voluntad. Gracias por haber realizado esta labor en diferentes fases de mi vida, especialmente a: Hno. José, al Padre Guissepe Coró y al Padre Graciano Buttarazzi.

“Presta oído a la sabiduría; entrega tu mente a la inteligencia. Pide con todas tus fuerzas inteligencia y buen juicio; entrégate por completo a buscarlos, cual si buscaras plata o un tesoro escondido. Entonces sabrás lo que es honrar al Señor; ¡descubrirás lo que es conocer a Dios! Pues el Señor es quien da la sabiduría; la ciencia y el conocimiento brotan de sus labios.”

Proverbios 2; 2 -6

¿Alcanzarán las próximas generaciones la tierra prometida? ¿Cuántos son los centenares de millones que han muerto ya sin contemplarla? ¿Cuántas las víctimas de la opresión y el saqueo, de la pobreza, el hambre y la insalubridad? ¿Cuántos más tendrán que caer todavía? Queremos un mundo sin hegemonismos, sin armas nucleares, sin intervencionismos, sin racismo, sin odios nacionales ni religiosos, sin ultrajes a la soberanía de ningún país, con respeto a la independencia y a la libre determinación de los pueblos, sin modelos universales que no consideran para nada las tradiciones y la cultura de todos los componentes de la humanidad, sin crueles bloqueos que matan a hombres, mujeres y niños, jóvenes y ancianos, como bombas atómicas silenciosas. Queremos un mundo de paz, justicia y dignidad, en el que todos, sin excepción alguna, tengan derecho al bienestar y a la vida”

Comandante Fidel Castro
(22 de Octubre de 1995; New York, USA)

Valeriano Vladimir Valdéz Galicia

DEDICATORIAS

A Dios todopoderoso, a Jesús, A Santamaría siempre virgen y a San Marcelino Champagnat

Por haberme dado lo que tengo en esta vida, por haberme guiado siempre por el buen camino, por dirigir mis pensamientos y mis actos, por ser mis únicos amigos, los cuales me han escuchado siempre, por haberme convertido en una mejor persona y por haberme permitido alcanzar este gran triunfo en mi vida.

A mis Padres y hermana

A mi madre Rosa María Montes por sus incansables esfuerzos y sacrificios, por haberme dado toda mi formación, por haberme enseñado que el estudio y el trabajo deben de hacerse con la mayor de las dedicaciones y por todas sus preocupaciones para que llegue a ser un profesional. A mi padre por estar siempre conmigo en los malos momentos apoyándome siempre y preocupándose por todos mis logros y responsabilidades en mi vida y a mi hermana por estar siempre a mi lado, por ayudarme y apoyarme en mis decisiones y en mis estudios. Todos sus esfuerzos, preocupaciones, desvelos e incomodidades tienen un fruto y este logro es por ustedes.

A mis Familiares

Dedico en especial este triunfo a mi padrino Carlos Alfredo Sosa (Q.D.D.G.), por haberme tratado como a un hijo, por haber dedicado gran parte de su vida a mi formación y por haberme enseñado el sentido de la responsabilidad y que el trabajo por muy arduo y duro que sea debe de enfrentarse con el mayor de los esfuerzos; siempre lo recuerdo en mi mente y está en mi corazón, nunca voy a olvidar todas sus enseñanzas y ejemplos. A mi abuelo Alfonso Montes, por haber estado siempre a mi lado aconsejándome, cuidándome y por haber sido como un padre para mí. A mis primos Carlos Sosa e Ivania Sosa, por ser parte de mi vida y por ayudarme en los momentos más duros de mi vida de estudiante. A mi tía Graciela Montes, por cuidarme y ayudarme en mi vida de estudiante para poder llegar a ser lo que soy. A mi tío Alfonso Montes, por haberme transmitido parte de sus conocimientos para bien de mi carrera. A mi abuela Graciela Durán por haberme cuidado en mis años de estudiante y a todos mis familiares que se encuentran lejos de nosotros. Agradezco a Dios por haberme dado tan grande y hermosa familia, todos son artífices de este triunfo.

A mis Maestros

A mis maestras de kinder y preparatoria, en especial a mi maestra Mabel, por haberme enseñado con esmero mis primeros estudios. A todos los Hnos. Maristas y profesores

del Colegio Liceo Salvadoreño, en especial a los Hnos. José Luís Vallejo, Juan Pablo Balmaseda y al Hno. León Echávarri por haber sido parte de mi formación y por haberme enseñado que Jesús es nuestro amigo incondicional y que su Madre María nos guía a él. A los profesores Belarmino Alvarenga, Carlos Monterrosa, Román Haus, al Maestro Umaña, a los prof. Amilcar Guevara y Luís Mangandí y todos los docentes que me enseñaron y me vieron crecer, estudiar y estuvieron siempre aconsejándome en mis problemas de estudiante.

A mis compañeros de la ASEIM.

Por haberme apoyado siempre en mis estudios y por haber compartido buenos y malos momentos juntos, en especial a Luís Miles, Misael Melgar, Leslie Vides, Lucas Alas, Alba Perdomo, Pedro Chavez, Alex Rivera, Herberth Salamanca, Henry Cruz, Mauricio Polanco, Elvis Enríquez, Leandro Orellana, Agustín Matus, Reynaldo Barrientos, Ing. Edwin Chicas, Ing. Elmer Cisneros, Ing. Julio Flores, Ing. Oscar Ayala. Agradezco en especial a los Ingenieros Nelson Santos Lima Jaco, Manuel Campos Pérez, y a Larisa Terezón Segura y Zuleima Acevedo por haberme apoyado y por haber aportado sus conocimientos desinteresadamente en mi Trabajo de Graduación.

A mis compañeros de trabajo

A la Lic. Mariella Rivas e Ing. Mardoqueo Carranza, por haberme apoyado en todo mi proceso de graduación y por haber sido facilitadores de este gran logro alcanzado.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica

Por haberme transmitido todos sus conocimientos para lograr que sea un profesional con alto sentido de responsabilidad y valores, en especial al Ing., Gustavo Salomón Torres por haberme sido artífice de mi dedicación a la Ingeniería Mecánica y por haber creído en mi capacidad, y a la Ing. Leyla Jiménez por haberme apoyado y por haberme brindado su amistad, les tengo mucho aprecio y nunca olvidaré todas sus enseñanzas.

A los Docentes Directores

Al Dr. y M. Sc. Jonathan Berríos y al Ing. Alfredo De León, por haber aportado todas sus enseñanzas y capacidades, por haberme brindado todos sus conocimientos y por haber puesto todo su empeño para culminar este trabajo de Graduación.

A mi compañero de Trabajo de Graduación

Por trabajar siempre hombro a hombro para llevar a cabo este gran logro.

Al personal de la Unidad Productiva de la Escuela de Ingeniería Mecánica

Por dedicar todo su tiempo, experiencia y dedicación para llevar a acabo este gran triunfo, en especial a los técnicos Juan Perla y Julio Quintanilla por haber dedicado parte de su tiempo a mi formación técnica, humana y profesional y por haberme apoyado y aconsejado en todas mis actividades.

A todos mis amigos

A Danilo, Geovanny, Ana y Morena Quintanilla, Miguel, Carlos y Roberto Echeverría, Luís Sánchez, Francisco Turcios (Q.D.D.G), Rafael Quant, Mauricio Quant, Don Adolfo y Doña. Edith Quant, y a todos mis compañeros del Liceo Salvadoreño, en especial a Jorge Antonio Cortez Campos por haber compartido gran parte de mi vida y por haberme brindado todos su amistad y a todas las personas que de una forma u otra han contribuido con su granito de arena en llegar a ser lo que soy le agradezco de todo corazón.

“LOS HOMBRES NO DUDARÁN DE TUS PALABRAS PERO CREERÁN EN TUS ACCIONES”

V.J.M.J.CH

Nelson Javier Méndez Montes

RESUMEN

Se ha diseñado y construido una boquilla y los diferentes elementos que se necesitan para hacer girar las barras de prueba, la selección de elementos flexibles para convertir velocidades de rotación y la determinación del consumo de gas combustible para realizar el proceso. También, se realizaron temple por flama y los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con la boquilla, se presentan las fotografías de la microestructura obtenida por el proceso y se presentan los diferentes valores de dureza obtenidos a diferentes profundidades de la barra. Además, se elaboraron manuales tanto de operación como también de mantenimiento del dispositivo indicando los pasos necesarios para operar el torno que se utiliza para movilizar la boquilla y su respectivo sistema de combustión. De igual manera se indican los pasos necesarios para mantener en condiciones óptimas ambos sistemas. Se determinaron los costos incurridos para la adquisición de materiales y la construcción de la boquilla y todos los elementos necesarios para llevar a cabo el proceso de endurecimiento, así como también los costos de mano de obra para construir cada elemento. Finalmente, se elaboraron planos del dispositivo y las hojas de trabajo para la construcción de la boquilla y los elementos del sistema de transmisión de potencia se encuentran al final del documento.

INTRODUCCIÓN

El temple por flama es un proceso de endurecimiento superficial que comparado con otros métodos tiene la ventaja de poder endurecer la superficie de piezas de grandes dimensiones las cuales no pueden ser templadas en hornos eléctricos reduciendo de esta manera los costos para realizar el tratamiento térmico. El proceso se lleva a cabo calentando, por medio de una antorcha o boquilla, áreas específicas, de elementos como placas, ejes y rodillos, engranes, etc., calentando y enfriándolos simultáneamente.

Si tanto la boquilla como la pieza a tratar están inmóviles, se dice que el método de endurecimiento es estacionario, si la boquilla es desplazada longitudinalmente en toda la pieza, el endurecimiento es progresivo, si la pieza está girando y además la boquilla se está desplazando longitudinalmente, el endurecimiento es progresivo-rotatorio y si solamente la pieza es la que gira y la boquilla permanece inmóvil, el endurecimiento es rotatorio.

Los resultados obtenidos del proceso involucra una serie de variables que deben de manejarse como el tipo de gas combustible utilizado para generar la llama y las presiones de trabajo de los mismos, distancia de acoplamiento desde la boquilla hasta el área a endurecer y velocidad de avance de la boquilla para calentar y enfriar la pieza. El buen manejo de todas éstas variables depende en gran medida de la destreza del operario que realiza el proceso por lo que la automatización de éste cada vez toma mayor importancia ya que de esta manera pueden obtenerse resultados uniformes y satisfactorios en cuanto a durezas y profundidades de endurecimiento se refiere.

La gama de aceros que pueden ser endurecidos se limita a aceros de medio contenido de carbono y muy pocos aceros aleados y fundiciones.

En todo el proceso de endurecimiento juegan un papel muy importante la configuración de la boquilla, la razón de transferencia de calor de ésta hacia el área que se desea endurecer y el manejo adecuado de las variables antes mencionadas. Por lo tanto, el proceso de endurecimiento superficial por flama constituye un método muy versátil y económico para endurecer superficies obteniendo resultados satisfactorios en piezas cilíndricas, planas e irregulares.

INDICE

Pag.

1.0	MARCO TEÓRICO	1
1.1	MÉTODOS DE TEMPLE POR FLAMA	1
1.1.1	Método de temple por flama estacionario	2
1.1.2	Método de temple por flama progresivo	2
1.1.3	Método de temple por flama rotatorio	4
1.1.4	Método de temple por flama progresivo-rotatorio	6
1.2	VARIABLES DE OPERACIÓN Y ELEMENTOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE TEMPLE POR FLAMA	7
1.2.1	Gases combustibles	7
1.2.2	Presión de gas	9
1.2.3	Consumo de gas	11
1.2.4	Velocidad de avance de la boquilla	11
1.2.5	Velocidad de la flama	13
1.2.6	Distancia de acoplamiento	13
1.2.7	Tipo, volumen y ángulo de enfriamiento	14
1.3	PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN Y CONTROL DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE POR FLAMA	17
1.3.1	Pre calentamiento	17
1.3.2	Profundidad de calentamiento	18
1.3.3	Dureza y profundidad de endurecimiento	20
1.4	BOQUILLAS UTILIZADAS PARA TEMPLE POR FLAMA	25
1.4.1	Tipos de boquillas para temple por flama	25
1.4.2	Materiales de las boquillas para temple por flama	29
1.5	MECANISMOS DE CONDUCCIÓN DE CALOR	30
1.5.1	Conducción	31
1.5.2	Conducción de calor transitorio	34
1.5.3	Sistemas radiales con convección	38
1.5.4	Métodos numéricos en conducción de calor	40
1.6	MATERIALES PARA TEMPLE POR FLAMA	41
1.6.1	Aceros al carbono	42
1.6.2	Aceros aleados	42
1.6.3	Fundiciones	45
2.0	DISEÑO DEL DISPOSITIVO	
2.1	DISEÑO DE UNA BOQUILLA PARA TEMPLE POR FLAMA	47
2.1.1	Quemadores a propano	47
2.1.2	Diseño del quemador	49

2.2	DISEÑO DEL SISTEMA DE ACOPLAMIENTO AL TORNO	54
2.2.1	Diseño del eje de acoplamiento al torno	55
2.2.2	Selección de cadena para transmisión de potencia	60
2.2.3	Diseño del eje de transmisión del movimiento de giro	62
2.3	NORMAS DE SEGURIDAD	66
3.0	CARACTERIZACIÓN DE LA BOQUILLA	
3.1	PROCEDIMIENTO DE TEMPLE POR FLAMA	68
3.2	DESCRIPCIÓN DE VARIABLES Y CONSTANTES DEL PROCESO DE TEMPLE POR FLAMA	70
3.3	ESTUDIO METALOGRÁFICO	71
3.3.1	Preparación de probetas para análisis metalográfico	71
3.3.2	Presentación de resultados	77
3.3.3	Análisis de resultados	84
3.4	ANÁLISIS PARA EL CALENTAMIENTO EN UNA BARRA SOMETIDA A TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE POR FLAMA	85
4.0	MANUALES	
4.1	MANUAL DE OPERACIÓN	98
4.1.1	Sistema de movimiento de la boquilla	98
4.1.2	Sistema de combustión	101
4.1.3	Procedimiento del temple por flama	103
4.2	MANUAL DE MANTENIMIENTO	106
5.0	DETERMINACIÓN DE COSTOS	
5.1	Costos involucrados	109
5.1.1	Materia prima	110
5.1.2	Mano de obra directa	111
5.1.3	Mano de obra indirecta	
5.1.4	Costos del proyecto	112
	CONCLUSIONES	113
	RECOMENDACIONES	114
	BIBLIOGRAFÍA	
	PLANOS DEL DISPOSITIVO	
	HOJAS DE TRABAJO	

ÍNDICE DE FIGURAS

Pag.

Figura 1.1	Método de temple por flama estacionario. [www.flametreatingsystems.com]	2
Figura 1.2	Método de temple por flama estacionario de un balancín. [Horwitz, (1990)].	2
Figura 1.3	Método de temple por flama progresivo [www.flametreatingsystems.com]	3
Figura 1.4	Configuración de una boquilla utilizada en el método de temple por flama progresivo. ASM, (1996)]	3
Figura 1.5	Características de la capa endurecida por el método progresivo [www.cflame.com]	4
Figura 1.6	Método de temple por flama rotatorio [www.flametreatingsystems.com]	4
Figura 1.7	Unidad de endurecimiento por flama que utiliza el método rotatorio para el endurecimiento de herramientas y partes [Palmer, (1986)].	5
Figura 1.8	Ampliación del efecto de endurecimiento en la superficie de los dientes de un engrane [www.cflame.com].	5
Figura 1.9	Efecto del endurecimiento rotatorio, señalando un núcleo tenaz y la superficie endurecida [www.cflame.com].	5
Figura 1.10	Esquema del método de temple por flama progresivo-rotatorio [www.flametreatingsystems.com]	6
Figura 1.11	Tipo de mecanismo utilizado en el método de temple por flama progresivo-rotatorio [ASM, (1996)].	6
Figura 1.12	Comparación de tiempos de calentamiento para MAPP, acetileno y propano. Velocidad de flama: 170 m/s (550 pie/s); tamaño de orificios, No. de broca 69(0.74 mm o 0.0292 pulg); distancia de acoplamiento, 9.5 mm (3/8 pulg); material acero 1036. Relación de oxígeno a combustible: MAPP, 5.0; acetileno, 1.33; propano, 4.5 [ASM, (1996)]	9
Figura 1.13	Profundidad de endurecimiento para diferentes velocidades de suministro. Por el lado izquierdo, la guía fue templada con una velocidad de avance de 250 mm/min y por el lado derecho, la guía fue templada a una velocidad de avance de 200 mm/min [Thelning, (1967)].	12
Figura 1.14	Efecto de la distancia de acoplamiento sobre la profundidad del temple. Velocidad de flama 170 m/s; tamaño de orificios broca #69; distancia de acoplamiento 9.5 mm; material acero 1052. Relación de oxígeno-combustible MAPP, 4.5; acetileno 1.33; propano 4.5. Tiempos de calentamiento MAPP, 6 s; acetileno y propano 8 s [ASM, (1996)].	14
Figura 1.15	Ángulo de salida del medio de enfriamiento en la boquilla integrada con calentamiento/enfriamiento.	16
Figura 1.16	Efecto del precalentamiento en el gradiente de dureza en un aro de engrane [ASM, (1996)]	18
Figura 1.17	Relación entre el tiempo, la temperatura y la profundidad usando acetileno [ASM, (1996)].	20
Figura 1.18	Relación entre el tiempo, la temperatura y la profundidad usando gas natural [ASM, (1996)].	20

Figura 1.19	Relación entre el tiempo, la temperatura y la profundidad para el método progresivo utilizando acetileno. La boquilla contiene dos filas de orificios de flama que producen una zona de calentamiento de 20 mm de ancho [ASM, (1996)].	21
Figura 1.20	Distribución de temperatura a diferentes distancias por debajo de la superficie durante el endurecimiento por flama seguido por enfriamiento en agua [Thelning, (1967)].	22
Figura 1.21	Distribución de temperatura a diferentes distancias por debajo de la superficie durante el endurecimiento por flama seguido por enfriamiento al aire [Thelning, (1967)].	23
Figura 1.22	Relación entre el perfil de dureza y distancia de acoplamiento del quemador durante el endurecimiento por flama de un acero con 0.50 % de C. Espécimen de prueba de 25 × 75 × 100 mm, enfriado con agua en forma de rocío [Thelning, (1967)].	23
Figura 1.23	Relación entre el perfil de dureza y la distancia de acoplamiento durante el endurecimiento por flama del acero O1 [Thelning, (1967)].	23
Figura 1.24	Dependencia del perfil de dureza en la distancia de acoplamiento y la velocidad de avance de la boquilla durante el endurecimiento de un acero D2 enfriado por aire [Thelning, (1967)].	24
Figura 1.25	Quemador típico de aire-gas del tipo radiante [ASM, (1996)]	26
Figura 1.26	Quemador típico de aire-gas del tipo convectivo de alta velocidad [ASM, (1996)]	27
Figura 1.27	Boquillas para usar con mezclas oxígeno-combustible [ASM, (1996)].	28
Figura 1.28	Configuración de una cabeza de flama [www.flametreatingsystems.com]	29
Figura 1.29a	Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en una placa semiinfinita. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 , y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_∞ (Mills, 1994).	35
Figura 1.29b	Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en una barra rectangular infinita. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 , y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_∞ (Mills, 1994).	36
Figura 1.29c	Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en una barra rectangular semiinfinita. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 , y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_∞ (Mills, 1994).	36
Figura 1.29d	Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en un paralelepípedo rectangular. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_∞ (Mills, 1994).	37
Figura 1.29e	Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en un cilindro semiinfinito. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_∞ (Mills, 1994).	37

Figura 1.29f	Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en un cilindro corto. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_∞ (Mills, 1994).	38
Figura 1.30	Relación entre el contenido de carbono y la dureza mínima obtenida por calentamiento por flama o inducción y enfriamiento por agua. El contenido práctico mínimo de carbono puede ser determinado por esta curva [ASM, (1996)].	43
Figura 1.31	Gradiente de endurecimiento por flama típico producido en hierro gris [ASM, (1996)].	45
Figura 2.1	Tipos de quemadores a gas	48
Figura 2.2	Valores de coeficientes de descarga ϕ de distintas formas de orificios	52
Figura 2.3	Valores de potencia unitaria en función de la presión efectiva de bares para los gases combustibles usuales. Se ha tomado como coeficiente de descarga $\phi=1$ y temperatura inicial del gas de 15°C.	53
Figura 3.1	Regulador de única etapa de presión graduable para el manejo de GLP. Diseñado para trabajo tipo industrial como lámparas infrarrojas de gas, sopletes, hornos, incubadoras, etc. Donde la capacidad instalada requiera ajustes continuos en la presión de consumo entre 6.9 - 13.8 Kpa (1-2 psi)	68
Figura 3.2	Llama utilizada para el temple por flama	69
Figura 3.3	Corte de los especímenes sometidos al temple por flama	72
Figura 3.4	Maquina cortadora de probetas con disco abrasivo	72
Figura 3.5	Probetas embutidas en resina poliéster	73
Figura 3.6	Máquina semiautomática para el pulido de probetas	74
Figura 3.7	Mesa para el pulido manual de probetas metalográficas	75
Figura 3.8	Máquina pulidora vibradora	75
Figura 3.9	Máquina para pulido individual de probetas metalográficas	76
Figura 3.10	Implementos a utilizar para el ataque químico de las probetas metalográficas	76
Figura 3.11	Microscopio para análisis metalográfico	77
Figura 3.12	Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 7 m.m, presión del gas combustible (GLP) de 2 psi. (13.8 kPa), presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama. Ampliación 100x.	77
Figura 3.13	Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 8 m.m, presión del gas combustible (GLP) de 2.0 psi (13.8 kPa), presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama. Ampliación 100x.	78
Figura 3.14	Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 9 m.m, presión del gas combustible (GLP) de 2.0 psi. (13.8 kPa), presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama (100x)	78

- Figura 3.15 Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 7 m.m, presión del gas combustible (GLP) de 2 psi. (13.8 kPa), presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama. Ampliación 100x. 78
- Figura 3.16 Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 8 m.m, presión del gas combustible (GLP) de 2.0 psi (13.8 kPa), presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama. Ampliación 100x. 79
- Figura 3.17 Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 9 m.m, presión del gas combustible (GLP) de 2.0 psi. (13.8 kPa), presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama (100x). 79
- Figura 3.18 Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 7 m.m, presión del gas combustible (GLP) de 2 psi. (13.8 kPa), presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama. Ampliación 100x. 79
- Figura 3.19 Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 8 m.m, presión del gas combustible (GLP) de 2.0 psi (13.8 kPa), presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama. Ampliación 100x. 80
- Figura 3.20 Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 9 m.m, presión del gas combustible (GLP) de 2.0 psi. (13.8 kPa), presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido a temple por flama (100x). 80

Figura 3.21	Microestructura de la superficie en una barra de 1/2", de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 1.5 psi. (10 kPa); Presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa), distancia de acoplamiento 17 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 3 mm/s; no existe tiempo de estabilización. Ampliación 100x	81
Figura 3.22	Microestructura de la superficie en una barra de 1/2", de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 1.5 psi. (10 kPa); Presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa); distancia de acoplamiento 17 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 2 mm/s; no existe tiempo de estabilización. Ampliación 100x.	81
Figura 3.23	Microestructura de la superficie en una barra de 1/2", de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 1.5 psi. (10 kPa); Presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa); distancia de acoplamiento 17 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 1 mm/s; no existe tiempo de estabilización. Ampliación 100x	81
Figura 3.24	Microestructura de la superficie en una barra de 1/2", de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 1.5 psi. (10 kPa); Presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa); distancia de acoplamiento 17 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 1 mm/s; no existe tiempo de estabilización. Ampliación 100x	82
Figura 3.25	Microestructura de la superficie en una barra de 1/2", de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 1.5 psi. (10 kPa); Presión del oxígeno 1.5 psi. (10 kPa); distancia de acoplamiento 10 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 5 mm/s; no existe tiempo de estabilización. Ampliación 100x	82
Figura 3.26	Microestructura de la superficie en una barra de 1/2", de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 1.5 psi. (10 kPa); Presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa); distancia de acoplamiento 10 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 0.5 mm/s; tiempo de estabilización 135 segundos. Ampliación 500x.	82
Figura 3.27	Microestructura de la superficie en una barra de 1/2", de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple en el horno, Las condiciones del tratamiento son: temperatura del horno 900°C, tiempo de mantenimiento en el interior del horno de la probeta 2 minutos, el medio de enfriamiento es agua a temperatura ambiente de 32°C aproximadamente. Ampliación 100x.	83
Figura 3.28	Microestructura de la superficie en una barra de 1/2", de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple en el horno, Las condiciones del tratamiento son: temperatura del horno 900°C, tiempo de mantenimiento en el interior del horno de la probeta 2 minutos 30 segundos, el medio de enfriamiento es agua a temperatura ambiente de 32°C aproximadamente. Ampliación 100x.	83

Figura 3.29	Microestructura de la superficie en una barra de 1/2", de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple en el horno, Las condiciones del tratamiento son: temperatura del horno 900°C, tiempo de mantenimiento en el interior del horno de la probeta 3 minutos, el medio de enfriamiento es agua a temperatura ambiente de 32°C	83
Figura 3.30	Microestructura de la superficie en una barra de 1/2", de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple en el horno, Las condiciones del tratamiento son: temperatura del horno 950°C, tiempo de mantenimiento en el interior del horno de la probeta 3 minutos, el medio de enfriamiento es agua a temperatura ambiente de 32°C	83
Figura 3.31	Grafica Dureza vs. Profundidad para diferentes distancias de acoplamiento, en el extremo de inicio del proceso de temple por flama.	84
Figura 3.32	Grafica Dureza vs. Profundidad para diferentes distancias de acoplamiento, de la parte media de la barra sometida al proceso de temple por flama.	85
Figura 3.33	Barra espécimen	86
Figura 3.34	Efecto de la conducción de calor en la barra espécimen	86
Figura 3.35	Proceso de temple por flama. La fotografía muestra el estado de inicio del proceso con el dispositivo diseñado.	88
Figura 3.36	Distribuciones de velocidad indicando separación de flujo en un cilindro en flujo transversal	91
Figura 3.37	Listado de archivos utilizados por el programa para determinar el perfil de temperatura en barras de acero AISI 1045.	96
Figura 3.38	Perfil de temperatura obtenido con ayuda del software utilizado para temple por flama creado en MATLAB.	96
Figura 4.1	Disposición de las palancas en la caja de velocidades del torno, para generar 50 rpm.	99
Figura 4.2	Sistema de catarinas y cadena utilizadas para la transmisión de potencia del torno al banco de pruebas.	100
Figura 4.3	Disposición de las palancas del sistema de control del tornillo patrón del torno utilizado para las pruebas de temple por flama.	100
Figura 4.4	Juego de manómetros utilizado en el cilindros de oxígeno	102
Figura 4.5	Tipo de llama utilizada en el proceso de temple por flama	103
Figura 4.6	Montaje entre puntos de la barra de prueba	104
Figura 4.7	Banco de pruebas para el temple por flama de especímenes de 300 mm de longitud	104
Figura 4.8	Distancia e acoplamiento	105
Figura 4.9	Sistema de temple por flama acoplado a un torno. Al fondo se puede observar el banco de pruebas en donde es colocada el espécimen a temprar. Montado en el portaherramientas se encuentra la boquilla tipo soplete.	106
Figura 4.10	Quemador tipo soplete para temple por flama	108

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.1	Gases combustibles utilizados para endurecimiento por flama. (Reproducida del ASM Handbook, Heat treating, 1996)	10
Tabla 1.2	Condiciones superficiales desfavorables para el temple por flama. (Reproducida del ASM Handbook, Heat treating, 1996)	19
Tabla 1.3	Respuesta de aceros y fundiciones al temple por flama (Fuente: ASM Handbook, vol.2, 1996)	44
Tabla 3.1	Constantes para el número de Nusselt	93
Tabla 5.1	Materiales para construcción y uso de la boquilla	110
Tabla 5.2	Materiales para construcción del banco de pruebas	111
Tabla 5.3	Costos de M. de O. para la construcción del banco de pruebas	111
Tabla 5.4	Costos de M. de O. para la construcción de la boquilla	112
Tabla 5.5	Costos del proyecto	114

SIMBOLOGIA

φ	Coefficiente de descarga de orificios
q_m	Caudal masico
ρ_g	Densidad del gas
H_r^*	Potencia nominal corregida
C	Distancia entre centros
I_{carga}	Momento de inercia del elemento
K	Coefficiente de arrastre del aire
K_a	Factor de acabado de superficie
K_b	Factor de tamaño
K_c	Factor de carga
L	Longitud de la cadena
N_1	Número de dientes en la Catarina menor
N_2	Número de dientes en la Catarina mayor
P	Paso de la cadena
P_e	Caída de presión
S_e	Esfuerzo a la fatiga
α	Aceleración angular del elemento, difusividad térmica
F	Fuerza
S_{ut}	Resistencia última a la tensión
σ_a	Esfuerzos de flexión alternantes
τ_m	Esfuerzos de torsión medios
W	Peso
R1, R2	Reacciones
ϕ	Diámetro
T	Temperatura
r	Radio
c	Calor específico
k	Conductividad térmica
q	Flujo de calor
τ	Tiempo
p	Presión
G_c	Gravedad
C_D	Coefficiente de arrastre
A	Area
u_∞	Velocidad de corriente libre
x	Distancia
Un	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
ν	Viscosidad cinemática
h	Coefficiente de transferencia de calor
u_{avance}	Velocidad de avance de la boquilla

CAPITULO I



1. MARCO TEÓRICO

El temple por flama es un proceso de tratamiento térmico mediante el cual haciendo uso de una fuente de calor intenso, una capa delgada en la superficie de una pieza es calentada rápidamente a una temperatura encima de la crítica superior del acero para obtener una estructura de grano completamente austenítica, posteriormente la pieza se enfría por la acción de un rocío de agua sobre la superficie, transformando la austenita a martensita, mientras que el núcleo de la pieza se mantiene en su condición original. El acero debe ser enfriado rápidamente para evitar que la austenita se transforme a perlita o bainita logrando bajos valores de dureza en la pieza. Ya que en estado martensítico el acero presenta mayor dureza, ofrece protección a la superficie sin afectar el núcleo de la misma. Aún cuando el temple por flama es usado principalmente para desarrollar altos niveles de dureza y para aumentar la resistencia al desgaste, también mejora la resistencia a la flexión y a la torsión satisfaciendo requerimientos ingenieriles estrictos utilizando aceros al carbono. Así El temple por flama es un método de endurecimiento el cual no cambia la composición química del acero ya que es un método de endurecimiento que se realiza en un tiempo muy corto.

1.1 MÉTODOS DE TEMPLE POR FLAMA

El temple por flama constituye un método de temple muy utilizado en la actualidad debido a que permite templar las superficies y partes sometidas a desgaste de una determinada pieza manteniendo el núcleo de éstas sin alteraciones en su microestructura, la versatilidad del equipo para el temple por flama y el amplio intervalo de condiciones de calentamiento obtenibles con quemadores de gas permiten, frecuentemente, que el temple por flama a su vez sea efectuado mediante una variedad de métodos entre los cuales están: (a) estacionario, (b) progresivo, (c) rotatorio y (d) progresivo-rotatorio.

La selección del método apropiado depende de la forma, tamaño y composición de la pieza, del área a ser endurecida, de la profundidad de endurecimiento requerida y del número de piezas a ser endurecidas. En muchos casos, más de un método producirá el



resultado deseado por lo que la elección de cada uno dependerá de la comparación de costos.

1.1.1 MÉTODO DE TEMPLE POR FLAMA ESTACIONARIO

Este método requiere que un área especificada sea calentada (figura 1.1), siendo la boquilla de uno o varios orificios, dependiendo de la extensión de la zona a templear, adaptándose así para finales de ejes y partes grandes sin la utilización de equipo complicado.

Debe equilibrarse la alimentación de calor para obtener una temperatura uniforme en toda la zona seleccionada para luego enfriarla bruscamente por inmersión; sin embargo, en algunas operaciones mecanizadas puede usarse el enfriamiento rápido por rocío [Horwitz, (1990)]. En la figura 1.2 se esquematiza el método de endurecimiento estacionario localizado de un balancín.



Figura 1.1 Método de temple por flama estacionario [www.flametreatingsystems.com]

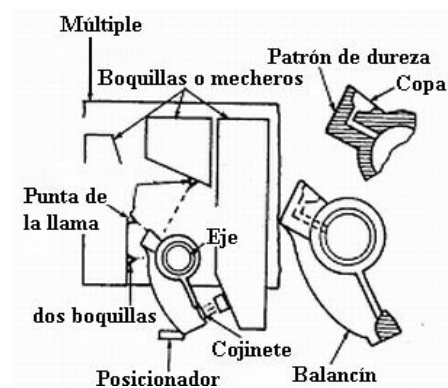


Figura 1.2 Método de temple por flama estacionario de un balancín [Horwitz, (1990)].

1.1.2 MÉTODO DE TEMPLE POR FLAMA PROGRESIVO

El método de temple progresivo implica el uso de una cabeza de flama con la capacidad integrada de calentar y enfriar la pieza de trabajo, como se presenta en la figura 1.3, siendo el método particularmente adaptado para bancadas, cuchillas y superficies planas.

El equipo necesario para el temple por flama por este método consiste de una o más cabezas de flama y un medio enfriador acoplados en un dispositivo móvil regulado a una determinada velocidad (figura 1.4). Piezas con longitudes de hasta 1.5 m de largo pueden templarse por este método.



Figura 1.3 Método de temple por flama progresivo [www.flametreatingsystems.com]

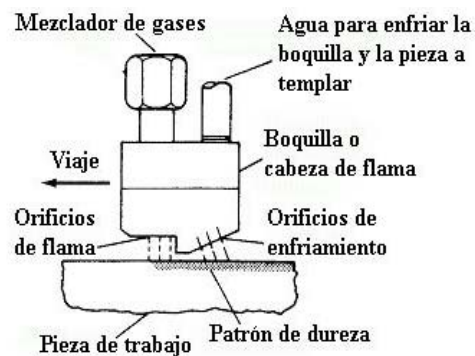


Figura 1.4 Configuración de una boquilla utilizada en el método de temple por flama progresivo [ASM, (1996)].

Cuando es necesario efectuar más de una pasada para cubrir una superficie plana, o cuando se endurecen superficies cilíndricas por el método progresivo, tales superficies presentarán bandas suaves o no endurecidas debido a las “entrepasadas”, las cuales son zonas que no han sido calentadas entre cada pasada ocasionando daños como rajaduras.

Las aplicaciones más comunes del método progresivo son bushings, levas, cabrestantes, troqueles, engranes, punzonadores, rieles, poleas, rodillos, entre otros; además, es el mejor proceso para endurecimiento de piezas largas y planas como rieles y alineadores. Este método provee una dureza uniforme, profundidad aceptable y un núcleo dúctil como se presenta en la figura 1.5.



Figura 1.5 Características de la capa endurecida por el método progresivo[www.cflame.com]

1.1.3 MÉTODO DE TEMPLE POR FLAMA ROTATORIO

El endurecimiento rotatorio requiere que el área especificada a ser tratada sea girada enfrente de la(s) boquilla(s) utilizando un mecanismo para girar la pieza de trabajo, ya sea en un plano horizontal o vertical, mientras que la superficie está siendo calentada por la boquilla (figura 1.6), luego que la pieza ha sido calentada a la temperatura deseada, la flama se aparta y la pieza es enfriada por inmersión o por rociado o una combinación de ambas.

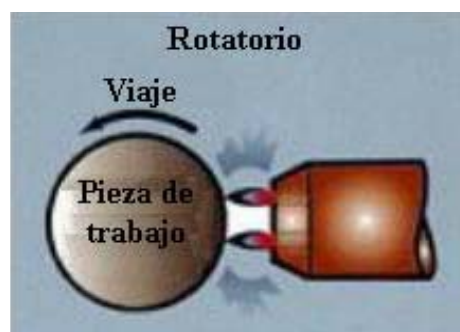


Figura 1.6 Método de temple por flama rotatorio [www.flametreatingsystems.com].

En la actualidad se utilizan equipos como el que se presenta en la figura 1.7 en los que las piezas se sujetan a una estructura rotatoria y todas las superficies se calientan mediante un conjunto de llamas controladas por un pirómetro de radiación [Palmer, (1986)]. Las



principales ventajas de este proceso son: una profunda penetración de temple, zona endurecida localizada y uniformidad del grosor de la capa templada.

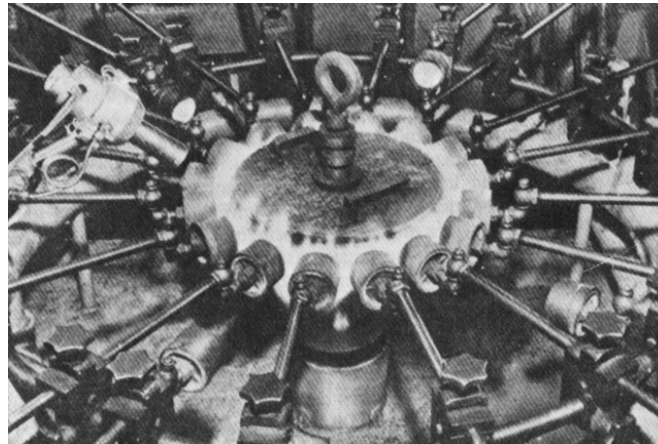


Figura 1.7 Unidad de endurecimiento por flama que utiliza el método rotatorio para el endurecimiento de herramientas y partes [Palmer, (1986)].

Contrario al método progresivo, en el cual se utiliza oxiacetileno, en este método se pueden obtener resultados satisfactorios con gas natural o gas propano. El método es adaptado para endurecer piezas redondas o semiredondas tales como ejes, engranes, catarinas, rodillos y volantes con uno o dos rebordes. En la figura 1.8 se presenta una ampliación de dos dientes de un engrane endurecido por el método rotatorio, en dicha figura se presenta el patrón de dureza en los dientes. El endurecimiento de ejes y rodillos utilizando el método giratorio es la mejor y a veces la única forma de tratar térmicamente grandes y largos rodillos y ejes con una menor distorsión y más alta dureza en la superficie combinada con buena ductilidad en el núcleo, tal como se presenta en la figura 1.9.



Figura 1.8 Ampliación del efecto de endurecimiento en la superficie de los dientes de un engrane [www.cflame.com].



Figura 1.9 Efecto del endurecimiento rotatorio, señalando un núcleo tenaz y la superficie endurecida [www.cflame.com].

1.1.4 MÉTODO DE TEMPLE POR FLAMA PROGRESIVO-ROTATORIO

Este tipo de método combina el método progresivo y el rotatorio como se presenta en la figura 1.10 ya que la pieza a ser tratada da vueltas enfrente de la boquilla y al mismo tiempo ésta se desplaza calentando y enfriando a lo largo de toda la longitud de la pieza, el enfriamiento continúa posterior a la boquilla ya sea como parte integral de ésta o como un anillo de enfriamiento separado como se presenta en la figura 1.11.

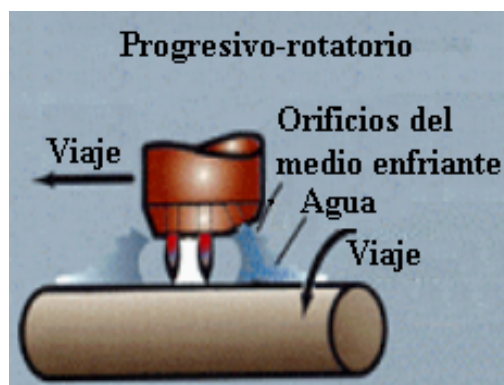


Figura 1.10 Esquema del método de temple por flama progresivo-rotatorio [www.flametreatingsystems.com].

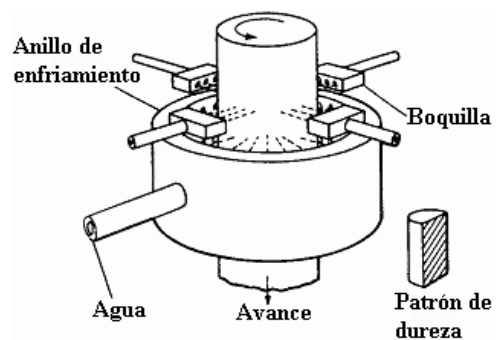


Figura 1.11 Tipo de mecanismo utilizado en el método de temple por flama progresivo-rotatorio [ASM, (1996)].

Este método provee un medio para templar áreas superficiales grandes con un flujo de gas relativamente bajo. Las aplicaciones del método progresivo-rotatorio abarcan los ejes, rodillos de gran longitud, cabezales, bushings y ejes de levas. El proceso puede ser usado para templar totalmente piezas que posean un diámetro de 75 mm (3 pulg) o menos dependiendo de la templabilidad del acero. Una de las principales ventajas que proporciona este método es que evita que se produzcan deformaciones durante el temple de piezas muy grandes ya que el núcleo del material se mantiene relativamente frío manteniendo de esta manera su tenacidad.



1.2 VARIABLES DE OPERACIÓN Y ELEMENTOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE TEMPLE POR FLAMA

En el proceso de temple por flama existe una serie de variables y elementos que deben de conocerse para obtener resultados satisfactorios cuando se desea endurecer una pieza, dichas variables y elementos determinarán la profundidad de la capa endurecida, así como también la microestructura que se obtiene al realizar el proceso.

Las principales variables de operación son:

- a) Tipo de gas combustible a utilizar.
- b) Presión y consumo de gas.
- c) Velocidad de avance de la boquilla (en los métodos progresivo y progresivo-rotatorio).
- d) Distancia de acoplamiento.
- e) Velocidad de la flama.
- f) Razón oxígeno-combustible.
- g) Tipo, volumen y ángulo de enfriamiento (cuándo se utilicen boquillas como se presenta en la figura 1.4).

1.2.1 GASES COMBUSTIBLES

Al seleccionar un gas combustible para una aplicación dada deben considerarse los factores siguientes: velocidad de calentamiento, costo del gas, costo inicial del equipo y costo de mantenimiento. Los tipos de llamas que se pueden obtener con cada uno de los gases combustibles que se utilizan pueden ser de tres tipos: Flamas de tipo carburante, neutras u oxidantes siendo las flamas oxidantes las que utilizan grandes proporciones de oxígeno produciendo temperaturas extremadamente altas causando descarburación y calentamiento en la pieza. Una flama carburante, previene la descarburación y sobrecalentamiento pero también puede introducir carbono en la superficie. Para obtener mejores resultados deben utilizarse flamas neutras o escasamente carburantes.



Para poder formar una flama para calentamiento puede hacerse uso de oxígeno con cualquier gas combustible teniendo en cuenta que el propano es el más económico.

Un parámetro que se correlaciona bien con la velocidad de calentamiento real es la intensidad de combustión o salida de flama específica, que matemáticamente está expresada como:

$$\text{Intensidad de combustión} = v_q \times Q_{cal} \quad (1.1)$$

Donde:

v_q : velocidad de flama normal.

Q_{cal} : valor calorífico neto de la mezcla de oxígeno y gas combustible.

Los combustibles de mayor interés comercial están clasificados por su intensidad de combustión en el siguiente orden: acetileno, MAPP (Metilacetileno Propadieno), propano y metano (estos gases están mezclados con oxígeno a razones metalúrgicamente útiles), los valores de velocidades normales de quemado y valores caloríficos de mezclas se presentan en la tabla 1.1.

El tiempo requerido para la penetración del calor es otro buen criterio para juzgar las cualidades de calentamiento de un combustible. En la figura 1.12 se presentan los tiempos de calentamiento comparativos para el Metilacetileno Propadieno (MAPP), acetileno y propano utilizando una distancia de acoplamiento adecuada para cada combustible, en estas curvas se puede observar que las mayores profundidades de dureza pueden ser obtenidas con MAPP en un tiempo más corto.

Otro factor a tomar en cuenta en la selección de un combustible es la razón de oxígeno ó aire a combustible ya que es muy importante para obtener la máxima eficiencia de calentamiento del combustible — no debe confundirse ésta con los intervalos de consumo de oxígeno y combustible, los cuales varían con la velocidad de flama, tamaño de los orificios de flama y tiempo de calentamiento— dicha razón es un factor clave para determinar la temperatura de la flama, por ejemplo, el propano produce temperaturas de flama de 2700 °C (4900°F) a una razón de 5:1; 2540 °C (4600 °F) a una razón de 4:1; y 2730 °C(4300 °F) a una razón de 3:1.

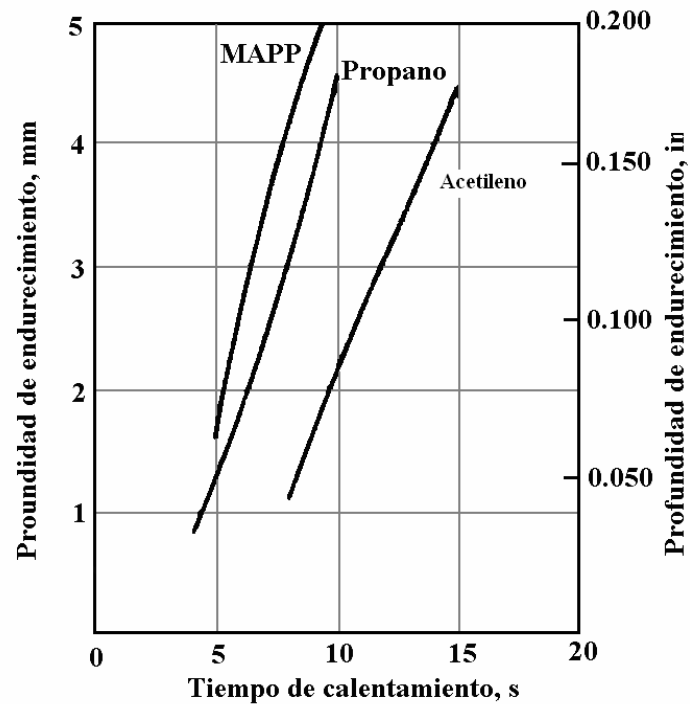


Figura 1.12 Comparación de tiempos de calentamiento para MAPP, acetileno y propano. Velocidad de flama: 170 m/s (550 pie/s); tamaño de orificios, No. de broca 69(0.74 mm o 0.0292 pulg); distancia de acoplamiento, 9.5 mm (3/8 pulg); material acero 1036. Relación de oxígeno a combustible: MAPP, 5.0; acetileno, 1.33; propano, 4.5 [ASM, (1996)]

En la tabla 1.1 se presentan las diferentes razones de oxígeno (aire) a combustible y las temperaturas obtenidas cuando se utiliza cada uno de los comburentes para formar la flama. Estequiométricamente el acetileno requiere de $2\frac{1}{2}$ moles de oxígeno por mol de gas para la combustión completa, el gas MAPP requiere 4 moles y el propano requiere 5 moles, con acetileno, sin embargo un intervalo de 1 a 1.5 volúmenes de oxígeno es proporcionado directamente, y el resto tomado directamente de la atmósfera.

1.2.2 PRESIÓN DE GAS

Las presiones del oxígeno ó aire y del combustible deberán ser controladas exactamente para la entrega uniforme de calor porque este factor influye mucho en la profundidad de endurecimiento, la cual es obtenida por la cantidad de calor administrado (presión del gas)



TABLA 1.1 Gases combustibles utilizados para endurecimiento por flama.
(Reproducida del AS M Handbook, Heat treating, 1996)

Gas	Valor calorífico		Temperatura de la flama		Valor calorífico de mezcla oxí-combustible		Velocidad de la flama		Intensidad de combustión(a)		Razón usual aire-comb.			
	MI/ft ³	Btu/ft ³	Con oxígeno °C	Con aire °F	Razón usual oxí-comb.	MI/ft ³	Btu/ft ³	mm/s	pulg/s	mm/s x Btu/ft ³		Pulg/s x Btu/ft ³		
Acetileno	53.4	1433	3105	5620	2325	4215	1	26.7	716	535	21	14284	15036	12
Gas domestico	11.2-33.5	300-900	2540	4600	1985	3605	(b)	(b)	(b)	(b)	(b)	(b)	(b)	(b)
Gas Natural (Metano)	37.3	1000	2705	4900	1875	3405	1.75	13.6	364	280	11	3808	4004	9
Propano	93.9	2520	2635	4775	1925	1925	4	18.8	504	305	12	5734	6048	25
MLAPP	90	2406	2927	5301	1760	3200	3.75	20	535	381	15	7620	8025	22

(a) Producto de la velocidad normal de quemado por el valor calorífico de la mezcla oxí-combustible.

(b) Varía con el valor calorífico y la composición.



y la velocidad de la boquilla (velocidad de avance). Debe tenerse muy en cuenta que las boquillas planas son menos eficientes cuando se usan en superficies circulares o curvas ya que cada cono de flama está a diferente distancia de la pieza de trabajo. Esta variable es cuantificada basándose en la experiencia que posea el operario y no puede especificarse un valor único de presión para ambos gases sino más bien manejar un intervalo de trabajo.

1.2.3 CONSUMO DE GAS

El consumo de gas en el temple por flama varía con el espesor de la capa endurecida a ser obtenido. A medida que se necesita profundidades de endurecimiento mayores, también se necesitará incrementar la cantidad de gas. Las combinaciones de gases más utilizadas en este proceso son:

- a) Acetileno-oxígeno: temperaturas de flama por encima de los 3315 °C (6000 °F), pero ordinariamente el intervalo de 2871 °C (5200 °F) a 3204 °C (5800 °F) son muy utilizadas.
- b) Propano-aire: esta mezcla produce muy baja temperatura de flama.
- c) Propano oxígeno: la temperatura de flama es normalmente entre 2482 °C (4500 °F) y 2760 °C (5000 °F).
- d) Gas natural-aire: temperaturas de flama en el intervalo de 1537 °C (2800 °F) a 1927 °C (3500 °F) son obtenidas debido a la alta razón de aire a gas utilizado [ASM, (1996)].

1.2.4 VELOCIDAD DE AVANCE DE LA BOQUILLA

Las velocidades de avance (suministro) de la boquilla sobre la superficie dependen de la capacidad de calentamiento de la misma, de la profundidad de endurecimiento requerida, de la composición, de la forma de la pieza, y el tipo de enfriamiento usado. En los métodos progresivos y progresivo-rotatorio varían usualmente entre 0.8 a 5 mm/s (2-12 pulg/min)



para la mayoría de aplicaciones, aunque muchas piezas muy delgadas requieren de velocidades de 42 mm/s (100 pulg/min) o más para evitar el sobrecalentamiento.

La velocidad de rotación utilizada en el método rotatorio es relativamente baja, normalmente valores alrededor de 60 rpm son utilizados en este método [Thelning, (1967)].

Estos valores de velocidad pueden tomarse como referencia cuando se efectúa endurecimiento usando el método rotatorio o progresivo-rotatorio aunque podrían utilizarse velocidades más altas considerando que el tiempo de calentamiento de un punto de la pieza podría ser menor, por lo tanto la velocidad de rotación (rpm) y de avance (mm/s) en el método progresivo-rotatorio deben manejarse de tal manera que un punto en la pieza sea calentado en el menor tiempo posible si las velocidades de avance son relativamente altas ya que en este método la boquilla es la encargada de enfriar la pieza. La velocidad de avance de la(s) boquilla(s), tanto en el método progresivo como en el progresivo-rotatorio, deberá ser constante para resultados uniformes calentando gradualmente la pieza de trabajo para asegurarse que el área a ser endurecida consigue la temperatura y profundidad de calentamiento apropiada. En la figura 1.13 se presentan las guías de un torno que han sido endurecidas usando la misma presión de gas pero diferente velocidad de avance de la(s) boquilla(s) evidenciándose de esta manera el aumento en espesor de la capa endurecida con velocidades de avance más bajas.

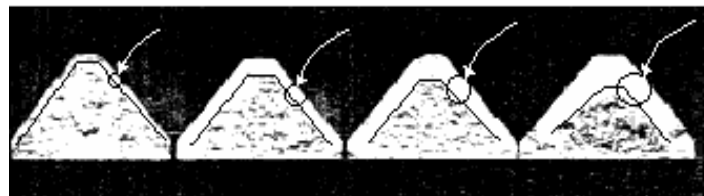


Figura 1.13 Profundidad de endurecimiento para diferentes velocidades de suministro. Por el lado izq. la guía fue templada con una velocidad de avance de 250 mm/min y por el lado der. la guía fue templada a una velocidad de avance de 200 mm/min [Thelning, (1967)].



1.2.5 VELOCIDAD DE LA FLAMA

Es una de las variables más importantes ya que al ser controlada junto a otras variables, como la velocidad de avance, es el principal determinante de la profundidad de la capa endurecida.

En el endurecimiento de fundiciones de hierro, donde altas temperaturas de superficie son indeseables, el uso de velocidades de flama más bajas resulta ventajoso ya que se evita el excesivo calentamiento. Con respecto a los gases combustibles, ambos MAPP y propano son fácilmente controlables y efectivos sobre un amplio intervalo de velocidades proporcionando no solamente flexibilidad sino también realizando las operaciones en una forma más segura resultando en un mejor control del calentamiento. Estas velocidades están muy relacionadas con las presiones de gas que se utilicen por lo que a mayores velocidades de flama, se incrementa la profundidad de calentamiento. Algunos valores de velocidades de flama o quemado se presentan en la tabla 1.1.

1.2.6 DISTANCIA DE ACOPLAMIENTO

Esta es la distancia medida desde los orificios de flama de la boquilla hasta la superficie de la pieza de trabajo; esta distancia debe de incrementarse cuando la velocidad de la flama se incrementa ya que de otra manera existirá sobrecalentamiento en la superficie a endurecer. La relación entre la distancia de acoplamiento y la profundidad de endurecimiento para tres gases combustibles se presenta en la figura 1.14. La distancia de acoplamiento para MAPP es igual o ligeramente más grande que para acetileno siendo más eficaz cuando oscila entre 6.4 a 9.5 mm ($\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{8}$ pulg.). Esta distancia de acoplamiento debe de incrementarse cuando se endurecerán fundiciones ya que pueden sobrecalentarse y agrietarse durante el enfriamiento brusco de la pieza.

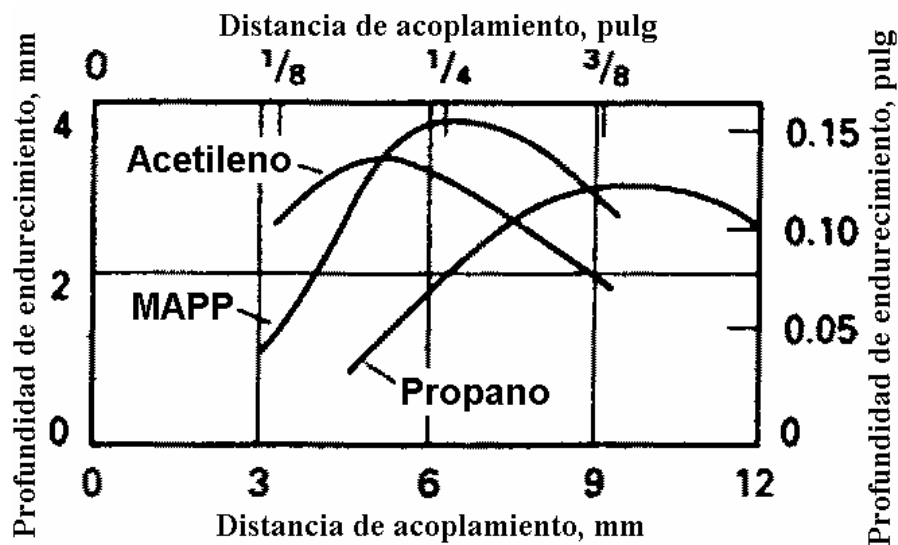


Figura 1.14 Efecto de la distancia de acoplamiento sobre la profundidad del temple. Velocidad de flama 170 m/s; tamaño de orificios broca #69; distancia de acoplamiento 9.5 mm; material acero 1052. Relación de oxígeno-combustible MAPP, 4.5; acetileno 1.33; propano 4.5. Tiempos de calentamiento MAPP, 6 s; acetileno y propano 8 s [ASM, (1996)].

1.2.7 TIPO, VOLUMEN Y ÁNGULO DE ENFRIAMIENTO

La velocidad de enfriamiento depende del tipo y temperatura del medio de enfriamiento a utilizar. El enfriamiento de la pieza al aire es el que produce la más baja dureza superficial, este es llamado autoenfriamiento, este ocurre cuando una pieza es lo suficientemente larga ya que se enfría ella misma disipando el calor lejos de la superficie tratada.

Uno de los medios de enfriamiento más utilizados en el temple por flama es aire forzado ya que minimiza el riesgo de generar fisuras en la superficie, particularmente en aceros con alto porcentaje de carbono. Este medio es muy utilizado en el método progresivo para aceros que son enfriados normalmente por aceite ya que el aire reduce rápidamente la temperatura superficial de la parte hasta una temperatura en que el agua puede ser salpicada sin causar grietas superficiales, obteniendo un valor de dureza cercano a aquella que se obtiene con enfriamiento directo en aceite [ASM, (1996)].

El aire forzado es además muy utilizado cuando se requieran durezas intermedias en aceros templables con agua proporcionando una estructura de perlita fina que provee



resistencia al desgaste y suficiente ductilidad sin demasiada severidad en la rapidez de enfriamiento, también es utilizado cuando se endurecen fundiciones altamente aleadas debido a su fragilidad y susceptibilidad a rupturas [ASM, (1996)].

El agua es otro medio de enfriamiento muy utilizado cuando se requiere obtener el mayor valor de dureza en aceros de mediano carbono, aunque también pueden causar rupturas en la superficie si no se usa cuidadosamente ya que es un medio de enfriamiento con mayor severidad.

Enfriamiento después del calentamiento progresivo Las piezas calentadas por el método progresivo son enfriadas usualmente por un “rociador” integrado en la boquilla, sin embargo, para aceros de alta templeabilidad, o cuando se desea variar o ajustar la distancia entre la zona calentada y el enfriamiento por rociado se usa en forma separada [(ASM, 1996)]. Si el medio de enfriamiento es suministrado por la boquilla, el chorro de enfriamiento debe dispararse con cierto ángulo desde la cabeza de la flama para prevenir alguna interferencia con la flama de calentamiento y debe cubrir totalmente la banda calentada.

La boquilla con medio de enfriamiento integrado lanza un chorro de agua con un ángulo de enfriamiento β tal como se presenta en la figura 1.15. Si el ángulo de enfriamiento es demasiado cerrado, las salpicaduras del medio enfriante crearán sopladuras en la flama evitando que exista un calentamiento uniforme de la parte. Por otro lado, si el ángulo de enfriamiento es demasiado grande, se incrementa la distancia entre la última fila de flama y el punto en que choca el chorro de enfriamiento, permitiendo que la masa de metal que está debajo del área calentada extraiga calor y por lo tanto se reducirá la severidad de temple y consecuentemente se impide la formación de martensita. Para muchas aplicaciones, β es generalmente de 30° o menos [(ASM,1996)].

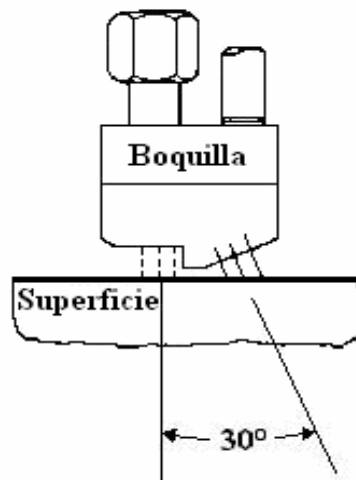


Figura 1.15 Ángulo de salida del medio de enfriamiento en la boquilla integrada con calentamiento y enfriamiento.

Cuando se usa el enfriamiento por “rocío” (ya sea integrado en la cabeza de flama o en forma separada) puede utilizarse agua o una solución polimérica diluida como medio de enfriamiento. Si ha de utilizarse aceite no debe permitirse que éste entre en contacto con el oxígeno o que contamine el equipo [ASM, (1996)].

Enfriamiento después del calentamiento rotatorio Las piezas que son calentadas por el método rotatorio pueden ser enfriadas por diferentes procesos, uno de ellos es la inmersión en un tanque con medio de enfriamiento, el cual se localiza por debajo de la pieza calentada, si las piezas son demasiado pesadas o frágiles para ser arrojadas, pueden ser sumergidas cuidadosamente con la ayuda de brazos mecánicos [ASM, 1996)].

Cuando se emplean mezclas aire-combustible en operaciones de endurecimiento rotatorio, el patrón de calentamiento desarrollado, en muchas instancias, se extiende más allá de los límites deseados por lo que el enfriamiento por inmersión podría extender el endurecimiento a áreas que posteriormente requerirán maquinado dificultando la operación debido a la excesiva distorsión. Para evitar este problema se utilizan anillos de enfriamiento como el que se presenta en la figura 1.11 [ASM, (1996)].



1.3 PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN Y CONTROL DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE POR FLAMA

En el proceso de temple por flama intervienen una serie de variables que deben de controlarse en forma precisa para obtener resultados uniformes y aceptables para el servicio requerido de una pieza, por esta razón, la habilidad que posea el operario es un factor clave para llevar a cabo un tratamiento térmico adecuado ya que muchas variables de operación involucradas como la distancia de acoplamiento, presión del gas, entre otras pueden ser manejadas basándose en la experiencia y conocimiento del operario. Esto involucra una revisión detenida de cada una de las variables descritas anteriormente para poder cuantificarlas.

1.3.1 PRECALENTAMIENTO

Este proceso no es representado como una variable de operación sino más bien como un proceso que puede llevarse a cabo antes de proceder a calentar la pieza, es decir, se aplica en algunos tipos de aceros o aleaciones tales como las fundiciones, así como también en el endurecimiento de partes de gran sección transversal ya que es difícil obtener el endurecimiento superficial deseado, por lo que el precalentamiento de la pieza puede ayudar a vencer este problema. Los datos de dureza presentados en la figura 1.16 evidencian la efectividad del precalentamiento en el desarrollo de la penetración de la dureza en un aro para engrane.

El endurecimiento por flama de aceros precalentados, especialmente algunos aceros aleados requieren un control cuidadoso del calentamiento para evitar el agrietamiento. Este proceso puede ser aconsejable para minimizar roturas en tales aceros cuando se calienta toda la zona a una temperatura inferior al eutectoide del material, antes de continuar con el proceso de temple por flama.

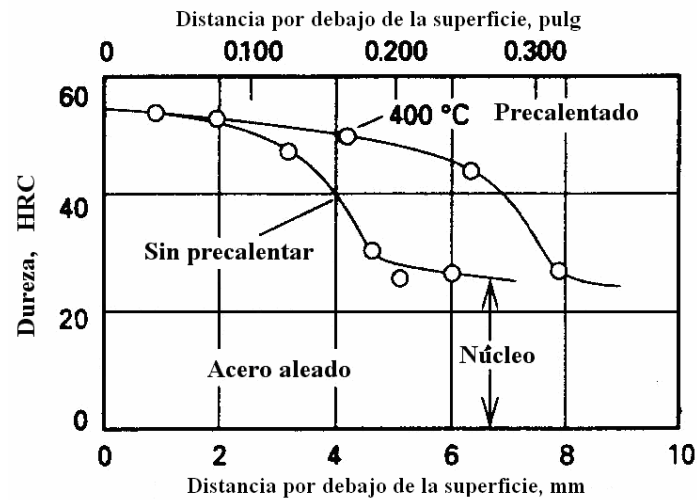


Figura 1.16 Efecto del precalentamiento en el gradiente de dureza en un aro de engrane [ASM, (1996)].

En la tabla 1.2 se presentan las condiciones superficiales desfavorables para realizar temple por flama.

1.3.2 PROFUNDIDAD DEL CALENTAMIENTO

Durezas superficiales con profundidad de 3.2 mm (0.125 pulg) pueden ser obtenidas utilizando solamente combustibles oxígeno-gas, esta mezcla suministra rápidamente una transferencia de calor para una localización efectiva pero requiere cuidado en su aplicación ya que debe evitarse el sobrecalentamiento de la superficie [ASM, (1996)]. Los gases combustibles aire-gas con sus más bajos intervalos de transferencia de calor (más bajas temperaturas de flama) minimizan o eliminan el sobrecalentamiento de la superficie. Por esta razón su uso es generalmente limitado a aceros para endurecimiento superficial y el perfil de dureza es controlado por el medio de enfriamiento más que por el calentamiento.



Tabla 1.2. Condiciones superficiales desfavorables para el temple por flama. (Reproducida del ASM Handbook, Heat treating, 1996)

Condición superficial	Causa probable que la provocó	Efectos perjudiciales a esperar en las zonas templadas a la llama
Traslapes, costuras, pliegues y partes forjadas.	Operaciones de laminado entre rodillos o de forja	Sobrecalentamiento localizado (en el peor de los casos, fusión de la superficie), con crecimiento consecuente de los cristales, fragilidad, y mayor riesgo de agrietamiento.
Escamas (adherentes) ^a	Laminado o forjado; tratamiento térmico previo; corte a la llama	Acción aislante contra el calentamiento, con el resultado de zonas infracaletadas y de regiones blandas. Retardo localizado del enfriamiento rápido, que ocasiona regiones blandas.
Herrumbre, suciedad ^a	Almacenaje y manejo del material o de las partes	Similar al de las escamas que se enuncia arriba. Una herrumbre considerable puede dar lugar a superficies con picaduras que permanecerán después del templado.
Descarburación	Calentamiento para forjado o tratamiento térmico previo de las partes que se tienen en existencia.	En las piezas de trabajo muy descarburizadas no se encontrará respuesta alguna cuando sean probadas a la lima o por otros medios superficiales ^b .
Picaduras, contracción (piezas vaciadas).	Defectos de fundición	Sobrecalentamiento localizado (fusión de la superficie), con el consecuente crecimiento de los cristales, fragilidad y mayor riesgo de agrietamiento.
Zonas de grano grueso en orificios de carga o de respiración (piezas fundidas)	Los orificios de vaciado situados en las zonas que hayan de templarse a la flama. (Evitarlos de ser posible)	Mayor riesgo de agrietamiento durante el enfriamiento rápido, por comparación con las zonas que no tienen dichos orificios. También son probables en estas zonas los defectos ocasionados por contracción.

^a Además de los efectos perjudiciales que experimentan las superficies templadas a la llama, las escamas, la herrumbre y la suciedad pueden desprenderse hacia la trayectoria de la llama y ocasionar fallas en los quemadores de gas combustible-oxígeno, o reaccionar químicamente con las partes de cerámica de dichos quemadores, ocasionando su rápido deterioro. Cuando estos materiales entran a un sistema de enfriamiento cerrado, pueden tapar los coladores, y los orificios de enfriamiento, y ocasionar desgaste excesivo de las bombas.

^b La descarburación parcial reduce la dureza de la superficie en función directa del contenido real del carbono del material de existencia en la superficie, siempre que el acero haya sido calentado y enfriado adecuadamente.



1.3.3 DUREZA Y PROFUNDIDAD DE ENDURECIMIENTO

La dureza y la profundidad de endurecimiento son gobernadas por la composición del acero y por la temperatura de austenización.

Independientemente del método de temple por flama que se utilice, la temperatura de endurecimiento es alcanzada más rápidamente con la mezcla oxígeno-acetileno que con la mezcla propano-oxígeno, por consiguiente con la mezcla oxígeno-acetileno se obtiene mayor profundidad de endurecimiento tomando en cuenta que existe mayor riesgo de oxidación de la superficie del acero por lo que temperaturas alrededor de los 1100 °C, las cuales pueden ser alcanzadas fácilmente, y bajo condiciones de oxidación, el acero puede llegar a oxidarse, en tanto que el cobre — el cual esta siempre presente en los aceros y el cual no se oxida en la misma extensión que el hierro— se concentrará y disolverá. Si la superficie del acero está sujeta a esfuerzos residuales, el cobre disuelto dentro del acero agrandará el grano y causará roturas superficiales [ASM, (1996)].

Las curvas que relacionan el tiempo, la temperatura y la profundidad de endurecimiento, usando gases comerciales se presentan en las figuras 1.17, 1.18 y 1.19, las cuales fueron obtenidas analíticamente considerando el flujo de calor en un cuerpo cilíndrico desde una fuente calorífica alimentando calor uniformemente sobre la superficie externa, además se asumió que la temperatura en el núcleo del cuerpo no debería incrementarse apreciablemente durante el calentamiento de la superficie y que el cilindro debería rotar lo suficientemente rápido para dar el efecto sustancial de calentamiento uniforme.

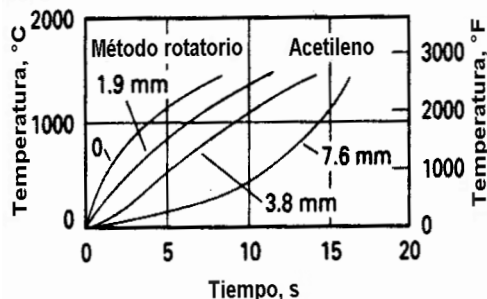


Figura 1.17 Relación entre el tiempo, la temperatura y la profundidad usando acetileno [ASM, (1996)]

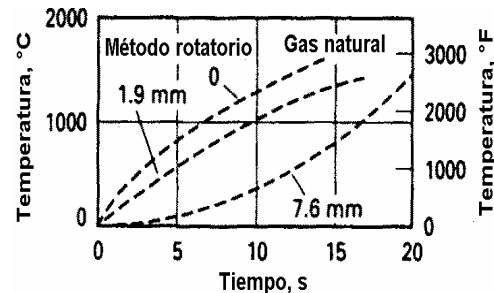


Figura 1.18 Relación entre el tiempo, la temperatura y la profundidad usando gas natural [ASM, (1996)]



La figura 1.17 indica que la pieza calentada con flama oxiacetilénica por 13.5 s a 870 °C produce una profundidad de endurecimiento de 7.6 mm aproximadamente. Calentando a la misma temperatura por un período de 8 s se obtiene una profundidad de endurecimiento de 3.8 mm aproximadamente. La figura 1.18 puede ser interpretada de manera similar.

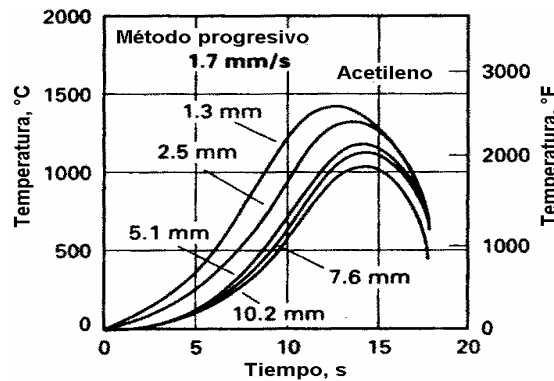


Figura 1.19 Relación entre el tiempo, la temperatura y la profundidad para el método progresivo utilizando acetileno. La boquilla contiene dos filas de orificios de flama que producen una zona de calentamiento de 20 mm de ancho [ASM, (1996)].

También la figura 1.19 fue obtenida analíticamente considerando flujo de calor desde una fuente móvil a lo largo de un cuerpo plano. Esta figura indica que utilizando una velocidad de avance de 1.7 mm/s (4 pulg/min) producirá una profundidad de 5.1 mm cuando el tiempo de calentamiento sea de 12 s a 870 °C. Si la velocidad de avance se aumenta 20% a 2 mm/s (4.8 pulg/min) el tiempo de calentamiento es proporcionalmente reducido a 10 s resultando una profundidad de endurecimiento de 2.5 mm aproximadamente [ASM, (1996)].

La variable tiempo puede ser relacionada con la velocidad de avance si el ancho de la zona de calentamiento es conocido. Por ejemplo, una zona de endurecimiento de 25 mm (1 pulg.) de largo será cubierta por una fila de orificios de flama de la boquilla en 15 s cuando la velocidad de avance de ésta sea de 1.7 mm/s (4 pulg./min.). Si la fuente de calor es tan intensa como se asumió para determinar las curvas, un sobrecalentamiento va a generar daños indeseables en la superficie de trabajo. Consecuentemente, una más alta velocidad de



avance, por ejemplo 2.5 mm/s calentará toda la superficie de trabajo en 10 s resultando en una profundidad de endurecimiento de 2.5 mm (0.100 pulg).

La Asociación de Industrias Suecas de Trabajado de Metales (Sveriges Mekanförbund) emprendió un proyecto dedicado al estudio del endurecimiento y profundidad de endurecimiento utilizando el método progresivo. Para el endurecimiento se ensayó con una máquina para corte por flama modificada para incorporar la boquilla. La distribución de la temperatura en la superficie del acero fue determinada en barras de prueba rectangulares de 25×50×100 mm, siendo la superficie de 25×100 mm ensayada y utilizando como medios de enfriamiento agua y aire frío. En las figuras 1.20 y 1.21 se presenta la distribución de la temperatura obtenidas para ambos medios de enfriamiento [Thelning, (1967)].

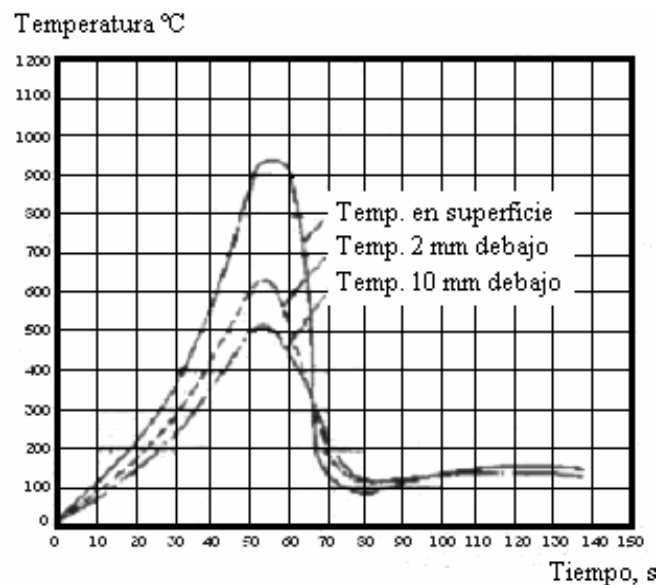


Figura 1.20 Distribución de temperatura a diferentes distancias por debajo de la superficie durante el endurecimiento por flama seguido por enfriamiento en agua. Tamaño de la muestra: 25×50×100 mm; alimentación del quemador: 75 mm/min; distancia del quemador: 6 mm [Thelning, (1967)].

En la figura 1.20 (enfriamiento con agua) se evidencia que la temperatura que se tiene a 10 mm por debajo de la superficie es inferior a la temperatura eutectoide del acero, por lo que no existirán cambios en la microestructura del material a esta distancia bajo la superficie.

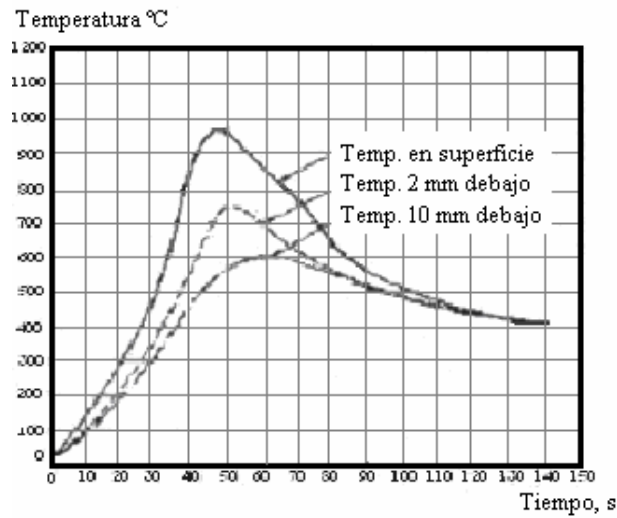


Figura 1.21 Distribución de temperatura a diferentes distancias por debajo de la superficie durante el endurecimiento por flama seguido por enfriamiento al aire. Tamaño de la muestra: 25×50×100 mm; alimentación del quemador: 75 mm/min; distancia del quemador: 6 mm [Thelning, (1967)].

Por otro lado, en la figura 1.21 se presenta una distribución de temperatura que no decae rápidamente como en el caso del enfriamiento por agua ya que el aire es un medio de enfriamiento menos severo, por lo que al incrementarse el tiempo de enfriamiento se remueve poco calor de la superficie.

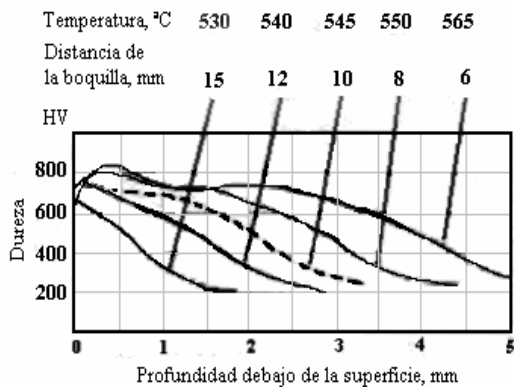


Figura 1.22 Relación entre el perfil de dureza y distancia de acoplamiento del quemador durante el endurecimiento por flama de un acero con 0.50 % de C. Espécimen de prueba de 25x75x100 mm, enfriado con agua en forma de rocío [Thelning, (1967)]

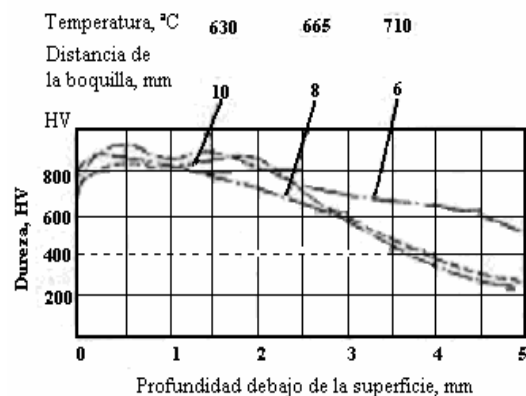


Figura 1.23 Relación entre el perfil de dureza y la distancia de acoplamiento durante el endurecido por flama del acero O1 [Thelning, (1967)]



En la figura 1.22 se presenta la distribución de dureza en barras de prueba de acero al carbono AISI 1050 después del endurecimiento usando una velocidad de avance de 50 mm/min (0.83 mm/s) y diferentes distancias de acoplamiento. También, es posible que los aceros para herramientas del tipo O1 y D2 sean endurecidos por flama sin agrietamiento. Con estos aceros es suficiente enfriarlos al aire para obtener durezas superficiales alrededor de los 800 HV. En la figura 1.23 se presentan los resultados del temple superficial en un acero O1.

Durante una pasada con la mínima distancia de acoplamiento del quemador, el acero llegó a incrementar el tamaño de grano en la capa superficial. El acero D2 no se afecta por el sobrecalentamiento relacionado con el tamaño de grano, pero es propenso a contener austenita retenida y a disolverla. Durante la prueba se aclaró que este efecto fue debido, entre otras cosas, a la baja conductividad del acero, el cual resultó en un alto gradiente de temperatura [Thelning, (1967)]. En la figura 1.24 se presentan las temperaturas medidas a 5 mm por debajo de la superficie, las cuales son considerablemente más altas que en el caso precedente.

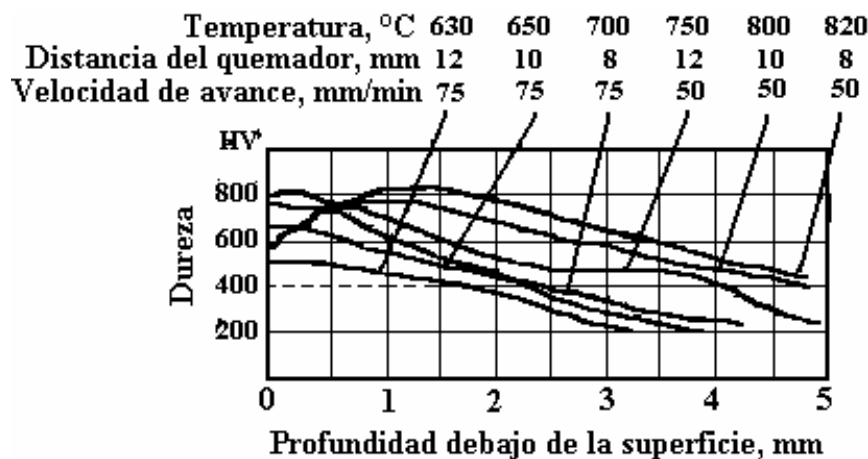


Figura 1.24 Dependencia del perfil de dureza en la distancia de acoplamiento y la velocidad de avance de la boquilla durante el endurecimiento de un acero D2 enfriado por aire [Thelning, (1967)].

En la figura 1.24 se presenta la disminución de dureza a medida que se acerca al núcleo de la pieza debido a que a esta profundidad no se alcanza la temperatura adecuada para templar la misma, teniendo un valor de dureza uniforme de 200 HV a 4 mm por debajo de



la superficie cuando se utiliza una velocidad de avance de 75 mm/min. Por otro lado, si se utiliza una velocidad de avance de 50 mm/min, el tiempo de calentamiento aumenta y la profundidad de calentamiento es mayor por lo que al enfriar la pieza se tendrán mayores valores de dureza a las mismas profundidades que utilizando 75 mm/min.

1.4 BOQUILLAS UTILIZADAS PARA TEMPLE POR FLAMA

Los quemadores son componentes básicos en un equipo para todos los métodos de temple por flama ya que permiten realizar la combustión de manera controlada y regulable. Dichos quemadores varían en diseño, dependiendo si estos manejan una mezcla oxígeno-combustible o aire-combustible. Las temperaturas de flama obtenidas por la combustión de mezclas oxígeno-combustible alcanzan los 2540 °C (4600 °F) o más. La transferencia de calor en la mayoría de los casos es por contacto directo de la flama con la superficie de trabajo.

1.4.1 TIPOS DE BOQUILLAS PARA TEMPLE POR FLAMA

Las boquillas para temple por flama o como se les conocen comúnmente en el mercado internacional “cabezas de flama”, se fabrican para una aplicación específica, dependiendo de la forma de la pieza a temprar y el método de temple por flama a utilizar no existiendo así cabezas de flama universales. Tanto el acetileno como el MAPP son de alguna manera reactivos con las aleaciones a base de cobre que tienen más del 67%, este es un problema con sistemas de tubería pero no con quemadores o boquillas [ASM, (1996)].

(Márquez, 1985) clasifica los quemadores basándose en el modo de alimentación del combustible y del comburente existiendo dos tipos básicos:

- a) Quemadores de premezcla
- b) Quemadores de mezcla en boca de salida de alta y baja presión.

Quemadores de premezcla En este tipo de quemadores la mezcla comburente-combustible se lleva a cabo antes del puerto donde se realiza la combustión por lo que a la



cantidad de aire mezclada se le llama aire primario. A su vez, este tipo de quemadores puede clasificarse en dos tipos diferentes los cuales se enuncia a continuación:

- a) Quemadores atmosféricos
- b) Quemadores oxi-gas

Quemadores atmosféricos En ellos el gas combustible induce el aire atmosférico en el tubo de mezcla, en cuyo extremo se forma la llama. No se requiere de ventilador de aire ni órganos mecánicos que regulen el caudal en función del caudal de gas (Márquez, 1985).

Cuando en un quemador atmosférico se hace variar la presión del gas, varía el caudal de éste, pero el caudal de aire aspirado no varía proporcionalmente de la misma manera. Estos quemadores se usan, principalmente, en los aparatos domésticos de gas y tiene aplicaciones industriales limitadas (Márquez, 1985). Estos quemadores en algunos diseños incorporan material refractario y generalmente son de tipo radiante y convectivos de alta velocidad.

Quemadores de tipo radiante Es esencialmente una copa de material refractario protegida de una cubierta de metal. La premezcla aire-gas es suministrada a través de tuberías pasando por orificios calibrados localizados en el fondo de la copa como se presenta en la figura 1.25

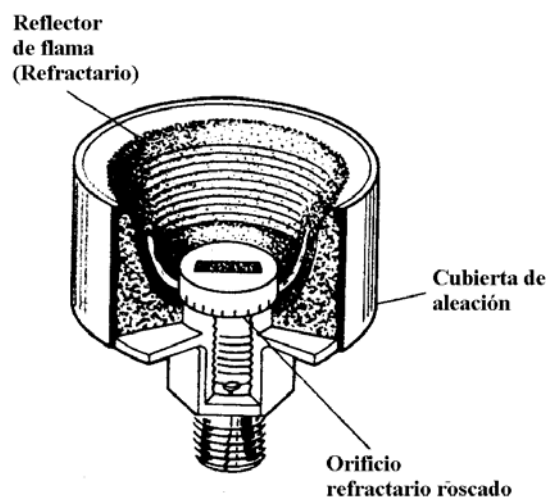


Figura 1.25 Quemador típico de aire-gas del tipo radiante [ASM, (1996)]



El quemador posee numerosas ranuras moldeadas en su periferia para que el orificio refractario funcione como un quemador multipuertos. La flama en la superficie interior se vuelve altamente incandescente para transferir rápidamente el calor por radiación.

El quemador radiante estándar usado en el temple por flama mide aproximadamente 75 mm (3 pulg) de diámetro de copa y es particularmente efectivo para endurecimiento rotatorio de grandes dientes de engranes [ASM, (1996)].

Quemadores aire-gas de tipo convectivo de alta velocidad Éste es básicamente un horno refractario en miniatura en donde la premezcla aire-gas es suministrada a través de orificios en una placa cerámica como se presenta en la figura 1.26, en el cual el diseño del quemador es tal que los gases de combustión calientan la cámara revestida a la temperatura de flama teórica, aprovechándola.

Esto permite precalentar los gases reactivos y acelerar la combustión, de esta manera los gases de aproximadamente 1650 °C (3000 °F) son descargados a través de ranuras incrementando las velocidades por arriba de 760 m/s (2500 pie/s), estas altas velocidades de flama convectivas son bien adaptadas al calentamiento localizado de partes templadas por el método rotatorio [ASM, (1996)].

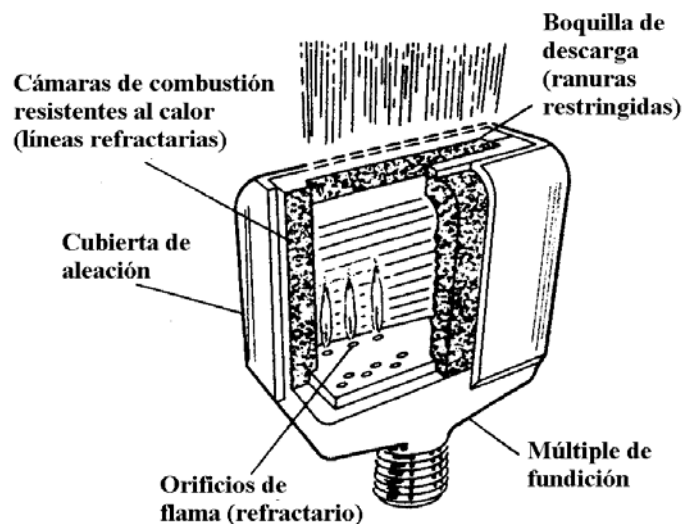


Figura 1.26 Quemador típico de aire-gas del tipo convectivo de alta velocidad [ASM, (1996)].



Quemadores oxi-gas Este tipo de quemadores se utilizan cuando se desean temperaturas elevadas a las cuales los materiales refractarios y metales pueden soportar. Así, muchas aplicaciones de temple por flama suelen ser desarrolladas con este tipo de quemadores debido a su rapidez de calentamiento de la superficie. Diversos tipos de quemadores oxi-gas se presentan en la figura 1.27. La boquilla o cabeza de flama de cara taladrada tienen un limitado intervalo de aplicaciones y son usualmente diseñadas para satisfacer los requerimientos de una pieza específica a ser endurecida y el calor brindado por ésta es determinado por el número y tamaño de los orificios al mantener constante otros factores y dichos orificios varían en tamaños desde el número 73 hasta el 51 (0.6 a 1.7 mm de diámetro).

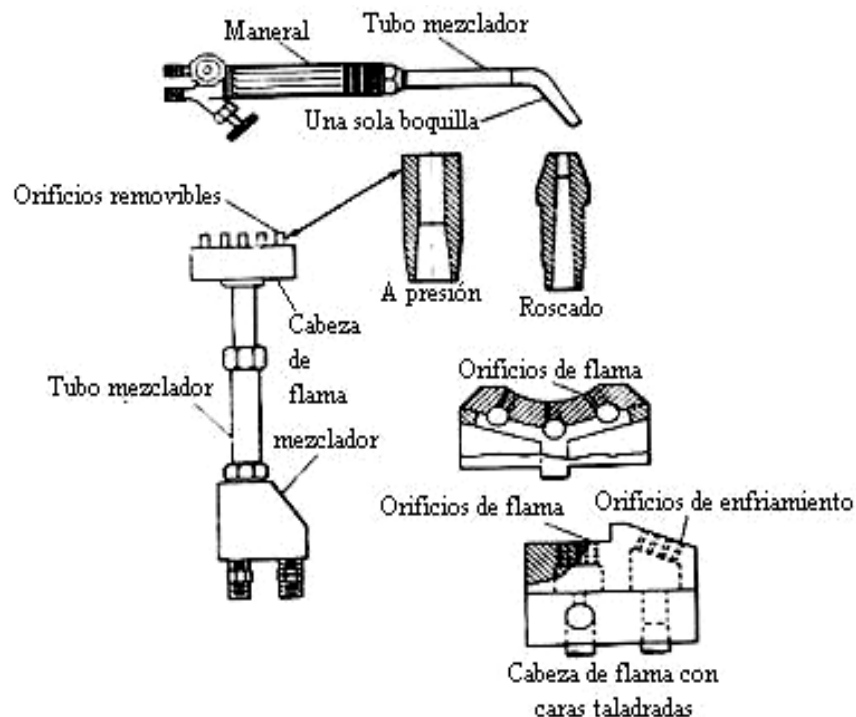


Figura 1.27 Boquillas para usar con mezclas oxígeno-combustible [ASM, (1996)]

Otra parte integral del sistema de los quemadores oxi-gas son las cámaras mezcladoras y el tubo mezclador, los cuales mezclan el gas combustible y el oxígeno y los conduce a través de los orificios los cuales se presentan en la figura 1.27.



Las boquillas utilizadas especialmente para temple por flama consisten básicamente de un tubo o caparazón con uno o más orificios taladrados en el mismo como se presenta en la figura 1.28.

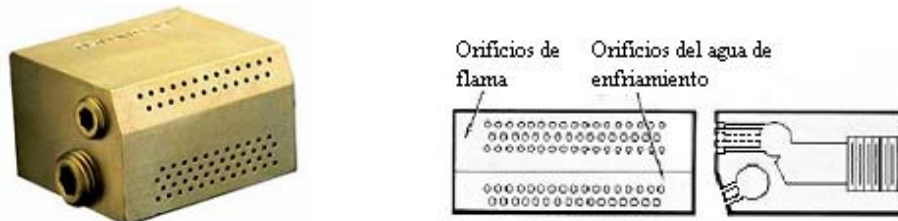


Figura 1.28 Configuración de una cabeza de flama [www.flametreatingsystems.com]

La cabeza de flama es diseñada para proveer cualquier calentamiento directo de sus partes, en general, un gran número de pequeños orificios producirá un patrón de calentamiento más uniforme que unos cuantos orificios grandes. Un espaciamiento entre orificios de 2.3 a 3.2 mm (0.09-0.125 pulg.) entre centros es aconsejable en la mayoría de casos [ASM, (1996)].

Una conicidad en los orificios de flama permite velocidades de flama más altas y es ventajoso o necesario cuando se usa propano o MAPP, ya que el acetileno posee una razón de propagación de flama más alta, la conicidad es usualmente innecesaria y frecuentemente indeseable. Dicha conicidad reduce la distancia de acoplamiento y permite que la flama sea estable a velocidades muy altas. Para una operación efectiva, la razón del área mayor al área de garganta debe ser del orden de 2:1 [ASM, (1996)].

1.4.2 MATERIALES DE LAS BOQUILLAS PARA TEMPLE POR FLAMA

Las boquillas para el calentamiento con oxígeno-combustible son, en casi todos los casos, hechas de cobre o de bronce sin plomo y, dado que la velocidad de flama es relativamente baja, existe poca probabilidad que el metal de la cabeza de flama se sobrecaliente y se deteriore como resultado del retorno de los gases calientes.

Bajo ninguna circunstancia debería permitirse que la cabeza de flama se sobrecaliente más que el metal por calentar ya que los orificios taladrados pueden ser dañados. La vida de



servicio de las cabezas de flama de oxígeno-combustible depende grandemente de las condiciones de la aplicación en particular, el calor resultante de la configuración de la pieza ha ser calentada y el grado de retroceso de la flama o gases calientes impregnados en el quemador. Cabezas de bronce utilizadas para el endurecimiento progresivo de guías de tornos han mostrado una vida promedio de 1000 a 2000 horas en servicio continuo [ASM, (1996)].

Un metal frecuentemente usado para cabezas de flama es el metal Muntz, el cual es una aleación de cobre-zinc (60 % Cu - 40 % Zn) el cual tiene alta resistencia y excelentes propiedades para trabajo en caliente. Cuando el enfriamiento es un problema es preferible utilizar cobre al igual que las boquillas enroscadas, como se presenta en la figura 26 las cuales son usualmente fabricadas del mismo material y cuando se requiere la más alta resistencia al calor se utiliza Monel K-500 [ASM, (1996)].

1.5 MECANISMO DE CONDUCCIÓN DE CALOR

La alimentación, la salud y la generación de potencia han sido problemas de preocupación vital para la humanidad a lo largo de toda su historia. El progreso realizado en estas áreas ha llevado al desarrollo concomitante de la transferencia de calor como ciencia.

Existen dos medios básicos de transferir calor empleando la materia como el medio de transferencia, uno de ellos consiste en pasar calor a través de la materia de manera continua, de una zona de temperatura elevada a una zona de temperatura baja, a este método se le conoce como conducción; el otro método consiste en transportar físicamente materia que esta a una temperatura elevada a una región con temperatura menor, a este método se le denomina convección. A continuación se realiza un estudio de la transferencia de calor por conducción, con el fin de preparar las bases necesarias para el modelaje matemático del comportamiento que se tiene en el temple por flama de ejes.



1.5.1 CONDUCCIÓN

El fenómeno de la transferencia de calor por conducción, es un proceso de propagación de energía en un medio sólido, mediante contacto atómico o molecular directo o entre cuerpos a diferente temperatura.

Al existir un gradiente de temperatura dentro del medio, la segunda ley de la termodinámica establece que la transferencia de calor se lleva a cabo desde la región de mayor temperatura hacia la de menor temperatura, siendo el flujo de calor proporcional al gradiente de temperatura; es decir,

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.2)$$

Ley de Fourier de conducción de calor

Debe hacerse notar que esta expresión define una conductividad térmica k , que aunque varía con la temperatura, en muchas aplicaciones puede suponerse constante.

La ecuación matemática en el caso de flujo de calor continuo, se obtiene de manera semejante a la deducción para la continuidad de una masa de flujo en movimiento. Se toma una superficie de referencia que contenga un volumen V siendo el incremento de energía interna en el volumen contenido por la superficie S :

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_V \rho c T dV \quad (1.3)$$

Si c es el calor específico del sólido. El balance del flujo de calor — diferencia entre el entrante y saliente — a través de la superficie S , será:

$$\oint_S q \cdot n \, dS = \oint_V \text{div } q \, dV \quad (1.4)$$

En donde q es el flujo de calor. Además, para la conservación de la energía se necesita que:



$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_V \rho c T dV + \oint_V \text{div } q dV = 0 \quad (1.5)$$

es decir:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div } q dV = 0 \quad (1.6)$$

Sustituyendo el valor de q, se tiene:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div} \left(-k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (1.7)$$

y si k es constante, queda:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \text{div} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \nabla^2 T \quad (1.9)$$

La ecuación (9) se conoce como ecuación de Fourier de conducción de calor. Al término $\frac{k}{\rho c}$ se le denomina difusividad térmica o conductividad de temperatura α .

El método matemático para determinar la conducción calorífica consiste en buscar soluciones de la ecuación de Fourier que satisfagan ciertas condiciones iniciales y de contorno. También se han deducido soluciones matemáticas para casos especiales de la ecuación de Fourier para conducción de calor, las cuales son:

$$\begin{array}{l} \text{Flujo de calor radial en un} \\ \text{cilindro} \end{array} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (1.10)$$

$$\begin{array}{l} \text{Flujo de calor radial en una} \\ \text{esfera} \end{array} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (1.11)$$

$$\begin{array}{l} \text{Flujo de calor} \\ \text{bidimensional, en una placa} \end{array} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (1.12)$$



$$\begin{array}{l} \text{Flujos de calor radial y axial} \\ \text{en un cilindro} \end{array} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (1.13)$$

$$\begin{array}{l} \text{Flujo de calor tridimensional} \\ \text{en una placa} \end{array} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (1.14)$$

Obsérvese que todo lo expuesto se refiere a fluidos en régimen permanente; es decir, cuando la conducción de calor para una distribución dada de temperatura, no varía con el tiempo.

Flujo de calor radial en un cilindro, en régimen permanente En el caso de flujo de calor radial, en régimen permanente por el interior de un cilindro largo, la ecuación de conducción adquiere la forma:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (1.15)$$

Integrando esta ecuación se obtiene el siguiente resultado:

$$r \frac{dT}{dr} = \text{const} \quad (1.16)$$

Que es sencillamente la condición de que la cantidad de calor por unidad de longitud, en la dirección del radio, es constante, esto es:

$$Q = -2\pi r k \frac{dT}{dr} \quad (1.17)$$

Integrando la ecuación 16, y estableciendo como condiciones en los límites, $T = T_1$ para $r = r_1$, y $T = T_2$ para $r = r_2$ se obtendrá para la distribución de la temperatura:

$$(T_1 - T) = (T_1 - T_2) \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1.18)$$



Y el flujo de calor q estará dado por:

$$q = -k \frac{dT}{dr} = \frac{k}{r} \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1.19)$$

Y la cantidad total de calor Q por unidad de longitud es:

$$Q = 2\pi r q = \frac{2\pi k (T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1.20)$$

1.5.2 CONDUCCIÓN DE CALOR TRANSITORIO

En la discusión de conducción de calor, se han manejado, hasta aquí, situaciones en que la temperatura varía únicamente con respecto a las coordenadas en el espacio. Sin embargo en el temple por flama de una barra de acero la temperatura puede variar con el tiempo. De hecho, siempre que se cambian las temperaturas impuestas en la frontera, ocurre una situación de estado no estacionario, siendo la temperatura función del tiempo, así como la posición de la llama o separación entre la boquilla y la pieza a temprar. El período durante el cual varía la temperatura como función del tiempo, se conoce como el período transitorio.

Sistemas Transitorios Bi y Tridimensionales. En muchos problemas prácticos se incluye flujo de calor bi y tridimensional. Con mucha frecuencia se obtiene la solución de estos problemas en forma de producto, en el cual, los factores separados en el producto son sencillamente funciones de x y τ , y y τ , z y τ , ó r y τ .

Al considerar las diferentes formas de cuerpos presentados en la figura 1.29, cuyas temperaturas iniciales son constantes a través de los cuerpos y para los cuales, en el tiempo igual a cero, su límite esta expuesto a transferencia de calor por convección, se puede expresar la distribución de temperatura en el cuerpo como un producto de varias soluciones unidimensionales. Específicamente, al considerar un cilindro cuya altura es igual a $2L$, y un

cilindro largo cuyo radio es r_0 ; se puede tener el coeficiente convectivo de transferencia de calor, h_o , en la cara cilíndrica del cuerpo diferente del coeficiente convectivo de transferencia de calor, h_p , en la parte superior y en el fondo del cilindro. No obstante, en este caso T_∞ debe ser el mismo en todas y cada una de las superficies del cuerpo. La distribución de temperatura en este cuerpo esta dada por:

$$\frac{T(r, x, \tau) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = P_{(x, \tau)} C_{(r, \tau)} \quad (1.21)$$

En cuya expresión:

$P(x, \tau)$, representa una solución transitoria para una gran pared plana con espesor $2L$, y en donde h_p , es el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

$C(r, \tau)$, representa una solución transitoria para un cilindro largo con radio r_0 , teniendo a h_o , como coeficiente convectivo de transferencia de calor.

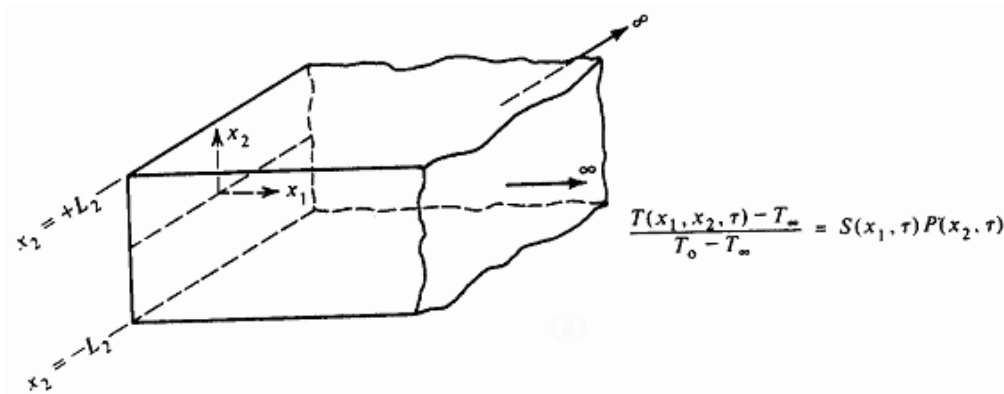


Figura 1.29a. Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en una placa semiinfinita. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 , y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_∞ (Mills, 1994).

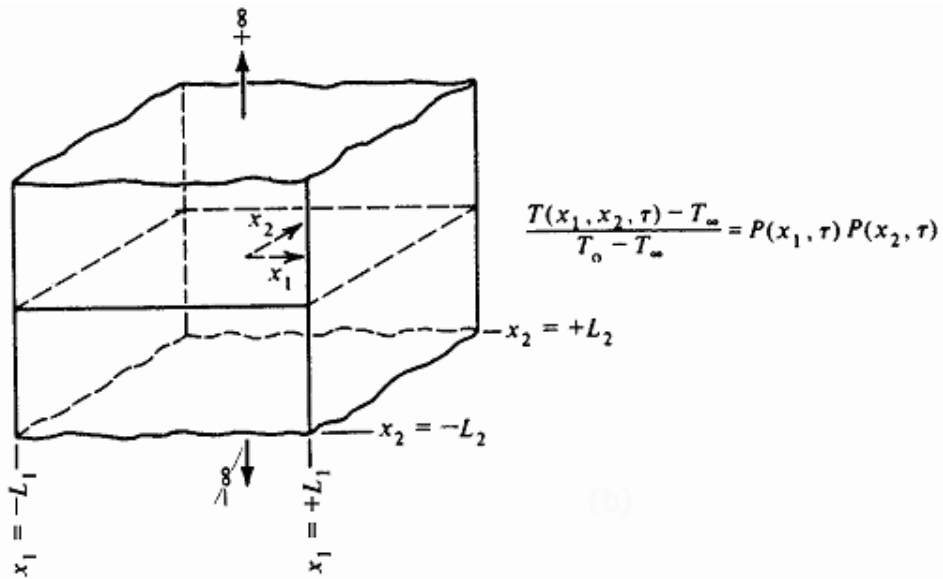


Figura 1.29b. Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en una barra rectangular infinita. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 , y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_∞ (Mills, 1994).

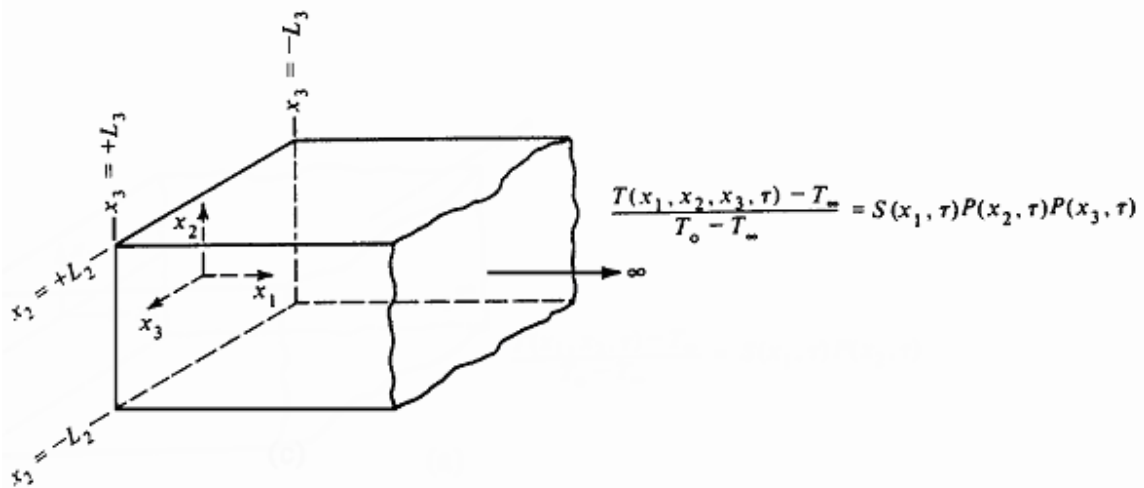


Figura 1.29c. Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en una barra rectangular semiinfinita. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 , y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_∞ (Mills, 1994).

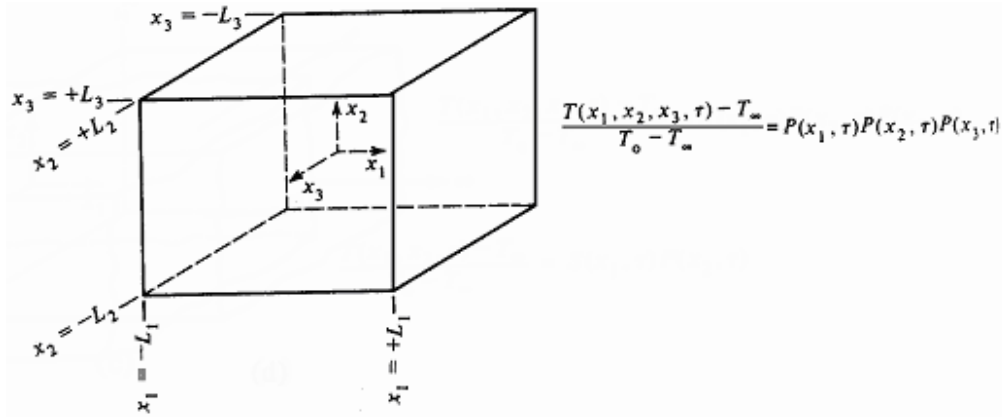


Figura 1.29d. Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en un paralelepípedo rectangular. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_∞ (Mills, 1994).

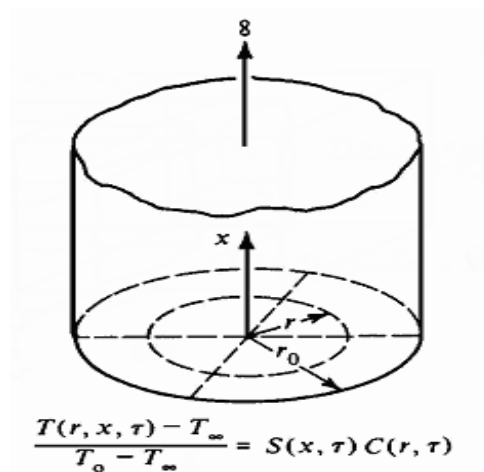


Figura 1.29e. Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en un cilindro semiinfinito. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_∞ (Mills, 1994).

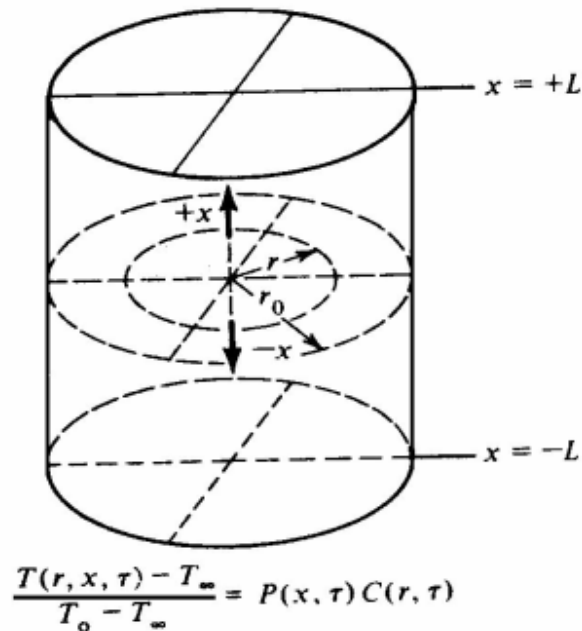


Figura 1.29f. Soluciones en forma de producto para temperaturas en sistemas multidimensionales en un cilindro corto. El cuerpo se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme igual a T_0 y se coloca instantáneamente en un medio ambiente convectivo cuya temperatura es T_{∞} (Mills, 1994).

1.5.2 SISTEMAS RADIALES CON CONVECCIÓN

Para un cilindro infinito de radio r_0 , que está a una temperatura inicial uniforme y experimenta un cambio en las condiciones de convención, es posible una solución en serie exacta para la dependencia con respecto al tiempo de la distribución radial de temperaturas, y se aprovecha la aproximación de un término para la mayoría de las condiciones. El cilindro infinito es la idealización que permite la suposición de conducción unidimensional en la dirección radial. Esta es una aproximación razonable para un cilindro con una relación

$$\frac{L}{r_0} \geq 10.$$



Solución exacta para un cilindro infinito Se han desarrollado soluciones exactas para la forma unidimensional transitoria de la ecuación de calor para el cilindro infinito. En cuanto a una temperatura inicial uniforme y condiciones de frontera convectivas, la solución es:

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\zeta_n^2 F_0) J_0(\zeta_n r^*) \quad (1.22)$$

donde:

$$F_0 = \frac{\alpha t}{r_0^2}$$

$$C_n = \frac{2}{\zeta_n} \frac{J_1(\zeta_n)}{J_0^2(\zeta_n) + J_1^2(\zeta_n)}$$

y los valores característicos de ζ_n son las raíces positivas de la ecuación trascendental:

$$Bi = \zeta_n \frac{J_1(\zeta_n)}{J_0(\zeta_n)}$$

Las cantidades J_1 y J_0 son funciones de Bessel de primera clase.

Solución aproximada Para un cilindro infinito las solución en serie anteriormente expuesta se aproxima nuevamente mediante un sólo término para $F_0 > 0.2$, la dependencia respecto al tiempo de la temperatura en cualquier lugar dentro del sistema radial es la misma que la línea central o el punto central.

La aproximación a un término de la ecuación 1.21 es:

$$\theta^* = C_1 \exp(-\zeta_1^2 F_0) J_0(\zeta_1 r^*) \quad (1.23)$$

ó:

$$\theta^* = \theta_0^* J_0(\zeta_1 r^*) \quad (1.24)$$



Los valores de los coeficientes C_1 y ζ_1 ya se han determinado para un intervalo de números de Biot.

1.5.3 MÉTODOS NUMÉRICOS EN CONDUCCIÓN DE CALOR

Entre los métodos numéricos más comunes se encuentran el método de elementos finitos, método de diferencias finitas y el método de elementos de contorno. El método de diferencias finitas fue el primer método numérico que se usó extensamente para la conducción de calor, y conserva su popularidad, no porque sea superior a otros métodos para la conducción del calor, sino porque es más fácil en problemas de convección.

Método de diferencias finitas El primer paso para obtener una solución por este método consiste en separar las coordenadas espacial y temporal para formar una red de nodos para luego hacer aproximaciones de diferencias finitas a las derivadas que aparecen en la ecuación de conducción para transformar esta ecuación diferencial en una ecuación algebraica de diferencias. Otra alternativa consiste en construir la ecuación de diferencias aplicando el principio de conservación de la energía directamente a un elemento de volumen alrededor del nodo de la red. En problemas de régimen estacionario se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas lineales con tantas incógnitas como nodos tienen la red.

Estas ecuaciones se pueden resolver por inversión de matrices o por iteración. Para la conducción transitoria, las temperaturas en el instante actual se pueden obtener directamente utilizando valores de las temperaturas en el instante anterior. Ciertas formulaciones requieren iteraciones puesto que también intervienen los valores de la temperatura en el instante que se esté considerando.

Método de elementos finitos Es muy utilizado en mecánica de estructuras y también se puede aplicar a problemas de conducción de calor. El objeto en consideración debe dividirse antes en regiones espaciales discretas, llamadas elementos finitos. La forma más común para un elemento bidimensional es el triángulo, y para uno tridimensional es el tetraedro. El método de elementos finitos permite que la ecuación de conducción de calor



se verifique sobre el elemento finito en un sentido promedio; así, los elementos pueden ser mucho más grandes que los volúmenes de control de los métodos de diferencias finitas. El uso de triángulos y tetraedros permite aproximar objetos de formas completas e irregulares. Este método genera un sistema de ecuaciones algebraicas que se pueden resolver por inversión de matrices o por iteración.

Método de elementos de contorno Este método es el más reciente. El contorno del objeto se divide en elementos finitos y no es necesario considerar en absoluto su interior. Aunque este método resulta atractivo cuando se trata de resolver problemas fáciles de conducción de calor, aun no se ha establecido su versatilidad ni su generalidad.

1.6 MATERIALES PARA TEMPLE POR FLAMA

El uso de temple por flama está limitado cuando se endurecerán aceros (forjados o fundidos) y aceros aleados. El máximo endurecimiento no es el único criterio usado en la selección del temple por flama como un tratamiento térmico sino más bien la selección del acero apropiado para el tratamiento térmico. Debe procurarse utilizar aceros al carbono ordinarios en lugar de otros aceros cuyas características de profundidad-endurecimiento incurren en altos esfuerzos internos, teniendo en cuenta que el contenido de carbono es el factor más importante para determinar el nivel de endurecimiento que puede ser alcanzado.

Para mejores resultados, los aceros a ser endurecidos por flama deberán ser rolados, normalizados (particularmente desde una alta temperatura), enfriados por aire forzado o templados.

En la selección del tipo de acero a ser templado por flama es importante asegurarse que el área a ser endurecida se encuentre libre de descarburación. Dependiendo del tamaño de grano, porcentaje de carbono del acero, producción y muchos otros factores, la profundidad de la descarburación para barras roladas puede variar desde 0 hasta 3.2 mm (0.12 plg).



1.6.1 ACEROS AL CARBONO

Aceros al carbono en el intervalo de 0.37 a 0.55% C son los más ampliamente usados para aplicaciones de endurecimiento por flama. Estos pueden ser endurecidos a través de secciones mayores a 13 mm ($\frac{1}{2}$ pulg.). Esta respuesta al endurecimiento permite el uso de estos aceros para endurecer pequeños engranes, ejes y otras partes de pequeñas secciones transversales en las cuales son necesarias propiedades uniformes en toda la sección. Estos mismos aceros pueden ser usados para partes más grandes en las cuales se necesite endurecimiento poco profundo, desde 0.8 a 6.4 mm ($\frac{1}{32}$ a $\frac{1}{4}$ pulg.) [ASM, (1996)]. Los aceros AISI 1042 y AISI 1045 son recomendados para todas las aplicaciones de endurecimiento por flama, aunque éstos se excluyen cuando son incapaces de:

- a. Endurecerse con un medio de enfriamiento dado requiriendo el uso de aceros aleados de mayor endurecimiento.
- b. Proporcionar la profundidad de endurecimiento requerida, siendo inadecuados en secciones grandes y pesadas las cuales se endurecen progresivamente. Entonces, mayor endurecimiento puede ser necesario con más alta cantidad de carbono [ASM, (1996)].

El mismo nivel práctico de endurecimiento de la superficie alcanzable con agua como medio de enfriamiento para varios contenidos de carbono se presenta en la figura 29. Esta figura es aplicable también para aceros aleados, excepto para aquellos que contienen formadores de carburo tales como cromo y vanadio.

1.6.2 ACEROS ALEADOS

El uso de aceros aleados para aplicaciones de endurecimiento por flama es justificado solamente cuando:

- a. Se requiera alta resistencia en el núcleo por medio de tratamiento térmico antes del endurecimiento por flama.
- b. Los aceros al carbono sean inadecuados para alcanzar estos valores de resistencia mecánica en los tamaños de secciones a utilizar.



- c. La masa y forma de la pieza restringen las distorsiones provocadas por el enfriamiento causando roturas usando aceros al carbono enfriados en agua.

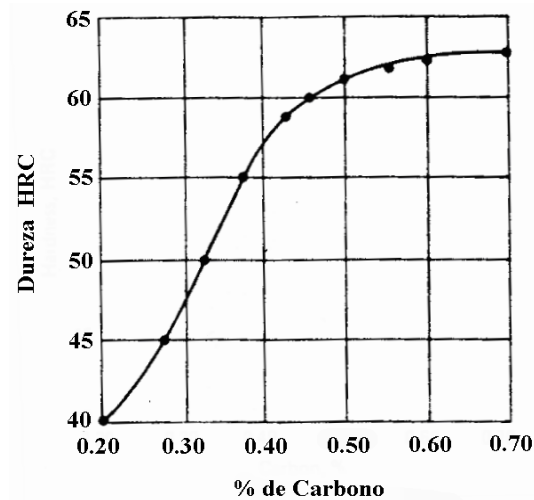


Figura 1.30. Relación entre el contenido de carbono y la dureza mínima obtenida por calentamiento por flama o inducción y enfriamiento por agua. El contenido práctico mínimo de carbono puede ser determinado por esta curva [ASM, (1996)].

Aunque los aceros aleados no se templen generalmente a la flama, las aleaciones que han resultado adecuadas para este tratamiento térmico se presentan en la tabla 1.3.



Tabla 1.3. Respuesta de aceros y fundiciones al temple por flama
(Fuente: ASM Handbook, vol.2, 1996)

Material	Dureza típica HRC y efecto del medio de enfriamiento		
	Aire(a)	Aceite(b)	Agua(b)
Aceros al carbono			
1025-1035	33-50
1040-1050	...	52-58	55-60
1055-1075	50-60	58-62	60-63
1080-1095	55-62	58-62	62-65
1125-1137	45-55
1138-1144	45-55	52-57(c)	55-62
1146-1151	50-55	55-60	58-64
Grados carburizados de aceros al carbono simples(d)			
1010-1020	50-60	58-62	62-65
1108-1120	50-60	60-63	62-65
Aceros aleados			
1340-1345	45-55	52-57(c)	55-62
3140-3145	50-60	55-60	60-64
3350	55-60	58-62	63-65
4063	55-60	61-63	63-65
4130-4135	...	50-55	55-60
4140-4145	52-56	52-56	55-60
4147-4150	58-62	58-62	62-65
4337-4340	53-57	53-57	60-63
4347	56-60	56-60	62-65
4640	52-56	52-56	60-63
52100	55-60	55-60	62-64
6150	...	52-60	55-60
8630-8640	48-53	52-57	58-62
8642-8660	55-63	55-63	62-64
Grados carburizados de aceros aleados(d)			
3310	55-60	58-62	63-65
4615-4620	58-62	62-65	64-66
8615-8620	...	58-62	62-65
Aceros inoxidables martensíticos			
410, 416	41-44	41-44	...
414, 431	42-47	42-47	...
420	49-56	49-56	...
440 (typical)	55-59	55-59	...
Hierros fundidos (Clase ASTM)			
Class 30	...	43-48	43-48
Class 40	...	48-52	48-52
Class 45010	...	35-43	35-45
50007, 53004, 60003	...	52-56	55-60
Class 80002	52-56	56-59	56-61
Class 60-45-15	35-45
Class 80-60-03	...	52-56	55-60

(a) Para obtener los resultados de dureza indicados, las zonas que no se calientan directamente deben mantenerse relativamente frías durante el proceso de calentamiento.

(b) Las secciones delgadas son susceptibles de agrietamiento cuando se enfrían rápidamente con aceite o agua.

(c) La dureza es ligeramente más baja para el material calentado por rotación y por el método progresivo-rotatorio que para el material calentado por los métodos progresivo o estacionario.

(d) Valores de dureza de películas superficiales carburizadas con contenido de 0.90 a 1.10 % C.



1.6.3 FUNDICIONES

El endurecimiento por flama es uno de los métodos más comunes aplicados al hierro gris; después de este tratamiento térmico, el material consta de una dura y resistente superficie con una determinada cantidad de martensita y un núcleo con hierro gris suave, el cual, durante el calentamiento no alcanza la temperatura de transformación eutectoide.

Uno de los aspectos más importantes es el contenido de carbono combinado, la ASM recomienda un intervalo entre 0.50 % a 0.70 % en peso de C, aunque aceros con tan pequeños contenidos como 0.40 % de carbono combinado pueden también ser endurecidos; por otra parte, el temple por flama no es recomendado para hierros que contienen más de 0.80% de carbono combinado porque pueden sufrir roturas en la superficie durante el proceso de temple.

Fundiciones que tienen menos del 0.35% de carbono combinado no responden prontamente al endurecimiento por flama debido a la inhabilidad de disolver grafito en austenita durante el calentamiento rápido. Fundiciones sin ferrita libre en su microestructura responden casi instantáneamente al temple por flama y requieren muy poco tiempo de calentamiento a la temperatura de austenización para ser totalmente endurecidos [ASM, (1996)].

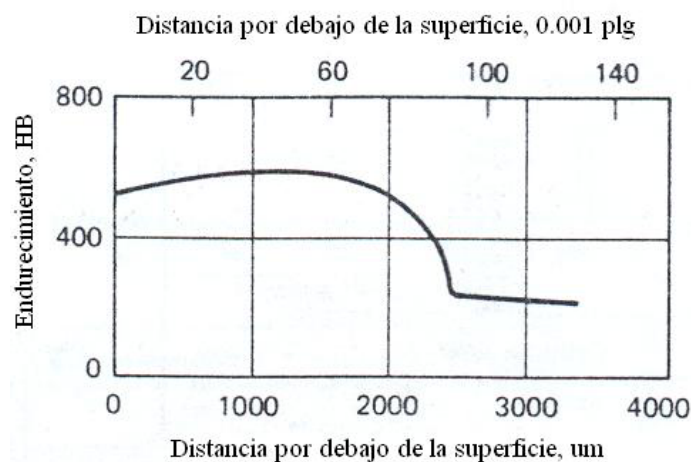


Figura 1.31. Gradiente de endurecimiento por flama típico producido en hierro gris [ASM, (1996)].



Las fundiciones que tienen más de 0.80% de carbono combinado son dificultosas de endurecer por flama debido a su inherente fragilidad y susceptibilidad a las roturas cuando se calientan y enfrían rápidamente. La superficie endurecida de una aleación de hierro gris típica tiene un valor de dureza más bajo en su superficie que inmediatamente debajo de ella como se presenta en la figura 30, esta disminución en la dureza puede ser causada por la retención de austenita en la superficie. Superficies endurecidas a menudo pueden ser obtenidas calentando la parte en un intervalo de 195 a 250 °C (380 a 480 °F) [ASM, (1996)].

La profundidad y la microestructura de la capa endurecida depende de dos factores en adición a la temperatura: la cantidad de elementos de aleación y la eficiencia del enfriamiento, si existiesen partes blandas, éstas son debidas a la presencia de austenita en la micro estructura, manteniendo la parte a -40 °C (-40 °F) por una hora se transformará la austenita y se incrementará la dureza (ASM 1996).

CAPITULO II



2. DISEÑO DEL DISPOSITIVO

El proceso de endurecimiento superficial por flama utilizando el método progresivo-rotatorio, exige que tanto la boquilla como la barra que se temple realicen movimientos longitudinal y de giro respectivamente. En este capítulo se presenta el diseño de los elementos que se utilizan para llevar a cabo el proceso de endurecimiento, diseñando y dimensionando la boquilla para que caliente y enfríe el espécimen simultáneamente, se diseñan también los contrapuntos que sujetarán axialmente la barra que se endurecerá y se seleccionarán los elementos necesarios para hacer girar el espécimen de prueba. Todos los elementos diseñados estarán detallados en su respectivo plano los cuales se encuentran al final del presente documento.

2.1 DISEÑO DE UNA BOQUILLA PARA TEMPLE POR FLAMA

Es importante antes de iniciar el diseño de la boquilla para el temple por flama, conocer que tipos de quemadores se tienen utilizando propano, como gas combustible, por lo en este capítulo se inicia el diseño y configuración de la boquilla, se continua con la determinación del consumo de combustible para luego determinar el número de orificios de flama necesarios en la boquilla.

2.1.1 QUEMADORES A PROPANO

Los quemadores son los dispositivos que permiten realizar la reacción de combustión entre el combustible y el comburente de manera controlada y regulable, asegurando la aportación adecuada de ambos para conseguir la potencia calorífica especificada y distribuyendo la zona de reacción y la circulación de los productos de combustión de modo que se transfiera a la carga todo el calor producido de manera más eficiente clasificándolos en quemadores a gas, a combustibles líquidos y a combustibles sólidos.



Para especificar el equipo de combustión se han de aplicar criterios de selección de carácter general relativos al quemador, teniendo en cuenta la aplicación, es por ello que para la selección del quemador se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

Tabla 2.1 Tipos de quemadores a gas

Definición	Forma de Mezclado	Método de control	Esquema
1. Alimentación aire –gas separadas.	No existe mezclado. Ambos llegan a la presión atmosférica.	Manual: dos válvulas. Automático: presiones equilibradas, y acoplamiento mecánico.	
2. Mezcla en boca.	En el punto de combustión ambos llegan a presión.	Como en 1.	
3. Premezcla parcial (requiere aire secundario).	Eyector de gas y aire atmosférico. Eyector de aire y gas a presión atmosférica. Mezclado mecánico (ambos a presión atmosférica).	Manual o automático.	
4. Premezcla total por inducción.	Eyector de gas y aire atmosférico. Eyector de aire y gas a presión cero.	Manual (variable) o automático (fijado).	
5. Premezcla total con mezclador mecánico.	Soplantes, compresor, bombas ambos fluidos presión cero.	Ajustable o fijo. Manual o automático.	
6. Combinación de los tipos 1 y 5.	En función de cada caso.		



- a) Temperatura a alcanzar. Lo que implica tener conocimiento sobre las tasas de aireación, reciclado, precalentamiento y oxigenación.
- b) Naturaleza de los productos de combustión. Conocimiento de las concentraciones de NO_x .
- c) Flexibilidad de funcionamiento, que no es más la relación de potencia máxima y mínima a regulación nominal.
- d) Flexibilidad de regulación. Relación de las tasas de aireación extremas entre las que el quemador funciona correctamente.
- e) Ruido.

Al referirse sobre los quemadores a gas, estos se pueden clasificar basándose en el modo de alimentación del gas y del aire, tal como presenta en la tabla 2.1.

Luego de conocer algunas de las características principales de los quemadores, se diseña un quemador de premezcla tipo oxi-gas, en el cual el gas induce el oxígeno en el tubo de mezcla, en cuyo extremo se forma la llama. No requiere, pues, ventilador ni órganos mecánicos que regulen el caudal de oxígeno en función del caudal de gas ya que el flujo se tendrá por las presiones de envasado de ambos combustible y comburente.

Para el diseño debe considerarse lo siguiente:

- a) Temperatura teórica de llama: $2635\text{ }^\circ\text{C}$
- b) Velocidad de avance del torno: $0.5 \leq \mathcal{G}_{avance} \leq 4\text{ mm/rev}$
- c) Ancho de banda de calentamiento: 35 mm
- d) Diámetro de barra: $12.7 \leq D_0 \leq 127\text{ mm}$

2.1.2 DISEÑO DEL QUEMADOR

Reacción de combustión y cálculos estequiométricos La reacción de combustión del propano viene dada por la ecuación:



La cual indica que:



- a) $1\text{ m}^3_{(n)}$ de C_3H_8 , requiere para la combustión $5\text{ m}^3_{(n)}$ de O_2 produciendo $3\text{ m}^3_{(n)}$ de CO_2 y $4\text{ m}^3_{(n)}$ de $\text{H}_2\text{O}_{(\text{gas})}$
- b) La combustión de 1 kg de C_3H_8 , requiere el consumo de 3.64 kg de O_2 , produciendo 3 kg de CO_2 y 1.64 kg de $\text{H}_2\text{O}_{(\text{gas})}$

La reacción de combustión anterior, permite así obtener la cantidad de oxígeno estrictamente necesario para la combustión de la unidad de combustible, y por eso se designa como oxígeno mínimo (O_{min}).

Como la proporción de oxígeno en el aire es del 21% en volumen; el volumen del aire mínimo se obtiene multiplicando el oxígeno mínimo por 4.76.

$$A_{\text{min}} = 4.76 O_{\text{min}} \quad (2.2)$$

$$A_{\text{min}} = 23.8\text{ m}^3_{(n)}$$

Calor necesario para calentar la barra El calor necesario para calentar la barra hasta la temperatura de austenización está dado por la siguiente expresión:

$$q = q_c + q_r \quad (2.3)$$

Simplificando la expresión anterior se tiene:

$$q = \frac{T_{\text{gases}} - T_{\text{sup}}}{R} \quad (2.4)$$

De donde:

$$R = \frac{1}{(h_r + h_c)A} \quad (2.4)$$

Donde:

T_{gases} = Temperatura de los productos de combustión del propano y oxígeno.

T_{sup} = Temperatura de austenización del acero.

$(h_r + h_c)$ = Coeficiente de transferencia de calor combinado en el calentamiento.



El coeficiente de calor combinado se tomará de $200 \text{ W/m}^2\text{K}$ ya que se trata de superficies expuestas a los gases de combustión.

Asumiendo un diámetro de la barra que se templará de 5 pulg. y que el quemador se mantiene fijo, el área de calentamiento está dada por:

$$A_{cal} = r \times \theta \times l \quad (2.5)$$

Donde l es el largo de la banda de calentamiento del quemador, por lo tanto el área a calentar es:

$$A_{cal} = 0.0635 \times 2 \times \pi \times 0.3$$

$$A_{cal} = 0.12 \text{ m}^2$$

Si la temperatura teórica de la flama de propano y oxígeno es de $2635 \text{ }^\circ\text{C}$, el calor necesario para calentar el área hasta $850 \text{ }^\circ\text{C}$ es:

$$\frac{q}{A} = \frac{(2635 - 850)K}{\frac{1}{200}}$$

$$\frac{q}{A} = 357000 \frac{W}{m^2}$$

$$q = 357000 \times 0.12$$

$$q = 42.8 \text{ kW}$$

Si tomamos una eficiencia del quemador del 30%, el calor que deberá proporcionarnos será:

$$q = \frac{42.8 \text{ kW}}{0.30}$$

$$q = 142.7 \text{ kW}$$

Si la velocidad de avance del torno se toma como la mayor, de 4 mm/rev , el tiempo necesario para calentar un punto en la barra es:

$$t = \frac{x}{g_{avance}}$$



Si x es el ancho de la banda de calentamiento la cual se asume de 35 mm y la velocidad de avance de la boquilla esta dada por la ecuación

$$\mathcal{G}_{avance} = n_{torno} \times rps$$
$$\mathcal{G}_{avance} = 4 \frac{mm}{rev} \times 1 \frac{rev}{s} \cong 4 \text{ mm/s}$$

El tiempo en que la boquilla recorre los 35 mm es:

$$t = \frac{35}{4}$$
$$t = 8.75 \text{ s}$$

El calor que el quemador deberá transferir en un punto de la barra para poder elevar su temperatura hasta la temperatura de autenización es:

$$Q = \frac{142.7 \text{ kJ/s}}{8.75 \text{ s}}$$
$$Q = 16.30 \text{ kJ}$$

La presión de trabajo que se utilizará para el propano será de 100 mbar, y la de oxígeno de 50 mbar.

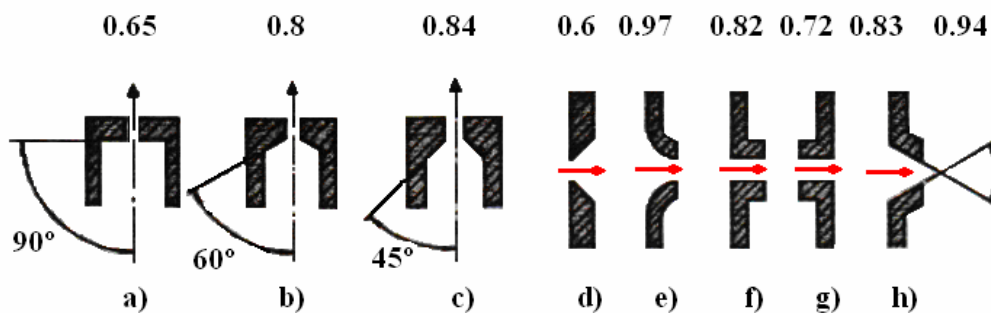


Figura 2.2. Valores de coeficientes de descarga ϕ de distintas formas de orificios.

Las herramientas con que se cuenta para la fabricación de los orificios del quemador se limitan a un tipo de orificio como el que se presenta en la figura 2.2a. Por lo que el coeficiente de descarga es $\phi = 0.65$. De la figura 2.3, se lee una potencia unitaria de 9.3



kW/mm^2 para el propano trabajando a esa presión y considerando el coeficiente de descarga anterior se tiene una potencia unitaria real de:

$$P_{real} = 9.3 \times 0.65$$

$$P_{real} = 6.045 \frac{\text{kW}}{\text{mm}^2}$$

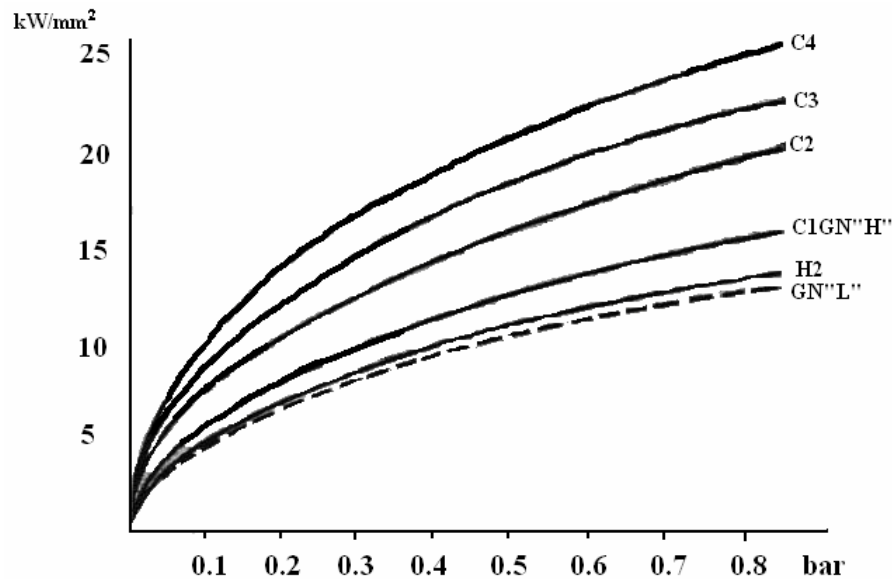


Figura 2.3. Valores de potencia unitaria en función de la presión efectiva en bares para los gases combustibles usuales. Se ha tomado como coeficiente de descarga $\phi=1$ y temperatura inicial del gas de 15°C .

La sección necesaria para calentar la barra es entonces:

$$S = \frac{85.43 \text{ kW}}{6.045 \frac{\text{kW}}{\text{mm}^2}}$$

$$S = 23.61 \text{ mm}^2$$

El diámetro de broca más pequeño que se puede utilizar en el taladro de la Unidad Productiva de la Escuela de Ingeniería Mecánica es de 0.80 mm (1/32 pulg) por lo que el número de orificios que se necesitarán es de:



$$N_{\text{orificios}} = \frac{23.61}{\pi \times 0.40^2}$$

$$N_{\text{orificios}} = 46.96$$

$$N_{\text{orificios}} = 47 \text{ orificios}$$

Los orificios estarán igualmente espaciados entre centros a 2.5 mm cada uno.

Consumo de combustible El consumo de propano puede determinarse tomando en cuenta que un galón de propano puede proporcionarnos 26.90 kW (91800 BTU/h) cuando es quemado, por lo que el consumo de gas en galones es:

$$V = \frac{26.90 \text{ kW}}{142.7 \text{ kW}} \text{ galones}$$

$$V = 5.3 \text{ galones}$$

Para templar una barra de 1/2" se necesitarán:

$$V = \frac{14.2 \text{ kW}}{26.90 \text{ kW}} \text{ galones}$$

$$V = 0.53 \text{ gal}$$

2.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE ACOPLAMIENTO AL TORNO

El sistema de acoplamiento al torno está compuesto por varios elementos de suma importancia que tienen como finalidad transmitir el movimiento de rotación a la pieza a templar o espécimen en estudio, el primero de estos elementos es el eje de acoplamiento al torno en donde se instalará la catarina de transmisión, seguidamente se presenta la selección de las catarinas y la cadena, la selección de la chumaceras en donde se instalara el eje de transmisión del movimiento de giro, el diseño del mismo y finalmente el diseño del contrapunto.



2.2.1 DISEÑO DEL EJE DE ACOPLAMIENTO AL TORNO

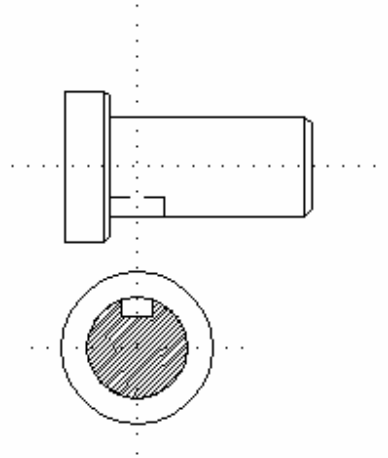


Figura 2.4. Eje de acople de la catarina de 40 dientes al mandril del torno.

El torque necesario para movilizar la carga viene dado por la ecuación:

$$T = I * \alpha \quad (2.6)$$

Siendo:

I, el momento de inercia del elemento.

α , la aceleración angular del elemento.

La inercia de la carga está dada únicamente por el espécimen a templar, el cual se sobredimensionará con el objetivo de poder templar a futuro especimenes de mayor diámetro y longitud.

Se asume las siguientes dimensiones del espécimen, diámetro de 127 mm y 300 mm de longitud, por lo que el momento de inercia para este es:

$$I = \frac{\gamma \pi r^4 b}{2g} \quad (2.7) \quad \text{donde } \gamma_{\text{acero}} = 76.5 \times 10^3 \frac{N}{m^3}$$

Sustituyendo γ_{acero} :

$$I = \frac{76.5 \times 10^3 (\pi) (0.0635)^4 (0.30)}{2(9.81)}$$



$$I = 5.98 \times 10^{-2} \text{ N.m.s}^2$$

Dado que el torno alcanza rápidamente la velocidad de trabajo, α es calculado para un tiempo de 1 segundo y una velocidad de 60 revoluciones por minuto, por lo que:

$$T = I * \alpha \quad (2.8)$$

$$T = 5.98 \times 10^{-2} \text{ N m s}^2 \left(\frac{6.283 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{1 \text{ s}} \right)$$

$$T = 0.38 \text{ N m}$$

La potencia necesaria para mover la carga es:

$$P = (0.38 \text{ N m}) \left(6.283 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

$$P = 2.39 \text{ W}$$

Se consideran pérdidas de potencia en los rodamientos del contrapunto, chumaceras de soporte del eje de transmisión, entonces se asume una potencia superior.

$$P = 3.0 \text{ W}$$

Debido a que se consideran aumentos en la carga, el diseño del eje se efectúa asumiendo una potencia de 186.42 W (0.25 HP), en tal sentido es necesario recalcular el valor del torque de la carga.

$$T = \frac{\text{Potencia}}{\omega} = \frac{186.42 \text{ W}}{6.283 \text{ rad/s}}$$

$$T = 29.67 \text{ N.m}$$

Por lo tanto, el valor de la fuerza generada en la cadena de transmisión es:

$$F = \frac{T}{r} = \frac{29.67 \text{ N.m}}{0.06 \text{ m}}$$

$$F = 494.5 \text{ N}$$



Para efectos de análisis, se asume empotramiento del eje, aunque realmente este es aprisionado por el plato de tres garras del torno, además, se desprecia el peso de la catarina y el peso del eje ya que estas fuerzas actúan en un plano diferente que la fuerza generada por la cadena.

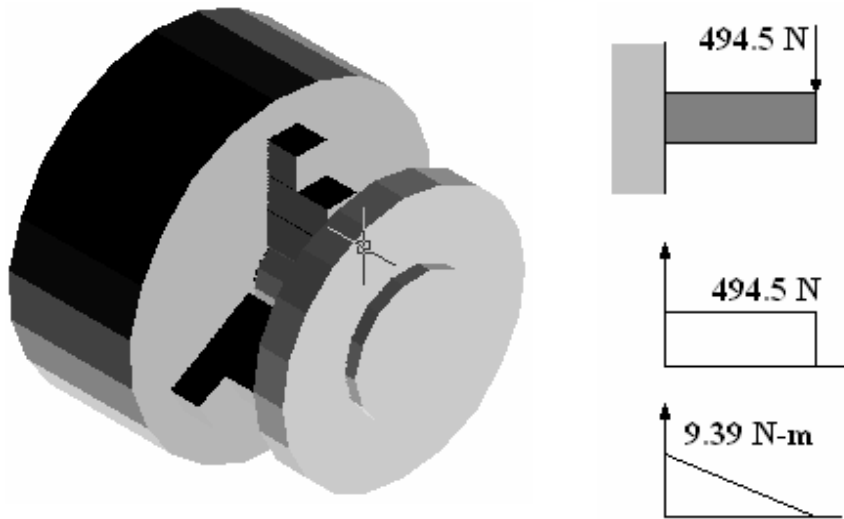


Figura 2.5. A la izquierda, el mandril del torno sujetando el eje de acople y la catarina de 40 dientes, a la derecha, las fuerzas involucradas en el eje de acople.

El momento en el punto de acople de la rueda dentada es cero (0), por lo que el esfuerzo alternante en este punto también es cero (0).

Para diseñar el eje se cuenta con una rueda dentada de 60 mm de diámetro y de 40 dientes. El diámetro del agujero para acoplar esta rueda a su eje es de 20 mm, por lo que se limita el diámetro del eje a esta dimensión. El cuñero a utilizar en el eje tiene una profundidad de 4 mm.

El punto de interés sobre el cual se definirá el material a utilizar para su fabricación es el punto de empotramiento del eje, es decir, en donde se sujeta con las mordazas del plato del torno.

Los esfuerzos alternantes son:



$$\sigma_a = \frac{32 M}{\pi d^3}$$

$$\sigma_a = 12.59 \text{ MPa}$$

Los esfuerzos medios son:

$$\tau_m = \frac{16 T}{\pi d^3}$$

$$\tau_m = 18.88 \text{ MPa}$$

Con los valores anteriormente encontrados se determinara el valor del esfuerzo último a la tensión del material del que puede fabricarse el eje aplicando la teoría de Goodman modificada.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\tau_m}{S_{ut}} = 1$$

En donde:

S_e , es la resistencia a la fatiga que viene dado por la ecuación:

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e S_{ut}$$

Siendo:

K_a , el factor de seguridad, asumiendo que la superficie de la pieza está maquinada, es:

$$K_a = 4.51 S_{ut}^{-0.265}$$

K_b , factor de tamaño, en los casos de flexión y torsión se tiene:



$$K_b = \left(\frac{d}{7.62} \right)^{-0.1133} = 0.896$$

K_c , factor de carga, para condiciones de flexión $K_c=1.0$

Tanto el factor por temperatura (K_d), y el factor por efectos diversos (K_e) se suponen igual a la unidad.

Por lo tanto:

$$S_e = (4.51 S_{ut}^{-0.265})(0.896) S_{ut}$$
$$S_e = 4.04 S_{ut}^{0.735}$$

Al introducir los valores a la ecuación de Goodman se tiene:

$$\frac{(12.59 \text{ MPa})}{4.04 S_{ut}^{0.735}} + \frac{(18.88 \text{ MPa})}{S_{ut}} = 1$$

Despejando el valor del esfuerzo último a la tracción se tiene:

$$S_{ut} = 709 \text{ MPa}$$

El acero al carbono que cumple con esta condición es el AISI K80, el cual posee un esfuerzo último a la tensión de 1010 MPa (147 kpsi); por lo que al evaluar este valor en la ecuación de Goodman, se obtiene el factor de seguridad.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\tau_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$
$$\frac{(12.59 \text{ MPa})}{4.04 (1010 \text{ MPa})^{0.735}} + \frac{(18.88 \text{ MPa})}{1010 \text{ MPa}} = \frac{1}{n}$$

El factor de seguridad encontrado es de: 1.3



2.2.2 SELECCIÓN DE CADENA PARA TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Los parámetros para la selección son los siguientes:

- Potencia a transmitir: $1 \text{ W} = 1.84 \times 10^{-3} \text{ HP}$
- Velocidad de giro en la rueda conductora: 50.0 rpm.
- Velocidad de giro en la rueda conducida: 60.6 rpm.
- Distancia entre centros: 700 mm = 27.55 pulg.
- Factor de servicio: 1.0

Al considerar posibles aumentos en la carga debe trabajarse con una potencia mayor, para este caso en particular se utilizará un valor de 0.25 HP.

La potencia de diseño se obtiene al multiplicar la potencia a demandar por el factor de servicio, obteniendo entonces:

$$\text{Potencia de diseño} = 0.25 \text{ HP}$$

Al seleccionar una cadena # ANSI 40, la capacidad de potencia para una rueda catarina de 17 dientes girando a 50 rpm es de 37 HP.

La potencia corregida se determina aplicando la siguiente ecuación:

$$H_r' = K_1 K_2 H_r \quad (2.9)$$

Donde:

H_r' , es la potencia nominal corregida

K_1 , es el factor de corrección por dientes; para una rueda impulsora con 40 dientes se tiene un factor de corrección de 2.15.

K_2 , es el factor por torones múltiples, siendo para 1 toron $K_2 = 1.0$

Entonces:

$$H_r^* = 79.55 \text{ HP}$$



La longitud de la cadena se determina aplicando la ecuación:

$$\frac{L}{p} = \frac{2C}{p} + \frac{N_1 + N_2}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2 \left(\frac{C}{p}\right)}$$

Donde:

L = longitud de la cadena

P = paso de la cadena

C = distancia entre centros

N₁ = número de dientes en la catarina menor

N₂ = número de dientes en la catarina mayor

$$\frac{L}{p} = \frac{2(27.55)}{0.5} + \frac{40 + 33}{2} + \frac{(40 - 33)^2}{4\pi^2 \left(\frac{27.55}{0.5}\right)}$$

$$L = 47.54 \text{ pasos}$$

El número par más próximo de pasos es 48.0 y este será el que se utilice.

Resumiendo la cadena a utilizar tiene las siguientes características:

- ♦ Cadena ANSI 40.
- ♦ Paso: 12.70 mm (0.5 pulg).
- ♦ Ancho: 7.94 mm (0.312 pulg).
- ♦ Resistencia mínima a la tensión: 13 920 N (3130 lb).
- ♦ Peso medio: 6.13 N/m (0.42 lb./pie).
- ♦ Diámetro de rodillo: 7.92 mm (0.312 pulg).
- ♦ Espaciamiento de torones: 14.38 mm (0.566 pulg).
- ♦ Número de pasos: 48.



2.2.3 DISEÑO DEL EJE DE TRANSMISIÓN DEL MOVIMIENTO DE GIRO

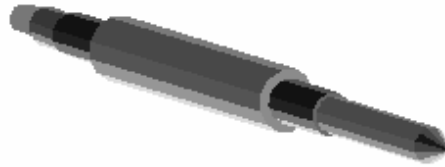


Figura 2.6. Configuración del eje-contrapunto de transmisión.

Este elemento esta sometido a dos cargas simultáneamente, la primera proveniente de la reacción por la cadena de transmisión, y una segunda ejercida por el espécimen a temprar.

A continuación se presenta el esquema de las fuerzas a las cuales esta sometido el eje de transmisión del movimiento de giro.

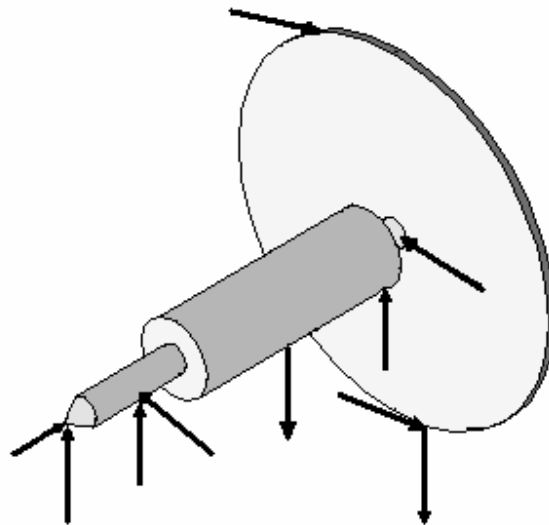


Figura 2.7 Fuerzas actuando en el eje-de transmisión debido a la tensión de la cadena.

Una de las fuerzas importantes en el análisis para el diseño de este elemento es la reacción creada por el peso del espécimen a temprar, a continuación se encuentra esta fuerza a que se hace referencia.



$$\sum M_0 = 0$$

$$W(L/2) - R_2(L) = 0$$

$$R_2 = W/2$$

$$R_2 = 52.53 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 + R_2 - W = 0$$

$$R_1 = W - R_2$$

$$R_1 = 52.53 \text{ N}$$

Luego de dimensionar el eje, se realiza análisis en base a las fuerzas presentes en los planos xy, y xz, con el objetivo de encontrar el mayor momento de flexión que sufre el eje, así a continuación se realiza la selección del material para la fabricación del elemento.

Análisis en el plano xy

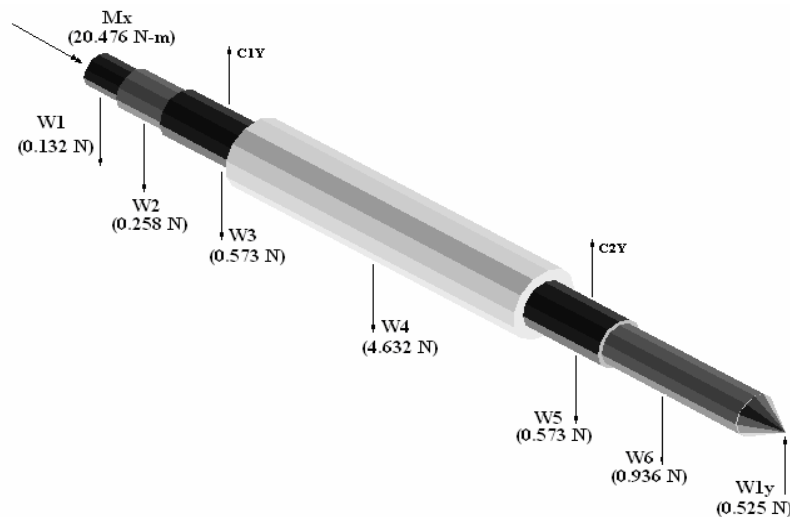


Figura 2.8 Fuerzas actuando en el eje-de transmisión..

$$\sum M_{c1y} = 0$$

$$-W_1(42) - W_2(25) + W_4(75) - C_{2y}(150) + W_5(150) + W_6(200) + E_{1y}(234.5) = 0$$

$$C_{2y} = 4.88 \text{ N}$$



$$\sum F_y = 0$$

$$-W_1 - W_2 - W_3 + C_{1y} - W_4 - W_5 - C_{2y} - W_6 - E_{1y} = 0$$

$$C_{1y} = 2.75 \text{ N}$$

Análisis en el plano xz

$$\sum M_t = 0$$

$$-T_z (42) - C_{2z} (150) = 0$$

$$C_{2z} = 138.5 \text{ N}$$

$$\sum F_z = 0$$

$$T_z - C_{1z} + C_{2z} = 0$$

$$C_{1z} = 633.0 \text{ N}$$

Debido al hecho que en el plano xz se presenta el mayor momento es con este valor con el cual se continúan los cálculos para determinar el tipo de acero con el que se construirá el eje.

Análisis de fatiga

Los esfuerzos alternantes son:

$$\sigma_a = \frac{32 M}{\pi d^3}$$

$$\sigma_a = 30.83 \text{ MPa}$$

Los esfuerzos medios son:

$$\tau_m = \frac{16 T}{\pi d^3}$$

$$\tau_m = 38.8 \text{ MPa}$$

Con los valores anteriormente encontrados se determinará el valor del esfuerzo último a la tensión del material del que puede fabricarse el eje aplicando la teoría de Goodman modificada.



$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\tau_m}{S_{ut}} = 1$$

En donde:

S_e , es el límite a la fatiga que viene dado por la ecuación:

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e S_{ut}$$

Siendo:

K_a , el factor de acabado de la superficie, asumiendo que la superficie de está rectificadas, es:

$$K_a = 4.51 S_{ut}^{-0.265}$$

K_b , factor de tamaño, en los casos de flexión y torsión se tiene:

$$K_b = \left(\frac{d}{7.62} \right)^{-0.1133} = 0.926$$

K_c , factor de carga, para condiciones de flexión $K_c=1.0$

Tanto el factor por temperatura (K_d), y el factor por efectos diversos (K_e) se suponen igual a la unidad.

Por lo tanto:

$$S_e = (4.51 S_{ut}^{-0.265})(0.926) S_{ut}$$
$$S_e = 4.17 S_{ut}^{0.735}$$

Al introducir los valores a la ecuación de Goodman se tiene:

$$\frac{(30.83 \text{ MPa})}{4.17 S_{ut}^{0.735}} + \frac{(38.80 \text{ MPa})}{S_{ut}} = 1$$

Despejando el valor del esfuerzo último a la tensión se tiene:

$$S_{ut} = 60.72 \text{ MPa}$$

El acero al carbono que cumple con esta condición es el AISI 1020, el cual posee un esfuerzo último a la tracción de 380 MPa; por lo que al evaluar este valor en la ecuación de Goodman, se obtiene el factor de seguridad.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\tau_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$
$$\frac{(30.83 \text{ MPa})}{4.17 (60.72 \text{ MPa})^{0.735}} + \frac{(38.80 \text{ MPa})}{380 \text{ MPa}} = \frac{1}{n}$$



El factor de seguridad encontrado es de: 2.2.

2.3 NORMAS DE SEGURIDAD

La protección del personal en cualquier industria es de vital importancia, y el disminuir los riesgos en cualquier actividad productiva es un objetivo a cumplir. Para ello, se enumeran las normas de seguridad contra los riesgos generados en el temple por flama, siendo el calor y las radiaciones ópticas las más importantes a tomar en cuenta.

Calor Para la evaluación y el control del entorno térmico existen diversas normas internacionales, entre las que destacan las formuladas por la Organización Internacional de Normalización (ISO), como la norma ISO 11399, de 1995, “Ergonomics of the termal environment: Principles and application of relevant internacional Standards”, de gran utilidad para su aplicación.

Por lo que se refiere a ambientes calientes, rige la norma ISO 7243, de 1989, “Hot environments: Estimation of the heat on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)” ofrece un método rápido que se basa en el denominado índice de temperatura de bulbo y globo húmedos (WBGT), que da resultados satisfactorios en prácticamente todas las condiciones. Sin embargo, pudiera resultar insuficiente para garantizar la protección de los trabajadores, para condiciones más rigurosas, las normas ISO 7933, de 1989, “Hot enviroment- Analytical determination and interpretation of termal stress using calculation of required rate” e ISO 9889, de 1992, “Ergonomics-Evaluation of termal strain by physiological measurements” contienen orientaciones para evaluar las medidas que debe tomar cada persona.

Otra norma utilizada es: la norma EN 563: “Safety of Machinery-Temperatures of Touchable surfaces-Ergonomics data to stablish temperature limit values for prot surfaces” (1994).

Radiaciones ópticas Los límites de exposición para las radiaciones ópticas deben establecerse con respecto a las distintas clases de radiación. En su publicación “Theshold limit values”, la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales recomendó en 1997 que:



- a) Los límites de exposición a radiaciones ultra violeta se determinan en función de la densidad del flujo radiante (o irradiancia) de la radiaciones que afectan al ojo, medida en mW/cm^2 y ponderada según la longitud de onda de la radiación.
- b) Los límites de exposición a la luz visible se definan en función de la radiancia de la fuente, es decir, de la cantidad de energía por unidad de superficie proyectada por la fuente a cada ángulo sólido, ponderada según la longitud de onda de la radiación, y
- c) Los límites de exposición a las radiaciones infrarrojas (IR) se determinan en función de la densidad del flujo radiante en el ojo, expresada en mW/cm^2 , y sin ponderación según la longitud de onda. No obstante, para las lámparas térmicas infrarrojas existen también un límite en términos de radiancia de la fuente.

En el manual “Guidelines on protection against non-ionizing radiation” (Asociación Internacional de Protección contra las radiaciones, 1991) se ha incluido límites de exposición para proteger el ojo y la piel de las radiaciones láseres. Estos límites se establecen por regla general en función de la densidad energética que alcanza al ojo o a la piel (que se expresa en J/m^2 , y equivale a la densidad de flujo radiante expresada en W/m^2 multiplicada por el tiempo de exposición expresado en segundos). Los límites de exposición fluctúan según la longitud de onda y por lo que se refiere a la luz visible y a las radiaciones infrarrojas sus valores se reducen en cierta medida conforme es mayor el tiempo de exposición. En el manual “Practical guide on the use of lasers in the workplace”, de la serie seguridad, higiene y medicina del trabajo, número 68 (Ginebra, 1993), figuran orientaciones sobre la aplicación de los límites de exposición, así como otras referencias a límites de exposición a las radiaciones láseres. En cambio, las medidas de control tienden a definirse más bien con respecto a la clase de láseres utilizados que en relación a los límites de exposición. La clasificación de láseres figura en la norma IEC 60825-11 de la Comisión Electrotécnica Internacional “Safety of laser products- Part 1: Equipment, classification, requirements and users guide” (CEI, 1993).

CAPITULO III



3. CARACTERIZACIÓN DE LA BOQUILLA

En este capítulo se describe el procedimiento para realizar las pruebas de temple por flama, indicando las condiciones a las cuales se debe calibrar el equipo, además de una selección de micro fotografías de las muestras obtenidas de cada espécimen, para luego enumerar en un apartado especial las conclusiones a que puede llegarse luego del estudio metalográfico. La caracterización de la boquilla, se realizó efectuando pruebas de temple por flama sobre especímenes de acero AISI 1045 con las siguientes dimensiones: 12.7 mm de diámetro y 300 mm de longitud. Las condiciones de presión del propano y el oxígeno, la velocidad de avance de la boquilla y la velocidad de giro de la barra a temprar se mantuvieron constantes variándose únicamente la distancia de acoplamiento.

3.1 PROCEDIMIENTO DEL TEMPLE POR FLAMA

Se debe tener en cuenta que los cilindros de oxígeno y de propano, se encuentren con un mínimo de presión para realizar la prueba, esto con el motivo de no ser interrumpido el tratamiento térmico.



Figura 3.1. Regulador de única etapa de presión graduable para el manejo de propano. Diseñado para trabajo tipo industrial como lámparas infrarrojas de gas, sopletes, hornos, incubadoras, etc. Donde la capacidad instalada requiera ajustes continuos en la presión de consumo entre 6.9 - 13.8 Kpa (1-2 psi)



El procedimiento de temple por flama con este dispositivo inicia con la calibración de las presiones de trabajo del oxígeno y del propano. Importante es decir, que el regulador de combustible se ha calibrado de manera que no sea necesario estar realizando ajustes.

La calibración se hace de manera visual observando el tipo de llama que genera la boquilla. El regulador que utiliza el propano, es un regulador de baja presión de entre 1 a 2 psi como se presenta en la figura 3.1 El oxígeno se regula a una presión de 2.0 psi.

A continuación se realiza el montaje de la barra de pruebas manteniendo el cuidado que el banco se encuentre paralelo a la bancada, lo anterior se describe en detalle en el manual de operaciones del equipo.

Se gradúa la distancia a la cual se realiza la prueba (para el caso se calibraron tres distancias diferentes), se recomienda siempre realizar un chequeo final de estos parámetros, junto con la velocidad de rotación del torno y el volante de avance transversal.

Se retrocede la boquilla para encenderla, se procede girar primeramente la válvula de propano, se acciona el chispero y una vez encendido el combustible se procede a la apertura de la válvula de oxígeno, hasta obtener una llama similar a la presentada en la figura 3.2.



Figura 3.2. Llama utilizada para el temple por flama

Se acciona el movimiento de giro y se realiza el embrague del sistema de traslación longitudinal, del torno. Se enciende la bomba del torno y se abre la válvula del sistema de enfriamiento.



3.2 DESCRIPCIÓN DE VARIABLES Y CONSTANTES DEL PROCESO DE TEMPLE POR FLAMA

El objetivo de esta sección es realizar un resumen de las variables y constantes que están involucradas en el proceso de temple por flama, de manera que el lector las tome en cuenta en las secciones siguientes, porque de estas dependen los resultados obtenidos, los cuales sirven de base para continuar con investigaciones similares.

Constantes del proceso de temple por flama El hecho que los parámetros que a continuación se describen para este caso en particular hayan sido constantes no quiere decir que lo sean para otras investigaciones futuras.

a) *Presión del propano* Antes de definir la presión de trabajo y las razones para su elección, es necesario aclarar el por que se elige el GLP como combustible. Son varios los aspectos uno de ellos es su disponibilidad y precio en el mercado, con un cilindro de 100 lbs, se pueden llegar a realizar un poco menos de 50 pruebas de temple por flama; una segunda y definitiva razón por el cual se utiliza este tipo de combustible es la temperatura que alcanza la llama (2850 °C) con respecto a la temperatura de austenización del acero AISI 1045 (820 – 850 °C) es justificable su uso.

Debido a la selección del regulador de presión y la carencia de un manómetro con la precisión necesaria, la regulación se realiza visualmente, por lo que una vez obtenida la llama buscada se deja de manipular el regulador, esta presión para el caso es de aproximadamente 2 psi, que es la máxima obtenible por el regulador.

b) *Presión del oxígeno (O₂)* En el caso del oxígeno este se regula a una presión de 1.0 psi., aproximadamente esto debido al tipo de regulador con que se cuenta.

c) *Avance de la boquilla* El avance de la boquilla esta determinado por el torno, para este caso se escogió el mínimo que puede generar el torno, siendo de 0.5 mm/s.

d) *Velocidad de rotación de la barra de prueba* La velocidad utilizada es de 60 rpm. aproximadamente, se escogió esta velocidad por según la literatura consultada es la más utilizadas en los sistemas de temple por flama, para lo cual se regula el torno para que gire a 50 rpm.



Variables del proceso de temple por flama Para el caso se mantienen como variables la distancia de acoplamiento, la cual es la separación entre la boquilla y la barra a la cual se le quiere endurecer superficialmente. Estas distancias se escogieron la realizar mediciones preliminares en la llama, la cual dio como resultado un dardo con una longitud de 8 mm aproximadamente, por lo que se decidió experimentar con un milímetro por encima y un milímetro por debajo de la medición realizada.

3.3 ESTUDIO METALOGRAFICO

En este apartado se ha tenido a bien, iniciarlo dando una explicación sobre la preparación de las probetas para posteriormente describir cada una de las microfotografías obtenidas bajo las condiciones que se describirán en su oportunidad.

3.3.1 PREPARACIÓN DE PROBETAS PARA ANÁLISIS METALOGRAFICO

En el siguiente apartado se describen los principales pasos para realizar un análisis metalográfico. En general las principales tareas para el proceso de preparación de probetas son:

1. Marcado de probetas
2. Corte de probetas
3. Embutido
4. Pulido
5. Ataque químico

Marcado de probetas Las probetas se identifican de la siguiente manera: la letra inicial indica la posición que tenían en el espécimen de prueba de esta manera que: B indica la parte media del la barra espécimen, para identificar los extremos A indica el inicio del proceso y C indica la finalización del proceso, a continuación se procede a indicar el número correlativo de la barra, y finalmente se indica la distancias en milímetros a la que se realizó la prueba, de esta manera se tiene que A017 indica que la probeta se extrajo del



extremo donde inicio el proceso en la primera barra espécimen para una distancia entre la boquilla y la barra de 7 mm. La figura 3.3 presenta tres barras de prueba y las respectivas probetas de la parte inicial, media y final de las mismas.

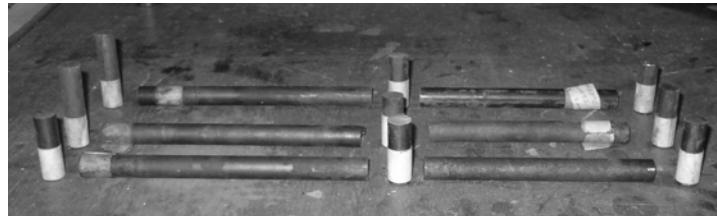


Figura 3.3. Corte de los especímenes sometidos al temple por flama.

Corte de probetas Las probetas son cortadas en una máquina cortadora de disco abrasivo destinada especialmente para este objetivo (ver figura 3.4), el espesor de corte es de aproximadamente de 5 mm. El total de cortes por cada espécimen de pruebas fue de tres (3). Durante el corte en la máquina el avance fue muy lento acompañado simultáneamente de abundante refrigerante (taladrina), esto con el fin de que la probeta no se calentara y no alterara la micro estructura del acero sometido al temple por flama, lo cual llevaría a la obtención de resultados erróneos.



Figura 3.4. Máquina cortadora de probetas con disco abrasivo.

Embutido Una vez cortada las probetas se procede al embutido de éstas. Con este propósito se utilizó resina poliéster transparente que facilitó además la identificación de las probetas. El procedimiento para embutir con resina poliéster es el siguiente: Se corta una



porción de 60 mm de longitud de tubo PVC de $\varnothing\frac{1}{2}$ ", el cual es rectificando en el torno para dejar paralelos los extremos tal como se presenta la figura 3.5.



Figura 3.5 Probetas embutidas en resina poliéster.

A continuación se sella un extremo del tubo que sirve de molde, con tirro para luego colocar en el fondo la probeta y a continuación verter la resina poliéster.

La resina poliéster se encuentra en estado líquido y antes de verterla en el molde se le agrega un catalizador para acelerar el endurecimiento. El tiempo de solidificación es de aproximadamente de 12 h, lo cual depende de la cantidad de catalizador utilizado.

Pulido Se realiza por la abrasión superficial de las probetas con partículas más duras, de tamaños sucesivamente decrecientes, este comprende tres etapas, las cuales son:

- a) Desbastado
- b) Pulido grueso
- c) Pulido final

Desbastado Posteriormente al embutido de las probetas se procede al desbaste mecánico con una serie de papeles de carburo de silicio (lija) bajo agua, el número de dichas lijas utilizadas para este desbaste son: 100, 200, 220, 320, 400, 500 y 600.



Pulido grueso El pulido grueso se realiza con papeles de carburo de silicio número 1200 y 1500 sucesivamente.

Estas dos operaciones se realizaron utilizando la maquina semiautomática de para lijado de muestras metalográficas, la cual cuenta con un variador de frecuencia con el que se controla la velocidad de giro de la superficie que porta el papel de carburo de silicio, y por medio de un temporizador se controla el tiempo de duración de la operación en ejecución (Desbastado o Pulido grueso), además de controlar la presión de acople de las probetas y el papel de carburo de silicio y tener su propio sistema de evacuación de partículas, esta máquina se presenta en la siguiente figura 3.6.



Figura 3.6. Máquina semiautomática para el pulido de probetas.

Debido a que la máquina semiautomática de lijado está diseñada para trabajar con un mínimo de 8 probetas fue necesario hacer uso de la mesa de lijado, la cual gira a altas revoluciones; durante este proceso se utiliza abundante agua para evacuar las partículas de metal y de lija que se desprenden durante el proceso de pulido y así evitar que estas mismas rayen la superficie pulida. La mesa de lijado en la que se realizan estas operaciones se presenta en la figura 3.7.



Figura 3.7. Mesa para pulido manual de las probetas metalograficas.

Pulido final El pulido final de la superficie (pulido de espejo), se logra utilizando alúmina (Al_2O_3) de un tamaño de partícula entre 0 a 1 μm sobre un paño afelpado.

El pulido final se realizó en la máquina pulidora vibradora que se puede observar en la figura 3.8. En dicha máquina se colocaron las probetas en grupos de ocho, sujetas a un contra peso que ejercen presión sobre las probetas y después de cierto tiempo (2 horas para este caso) se obtiene un pulido de espejo como acabado final.



Figura 3.8. Máquina pulidora vibradora

También se utilizó la máquina de pulido de probetas individual, la cual se presenta en la figura 3.9.



Figura 3.9. Máquina para pulido individual de probetas metalográficas.

Ataque químico Después de dar un pulido de espejo a las probetas es necesario un ataque químico con el propósito de revelar las fases presentes después del tratamiento térmico del acero. El reactivo utilizado para el ataque químico fue nital al 4% de concentración que es un compuesto de ácido nítrico (4%) diluido en alcohol etílico que compone el 96% restante.



Figura 3.10 Implementos a utilizar para el ataque químico de la probetas metalográficas

Consecuentemente al ataque químico, las probetas están listas para analizarlas metalográficamente, esto se lleva a cabo en un microscopio óptico el cual se presenta en la figura 3.11.



Figura 3.11 Microscopio para análisis metalográfico

3.3.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan un serie de microfotografías de las barras especímenes de acero AISI 1045, sometidos a temple por flama, teniendo un aumento de 100x en donde puede apreciarse las micro estructuras obtenidas en los experimentos a diferentes distancia de acoplamiento entre la boquilla y el espécimen. Se presentan tres microfotografías por espécimen con el fin de observar la continuidad de la micro estructura obtenida.

PRUEBA (A) PARA TEMPLE POR FLAMA

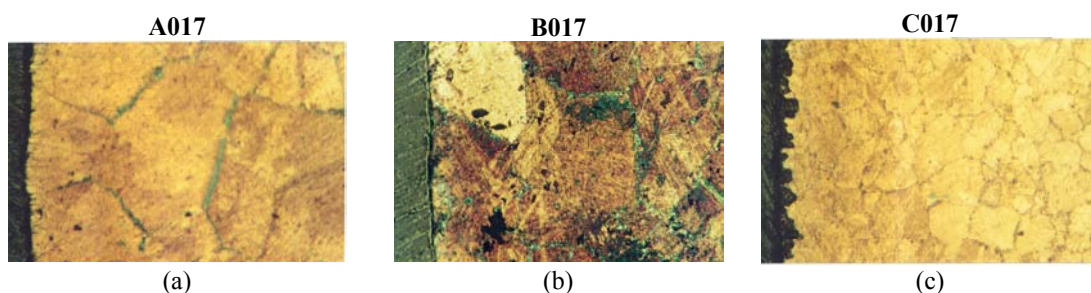


Figura 3.12. Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 7 mm, presión del gas combustible de 13.8 kPa (2 psi), presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama (100×).

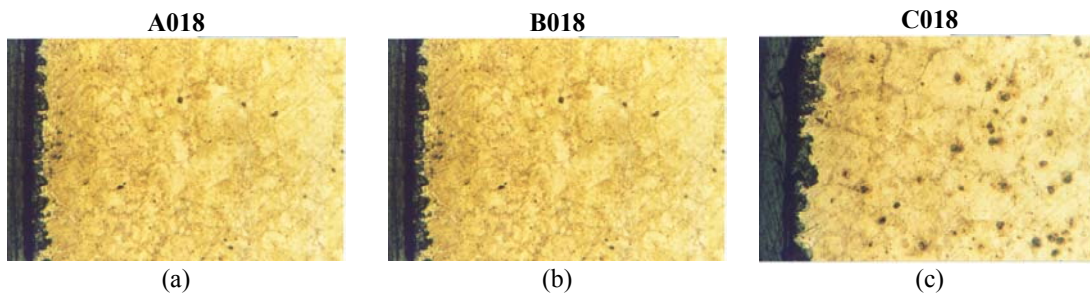


Figura 3.13. Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 8 mm, presión del gas combustible de 13.8 kPa (2 psi), presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama (100×).

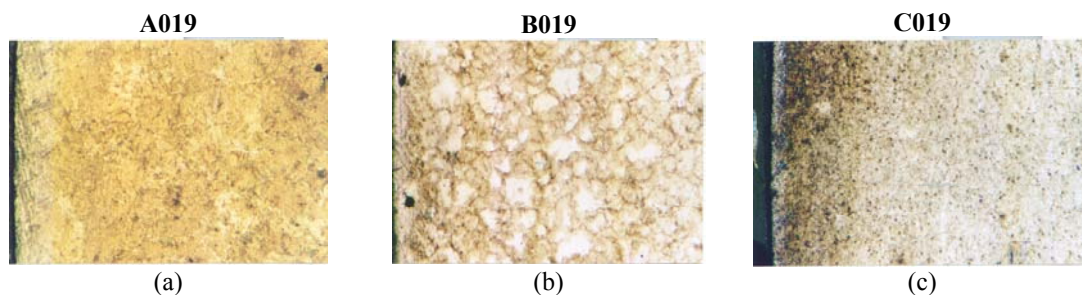


Figura 3.14. Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 9 mm, presión del gas combustible de 13.8 kPa (2 psi), presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama (100×).

PRUEBA (B) PARA TEMPLE POR FLAMA

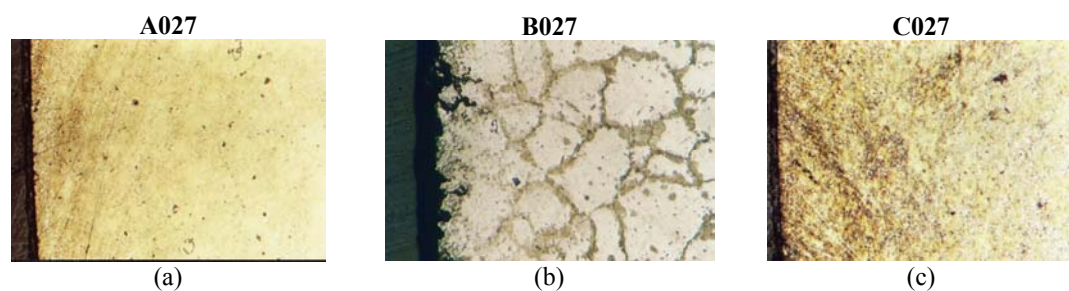


Figura 3.15. Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 7 mm, presión del gas combustible de 13.8 kPa (2 psi), presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama (100×).

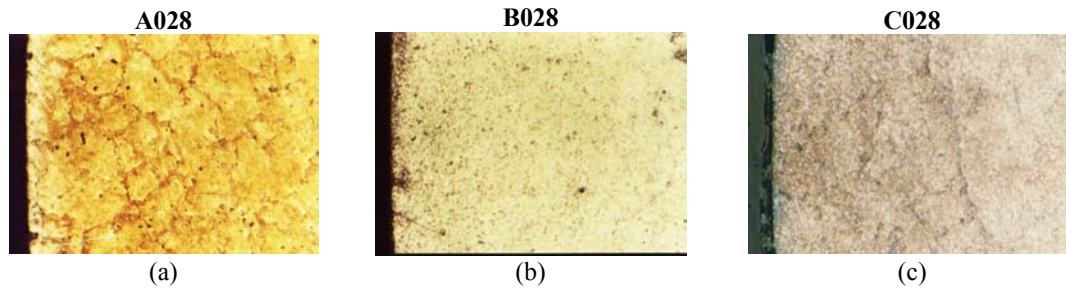


Figura 3.16 Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 8 mm, presión del gas combustible de 13.8 kPa (2 psi), presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama (100×).

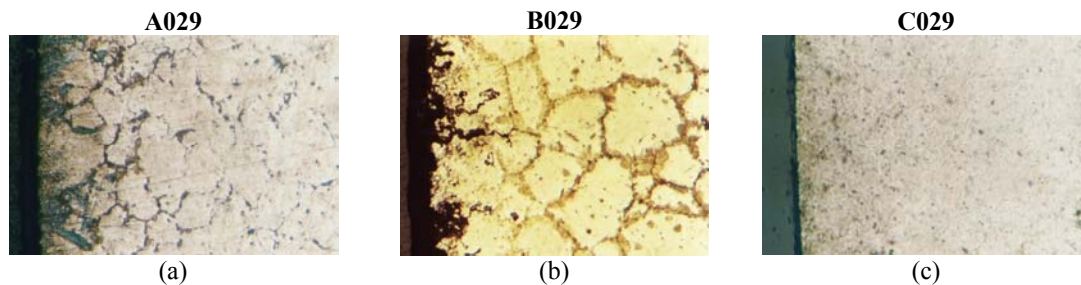


Figura 3.17. Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 9 mm, presión del gas combustible de 13.8 kPa (2 psi), presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama (100×).

PRUEBA (C) PARA TEMPLE POR FLAMA

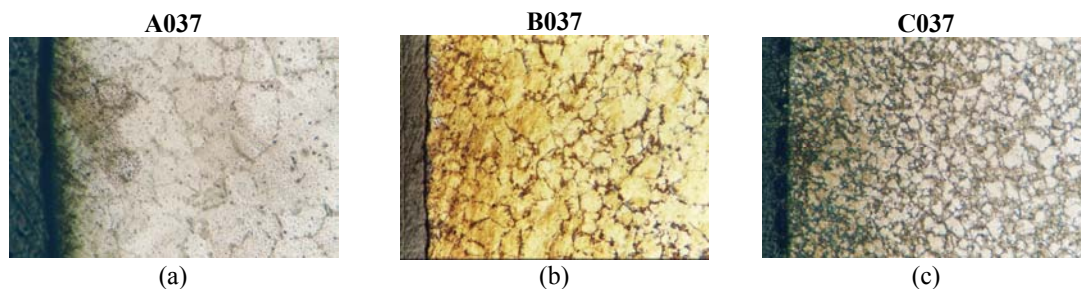


Figura 3.18 Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 7 m.m, presión del gas combustible de 2 psi. (13.8 kPa), presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama (100×).

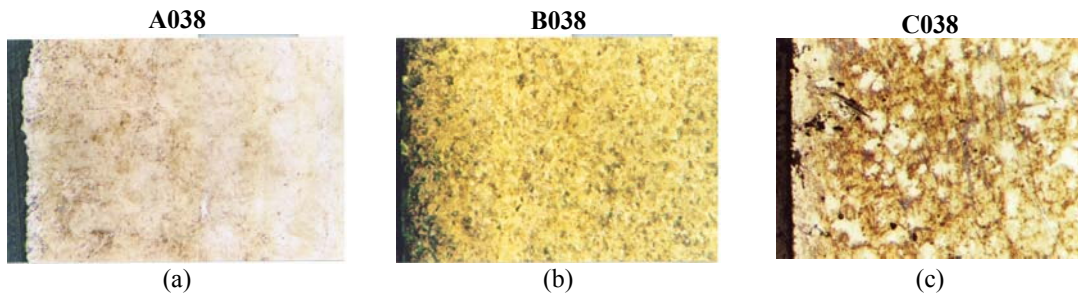


Figura 3.19 Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 8 mm, presión del gas combustible (GLP) de 13.8 kPa (2 psi), presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama (100×).

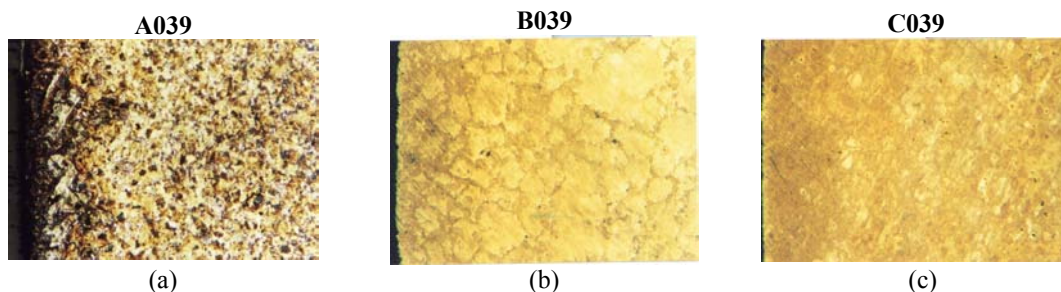


Figura 3.20 Micro fotografías de un espécimen acero AISI 1045 sometido a temple por flama. La distancia de acoplamiento utilizada fue de 9 mm, presión del gas combustible (GLP) de 13.8 kPa (2 psi), presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi), velocidad de rotación del espécimen 60 rpm, avance de la boquilla 0.5 mm/rev. (a) Extremo inicial del espécimen sometido al proceso de temple por flama; (b) Parte media de espécimen sometido al temple por flama; (c) Extremo final del espécimen sometido al proceso de temple por flama (100×).

PRUEBAS ADICIONALES

Se llevaron a cabo pruebas adicionales para determinar la microestructura obtenida con distancias de acoplamiento y velocidades de avance mayores con el objeto de disminuir el tiempo de calentamiento y poder analizar el tipo de microestructura que se obtiene. A mayores velocidades de avance, el enfriamiento se lleva a cabo más rápidamente, mientras que a distancias de acoplamientos mayores, se tendrán menores espesores de la capa endurecida ya que la profundidad del calentamiento es menor. Este mismo fenómeno puede ser también atribuible a las distintas temperaturas que se tienen en la llama de calentamiento fuera del cono de la misma.

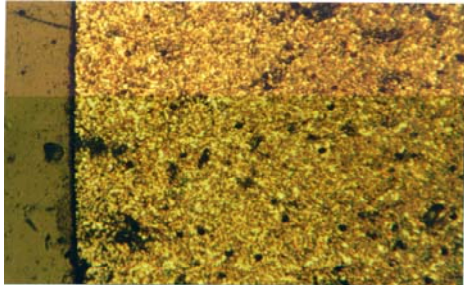


Figura 3.21 Microestructura de la superficie en una barra de ½ pulg, de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 10 kPa (1.5 psi); Presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi); distancia de acoplamiento 17 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 3 mm/s; no existe tiempo de estabilización (100×).

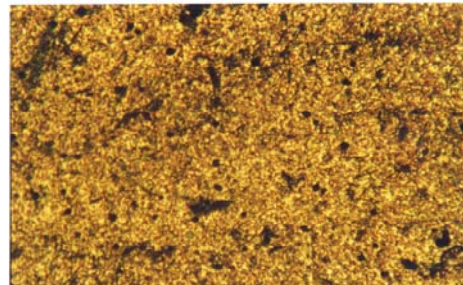


Figura 3.22 Microestructura de la superficie en una barra de ½ pulg, de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 10 kPa (1.5 psi); Presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi); distancia de acoplamiento 17 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 2 mm/s; no existe tiempo de estabilización (100×).

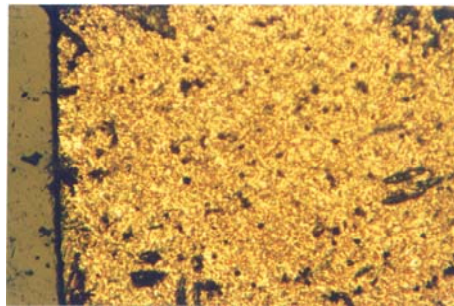


Figura 3.23. Microestructura de la superficie en una barra de ½ pulg, de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 10 kPa (1.5 psi); Presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi); distancia de acoplamiento 17 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 1 mm/s; no existe tiempo de estabilización (100×).

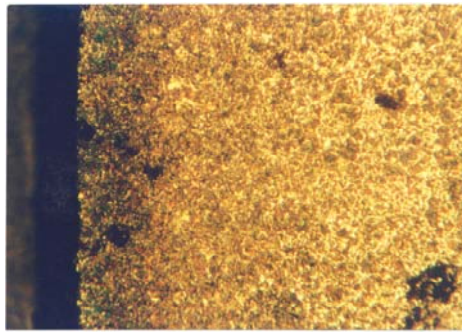


Figura 3.24. Microestructura de la superficie en una barra de 1/2 pulg, de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 10 kPa (1.5 psi); Presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi); distancia de acoplamiento 17 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 5 mm/s; no existe tiempo de estabilización (100×).

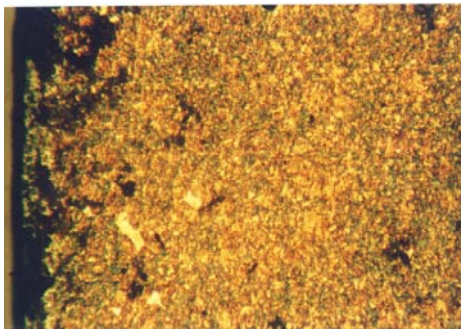


Figura 3.25 Microestructura de la superficie en una barra de 1/2 pulg, de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 10 kPa (1.5 psi); Presión del oxígeno 6.89 kPa (1.0 psi); distancia de acoplamiento 10 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 0.5 mm/s; no existe tiempo de estabilización (100×).

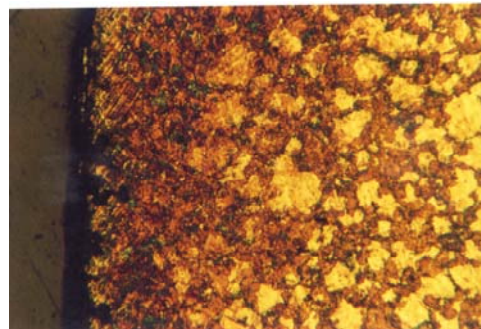


Figura 3.26 Microestructura de la superficie en una barra de 1/2 pulg, de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple por flama, manteniendo una llama carburante con los siguientes parámetros de operación: Presión del gas propano 1.5 psi. (10 kPa); Presión del oxígeno 1.0 psi. (6.89 kPa); distancia de acoplamiento 10 mm; velocidad de desplazamiento de la boquilla 0.5 mm/s; tiempo de estabilización 135 segundos (500×).



PRUEBAS REALIZADAS EN HORNO

Las pruebas realizadas en un horno eléctrico tienen por objeto comparar las microestructuras tanto para el endurecimiento superficial por flama, como para el endurecimiento por medio de un horno eléctrico, ambas probetas presentan martensita en la superficie, mientras que en el núcleo existe perlita muy fina.



Figura 3.27. Microestructura de la superficie en una barra de ½ pulg, de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple en el horno, Las condiciones del tratamiento son: temperatura del horno 900 °C, tiempo de mantenimiento en el interior del horno de la probeta 2 minutos, el medio de enfriamiento es agua a temperatura ambiente de 32 °C (100×).

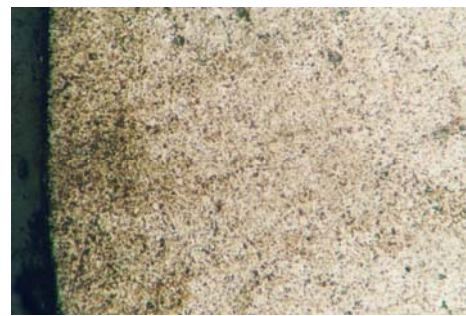


Figura 3.28. Microestructura de la superficie en una barra de ½ pulg, de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple en el horno, Las condiciones del tratamiento son: temperatura del horno 900 °C, tiempo de mantenimiento en el interior del horno de la probeta 2 minutos 30 segundos, el medio de enfriamiento es agua a temperatura ambiente de 32 °C (100×).

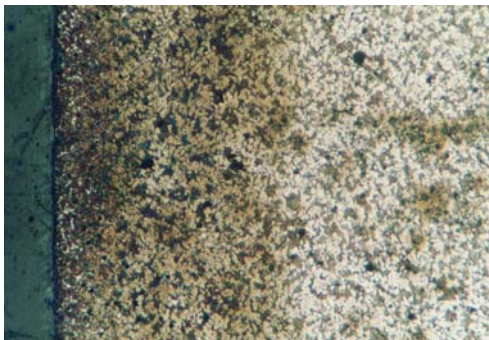


Figura 3.29 Microestructura de la superficie en una barra de ½ pulg, de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple en el horno, Las condiciones del tratamiento son: temperatura del horno 900 °C, tiempo de mantenimiento en el interior del horno de la probeta 3 minutos, el medio de enfriamiento es agua a temperatura ambiente de 32 °C (100×).

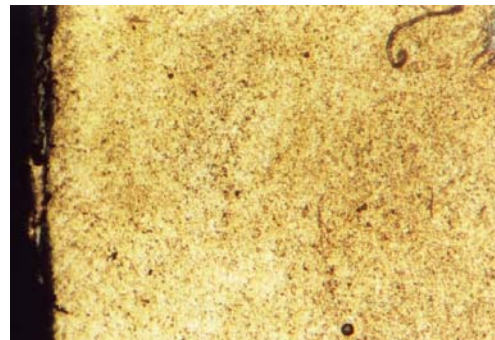


Figura 3.30 Microestructura de la superficie en una barra de ½ pulg, de acero AISI 1045, sometido a tratamiento superficial de temple en el horno, Las condiciones del tratamiento son: temperatura del horno 950 °C, tiempo de mantenimiento en el interior del horno de la probeta 3 minutos, el medio de enfriamiento es agua a temperatura ambiente de 32 °C (100×).



3.3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las foto micrografías evidencian la presencia de un aumento de grano en la superficie atribuible a el tiempo en que la probeta estuvo expuesta a la llama, sin embargo en los límites de grano se observa también austenita y ferrita, atribuible a que no existió una transformación completa de ferrita a austenita, esto quiere decir que la temperatura de la superficie del acero no alcanzo la temperatura de transformación, la cual para el acero AISI 1045 se encuentra entre 820 a 850 °C.

Al realizar las debidas comparaciones entre las diferentes distancias de acoplamientos experimentadas, no existe mayores diferencias, puesto que la presencia de estructuras martensíticas es predominante, por lo que para verificar la existencia de una capa endurecida, se procedió a realizas pruebas de micro dureza.

Para las pruebas de micro dureza se procede a escoger las probetas que son representativas del proceso de temple por flama, por lo que se tomaron las muestras de inicio y las intermedias, tomando lecturas a 160 μm , 1 mm, 3 mm y 6 mm de profundidad, los resultados se presentan en las figuras 3.34 y 3.35.

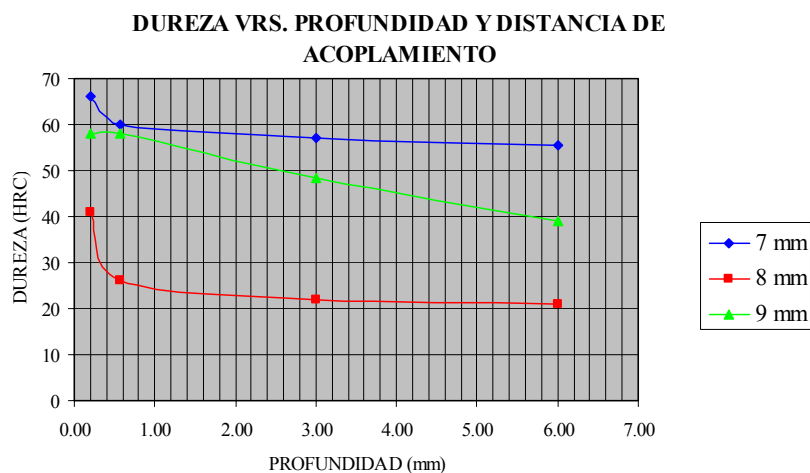


Figura 3.31 Grafica Dureza vs. Profundidad para diferentes distancias de acoplamiento, en el extremo de inicio del proceso de temple por flama.

En la figura 3.34, se presentan los resultados obtenidos al realizar las pruebas de micro dureza; es de aclarar que los valores de dureza obtenidos están en escala Vickers y luego



fueron transformados para ser presentados en HRC. La tendencia de la curva descrita nos indica que la superficie es mucho más endurecida que el centro de la barra.

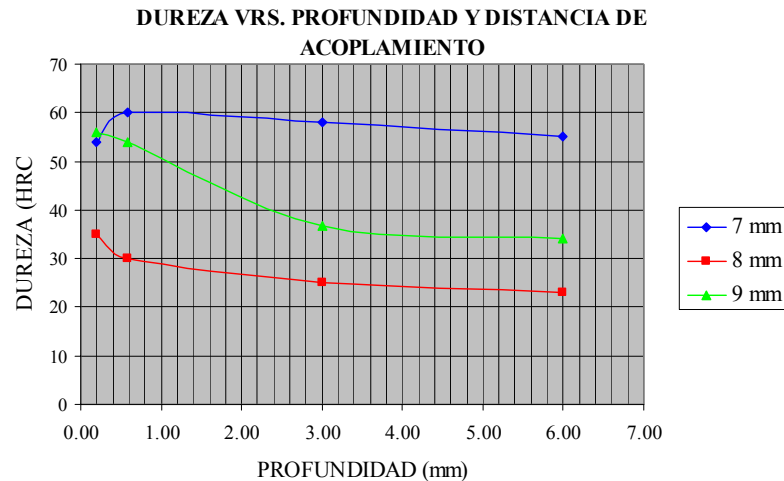


Figura 3.32 Grafica Dureza vs. Profundidad para diferentes distancias de acoplamiento, de la parte media de la barra sometida al proceso de temple por flama.

La figura 3.35 presenta la tendencia de dureza en relación a la profundidad en muestras tomadas a la mitad de las barras sometidas a temple por flama a diferentes distancias de acoplamiento. Nuevamente puede observarse que existe un aumento de la dureza en la superficie de la barra y conforme se aproxima al centro esta decrece.

3.4 ANÁLISIS PARA EL CALENTAMIENTO EN UNA BARRA SOMETIDA A TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE POR FLAMA

Considérese que la barra que se presenta en la figura 3.36, se mantiene a una temperatura inicial T_0 (Temperatura ambiente). Se aumenta bruscamente la temperatura de la superficie y se le mantiene a una temperatura T_1 (Temperatura de austenización); se desea una expresión para la distribución de temperatura en la barra, como una función del tiempo.

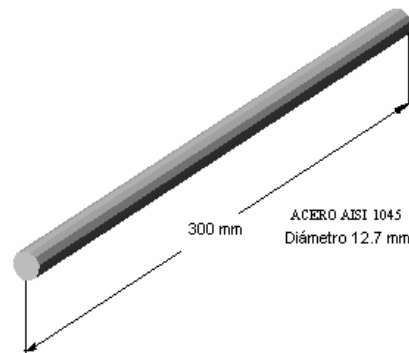


Figura 3.33 Barra espécimen

Suponiendo propiedades constantes, la ecuación diferencial para la distribución de temperatura $T(x, r, \tau)$ es:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

Esto es debido a que la barra se encuentra en continuo movimiento de rotación, por lo que la variación del flujo de calor en la dirección angular Φ se asume despreciable.

Por lo tanto, ahora se considera un cuerpo bidimensional dividido en incrementos, tal como se presentan en la figura 3.34. el subíndice m indica la posición x, y el subíndice n indica la posición r; la ecuación diferencial que controla el flujo de calor dentro de la barra es:

$$k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

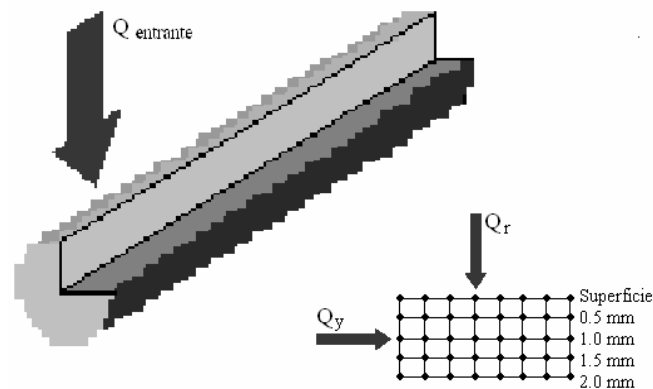


Figura 3.34. Efecto de la conducción de calor en la barra



Debido a la inexistencia de generación de calor por unidad de tiempo en el interior de la barra, la ecuación es simplificada de la siguiente manera:

$$k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

Conociendo el propósito del temple por flama, debemos calcular el calor necesario para aumentar la temperatura del volumen de la barra que deseamos endurecer; aplicamos la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2\pi k L (T_i - T_o)}{\ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)}$$

Para el caso en estudio, la temperatura de austenización del acero 1045 es de 850°C, pero se asume que el quemador llevará a la pieza a una temperatura mucho mayor (900°C).

La temperatura del ambiente se fija en 32°C, la conductividad del acero (k) es de :36 W/m²C.

Se desea una capa endurecida de 1.5 mm de profundidad, entonces:

$$Q = 29.14 \text{ kW}$$

Este valor es el calor necesario para incrementar la temperatura del segmento de la barra que se expone frente a la boquilla, en el proceso del temple por flama.

Regresando al análisis matemático, para la expresión del gradiente de temperatura, se tiene que al suponer propiedades constantes, las segundas derivadas parciales pueden aproximarse por:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{1}{(\Delta x)^2} (T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n})$$
$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \approx \frac{1}{(\Delta r)^2} (T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n})$$



La derivada temporal se aproxima por:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta \tau}$$

En esta relación los índices superiores indican el incremento en el tiempo. La combinación de las dos relaciones anteriores nos da la ecuación de diferencias equivalentes:

$$\frac{T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta r)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta \tau}$$

De esta manera, se conoce la temperatura en los diversos nodos en cualquier tiempo, se pueden calcular las temperaturas después de un incremento de tiempo $\Delta \tau$, escribiendo la ecuación para cada nodo y obteniendo los valores de $T_{m,n}^{p+1}$.

$$T_{m,n}^{p+1} = T_{m,n}^p + \alpha \Delta \tau \left(\frac{T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta r)^2} \right)$$

En el inicio del proceso del temple por flama, la boquilla se encuentra estática (figura 3.35), únicamente tiene movimiento de rotación la barra o espécimen de prueba lo anterior con el objeto de uniformizar la distribución de la temperatura en toda la superficie de la barra, por lo tanto, se pueden realizar el análisis en un punto sobre la barra que se encuentra expuesto a la llama, lo cual indica la necesidad de encontrar un tiempo para el cual la temperatura es la indicada para el temple en el punto de análisis.

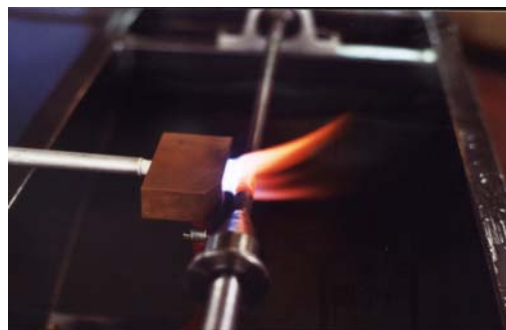


Figura 3.35 Proceso de temple por flama. La fotografía presenta el estado de inicio del proceso con el dispositivo diseñado.



Se desprecia el hecho que el quemador se enciende lejos de la barra de prueba, el tiempo se inicia entonces una vez que se ha alcanzado la distancia de acoplamiento, debido a que el suministro de calor no es constante y difícil de calcularlo.

A su vez se desprecia el efecto convectivo, de la pérdida de calor que sufre la porción de la barra que no se encuentra bajo el efecto de la llama.

El problema es simplificado aún más, siendo la ecuación a utilizar la siguiente:

$$T_{m,n}^{p+1} = T_{m,n}^p + \alpha \Delta \tau \left(\frac{T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p - 2T_{m,n}^p}{(\Delta r)^2} \right)$$

De tablas obtenemos los valores para las siguientes constantes:

k , Conductividad térmica (36.0 W/m °C)

ρ , Densidad (7753 kg/m³)

c , Calor específico (486 J/kg.°C)

α , Difusividad Térmica (0.970x10⁻⁵ m²/s)

Enunciando nuevamente la ecuación en función únicamente de la variable n :

$$T_n^{p+1} = T_n^p + \alpha \Delta \tau \left(\frac{T_{n+1}^p + T_{n-1}^p - 2T_n^p}{(\Delta r)^2} \right)$$

o bien:

$$T_n^{p+1} = \frac{1}{\beta} \left[(T_{n+1}^p + T_{n-1}^p) + (\beta - 2)T_n^p \right]$$

Donde:

$$\frac{1}{\beta} = \Delta Fo = \frac{\alpha \Delta \tau}{(\Delta r)^2}$$

Debe recordarse que el modulo de Fourier, compara una dimensión característica del cuerpo con una profundidad de penetración aproximada de la onda de temperatura, para un tiempo dado τ .

Entonces la ecuación toma la forma:



$$T_n^{p+1} = \Delta Fo (T_{n+1}^p + T_{n-1}^p) + (1 - 2\Delta Fo) T_n^p$$

Esta ecuación expresa la temperatura en el nodo n en el tiempo $(x+\Delta x)$ en términos de la temperatura en el tiempo x . En este caso en particular, ya que todas la temperaturas para $\tau=0$ son conocidas, es posible calcular las temperaturas en el tiempo Δx en todos los nodos internos con un valor preescrito de β .

Es claro que cuanto mayor sea el valor de Δr y Δx , con mayor rapidez se obtendrá la resolución. Las ecuaciones de diferencia finitas limitan los valores de Δx , que pueden usarse una vez se ha escogido Δr , esta restricción para sistemas unidimensionales es:

$$\frac{(\Delta r)^2}{\alpha \Delta \tau} \geq 2$$

Despejando $\Delta \tau$, y sustituyendo los valores correspondientes se tiene:

$$\Delta \tau = \frac{(\Delta r)^2}{2\alpha}$$
$$\Delta \tau = \frac{(1.0 \times 10^{-6} \text{ m})^2}{2(9.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s})}$$

Entonces:

$$\Delta \tau = 0.05 \text{ s}$$

Se debe recordar que el modulo de Fourier debe calcularse con cada incremento de $\Delta \tau$. Las ecuaciones de diferencia son útiles en la determinación de la temperatura interna en la barra sometida al temple por flama, como una función del espacio y tiempo.

Sin embargo, en la superficie la barra incrementa su temperatura debido a un flujo de calor originado por la combustión de gas propano y oxígeno, esta transferencia de calor es de origen convectivo.

El desarrollo de la capa límite en la barra determina las características de la transferencia de calor. Es necesario incluir en el análisis el gradiente de presión ya que influye en forma apreciable sobre el perfil de velocidad de la capa límite. Es este gradiente de presión el que origina el desarrollo de una región de flujo separado en la parte posterior de la barra cuando la velocidad de la llama es lo suficientemente grande.



El fenómeno de la separación de la capa límite se muestra en la figura 3.36.

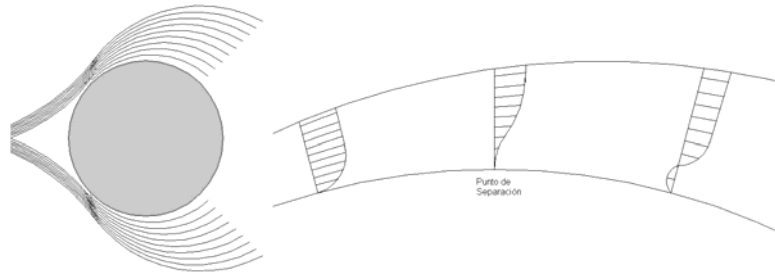


Figura 3.36. Distribuciones de velocidad indicando separación de flujo en un cilindro en flujo transversal

De acuerdo, con la teoría de capa límite, la presión de la capa límite es esencialmente constante en cualquier posición x en el cuerpo. En el caso de la barra, podríamos medir una distancia x a partir del punto de estancamiento del frente de la barra. Así la presión en la capa límite debería seguir la de la corriente libre para el flujo potencial alrededor de la barra, siempre y cuando este comportamiento no contradiga algún principio básico que deba aplicarse en la capa límite. A medida que el flujo progresa a lo largo del frente de la barra, la presión disminuirá y en seguida aumentaría a lo largo de la parte posterior de la barra, dando como resultado un incremento en la velocidad de corriente libre en el frente de la barra y una disminución en la parte posterior. La velocidad transversal (aquella velocidad paralela a la superficie) disminuirá a partir de un valor de u_{∞} en el borde exterior de la capa límite hasta cero en la superficie. A medida que el flujo continúa hacia la parte posterior de la barra, el incremento de presión causa una reducción en la velocidad en la corriente libre y a través de la capa límite. El aumento de presión y la reducción en la velocidad se relaciona a través de la ecuación de Bernoulli que se escribe a lo largo de una línea de corriente:

$$\frac{dp}{\rho} = -d\left(\frac{u^2}{2g_c}\right)$$

Como suponemos que la presión es constante a través de la capa límite, observamos que puede comenzar un flujo inverso en la capa límite cerca de la superficie; es decir, el



momento de las capas de fluido cercanas a la superficie no es lo suficientemente elevado como para vencer el incremento de presión.

Cuando el gradiente de velocidad en la superficie se vuelve cero, se dice que el flujo ha alcanzado un punto de separación:

$$\text{punto de separación en } \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right]_{u=0} = 0$$

A medida que el flujo continúa y pasa el punto de separación, puede ocurrir fenómenos de flujo inverso. Eventualmente, la región de flujo separado en la parte posterior de la barra se vuelve turbulenta y de movimiento aleatorio.

El coeficiente de arrastre para cuerpos ásperos se define como:

$$\text{Fuerza de arrastre} = F_D = C_D A \frac{\rho u_\infty^2}{2g_c}$$

En donde:

C_D es el coeficiente de arrastre

A, es el área frontal del cuerpo expuesto al flujo, la cual para la barra es el producto del diámetro y la longitud.

Debido a la naturaleza compleja de los procesos de separación de flujo, no es posible calcular en forma analítica los coeficientes de transferencia de calor en el flujo transversal; sin embargo, las correlaciones de datos experimentales de Hilpert para gases, indican que los coeficientes promedio de transferencia de calor se pueden calcular por medio de la ecuación:

$$\frac{hd}{k_f} = C \left(\frac{u_\infty d}{v_f} \right)^n \text{Pr}^{1/3}$$

Recordemos que el número de Reynolds, se define así:

$$\text{Re} = \frac{u_\infty x}{\nu} = \frac{\rho u_\infty x}{\mu}$$

Donde:



u_{∞} , es la velocidad de corriente libre

x , es la distancia desde el borde principal

$\nu = \mu/\rho$, es la viscosidad cinética

Por tanto la expresión se rescribe de la siguiente forma:

$$Nu = C [Re]^n Pr^{1/3}$$

En donde las constantes C y n se encuentran en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Constantes para Número de Nusselt

Re_{df}	C	n
0.4 – 4	0.989	0.330
4 – 40	0.911	0.385
40 – 4000	0.683	0.466
4000 – 40 000	0.193	0.618
40 000 – 400 000	0.0266	0.805

Las propiedades que se utilizan en la ecuación anterior se evalúan a la temperatura de la película tal como se indica por medio del subíndice f.

Desafortunadamente, la teoría de llamas turbulentas no ha progresado mucho desde la suposición original de Damkohler sobre los efectos de la turbulencia en la onda de combustión.

Él postuló que los efectos eran de dos tipos; la turbulencia de mayor escala servía para arrugar el frente de llama, aumentando el área y, como cada porción del frente aún se propagaba con la velocidad laminar, la velocidad global de la llama aumentaba.

Además, la turbulencia de menor escala aumenta la difusividad de calor y materia dentro del frente de llama y la velocidad de la llama también aumentaría.

Aunque estos conceptos de los efectos de la turbulencia en la estructura del frente de llama aún sirven de base al trabajo actual, hoy se reconoce que las propiedades de la turbulencia en la mezcla fresca no son suficientes para definir el problema, y otros efectos



como la “turbulencia generada por la llama” y el problema del acoplamiento entre el frente de llama y el campo turbulento son cruciales para el problema.

Se deben tener presentes las siguientes características de las llamas turbulentas:

1) La velocidad de la llama turbulenta es comúnmente, por lo menos un orden de magnitud mayor que la velocidad laminar. Esto es de gran importancia puesto que la longitud de la llama es menor y el sistema de combustión puede hacerse más compacto.

2) El frente de llama es más grueso y a simple vista tiene una apariencia difusa de pincel.

3) Las llamas turbulentas son ruidosas, generando ruido blanco.

Para tales llamas no confinadas se considera que los gases frescos y sus propiedades turbulentas son los factores importantes que afectan la propagación de la llama.

Básicamente no hay turbulencia generada en el seno de los gases quemados como en el caso de las llamas de estela (llamas donde la velocidad del flujo circundante excede la de la llama), dado que no se generan grandes tensiones de corte entre los gases quemados y el aire circundante. Por consiguiente, este sistema debe considerarse controlado por la turbulencia que traen los chorros iniciales.

Experimentalmente, la turbulencia de los chorros iniciales se puede producir utilizando un tubo largo con número de Reynolds alto (>2000), en cuyo caso la turbulencia es la de un flujo totalmente desarrollado a la salida del tubo. También se puede generar turbulencia casi-isotrópica (no-direccional) colocando grillas u otros accesorios en el flujo corriente arriba. Para efecto de análisis, se consideran las propiedades del aire a una temperatura de 1200 K, y se estima un número de Reynolds de 2000, por lo que el número de Nusselt adquiere el siguiente valor:

$$Nu = 0.683 (2000)^{0.466} (0.707)^{1/3}$$

$$Nu=21.0139$$

A continuación se calcula el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección de la siguiente manera:



$$h = \frac{Nu k_f}{d}$$
$$h = 128.7639 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Retornando al análisis matemático, se puede obtener la ecuación para el nodo frontera n efectuando un balance de energía en el nodo n -ésimo. Esto conduce a la expresión:

$$\Delta \tau (Q_{(n-1) \rightarrow n} + Q_{conv \rightarrow n}) = \Delta U_n$$

Cuando se sustituyen expresiones apropiadas para cada término en la ecuación la siguiente expresión:

$$T^{p+1} = Fo(2T^p + 2BiT_\infty^p) + [1 - 4Fo - 2FoBiT^p]$$

La temperatura en el nodo $n-1$ será fija, mientras que en el nodo n cambiara continuamente hasta alcanzar un estado estacionario. Seguidamente el nodo inicia un proceso de enfriamiento debido al alejamiento de la llama, es aquí en donde el análisis se convierte en bidimensional.

Calcularemos las temperaturas para intervalos sucesivos hasta que se alcanza la temperatura de $900^\circ C$, para ello utilizamos un programa en MATLAB.

El programa básicamente visualiza el perfil de temperatura que se produce por el calentamiento tanto en la superficie como en el centro de la barra tomando en cuenta a velocidad de avance del torno (mm/rev), la distancia de acoplamiento y la temperatura teórica de la llama, la cual puede ser medida utilizando una termocupla a diferentes distancia desde los orificios de salida del quemador. A continuación se muestra una lista de los archivos utilizados en MATLAB para obtener los diferentes valores de temperatura y poder ser graficados contra el tiempo. La figura 3.37 presenta los archivos que utiliza el programa para poder graficar los perfiles de temperatura tanto en la superficie como en el centro de barras de 50.8 mm a 127 mm (2 pulg a 5 pulg).

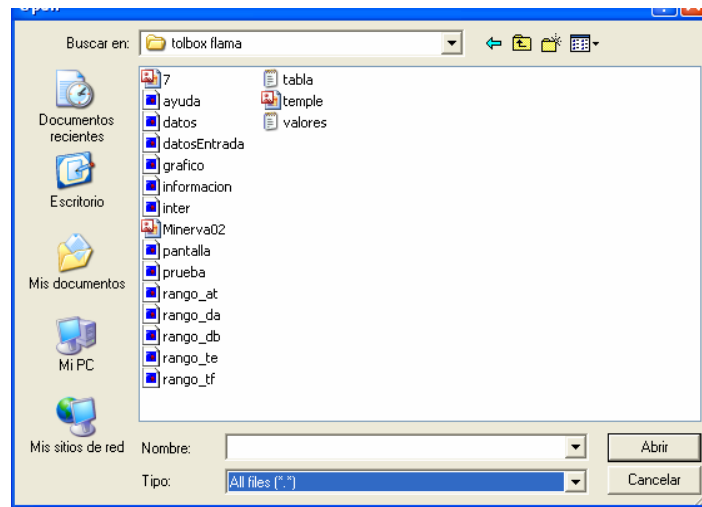


Figura 3.37 Listado de archivos utilizados por el programa para determinar el perfil de temperatura en barras de acero AISI 1045.

Los perfiles de temperatura en la superficie y en el centro de la barra son graficados por el programa en una gráfica Temp vs. Tiempo tal como se presenta en la figura 3.38.

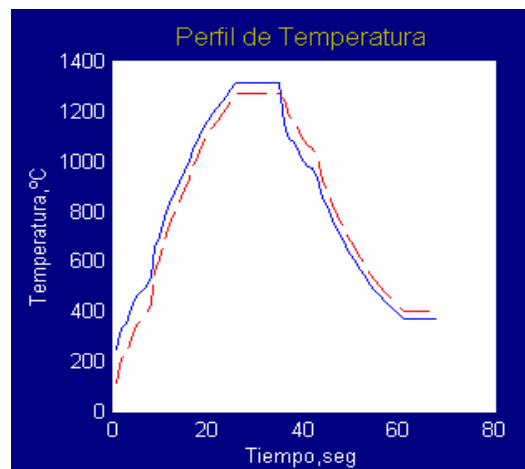


Figura 3.38. Perfil de temperatura obtenido con ayuda del software utilizado para temple por flama creado en MATLAB.

La línea llena indica el perfil de temperatura en la superficie mientras que la línea discontinua es el perfil de temperatura en el centro de la barra.

Es muy importante tener en cuenta que el programa utiliza datos de entrada como la temperatura del medio de enfriamiento, velocidad de avance del torno, temperatura de la llama a una cierta distancia de los orificios del quemador, diámetro de la barra y distancia



de acoplamiento. El programa está apto para obtener el perfil de temperatura en barras no menores a 2 pulg ya que de otra manera, el valor de Biot se vuelve menor que 0.1 lo cual significa que el programa asumiría temperatura constante en toda la superficie no existiendo la transitoriedad de la temperatura con el tiempo. El perfil de temperatura en la figura fue determinado utilizando velocidad de avance de 1 mm/rev, una distancia de acoplamiento de 10 mm y un diámetro de barra de 4 pulg.

CAPITULO IV



4. MANUALES

En esta sección se enuncian los pasos a seguir para la segura operación del dispositivo de temple por flama, así como también su mantenimiento, por lo cual debe ser leído detenidamente y tomar en cuenta las indicaciones que aquí se mencionan antes de utilizar el quemador tipo soplete, para evitar daños tanto a operarios como a los componentes mecánicos que están involucrados en el proceso. El manual de operación contempla el procedimiento para manipular el torno y cuando es necesario generar el movimiento de rotación de la barra, el acercamiento de la boquilla hasta alcanzar la distancia de acoplamiento y el embrague del mismo para desplazar longitudinalmente la boquilla. El manual de mantenimiento contempla el procedimiento de limpieza tanto de las partes móviles del mecanismo de transmisión de potencia así como también la limpieza de la boquilla.

4.1 MANUAL DE OPERACIÓN

El presente manual informa los procedimientos a seguir para la segura operación del dispositivo de temple por flama. El proceso de temple por flama es dividido en dos grandes sistemas de que consta todo el dispositivo, como los son: el sistema de movimiento de la boquilla y el sistema de combustión, por lo que cada uno será explicado en detalle.

4.1.1 SISTEMA DE MOVIMIENTO DE LA BOQUILLA

El sistema de movimiento de la boquilla consta de:

- a. Torno universal.
- b. Catarinas y cadena de transmisión de potencia del banco de pruebas.
- c. Eje de transmisión de potencia del banco de pruebas.
- d. Chumaceras del eje de transmisión de potencia del banco de pruebas.

El método utilizado para el tratamiento superficial de temple por flama es el *progresivo-rotatorio*, teniendo como parámetros constantes la velocidad de rotación de la



barra espécimen, la velocidad de avance de la boquilla y la distancia de acoplamiento de la boquilla, todos ellos controlados desde el torno.

En el caso de iniciar una investigación son estos parámetros quienes se fijan para poder realizar el análisis correspondiente sobre los aceros que se desean estudiar.

A continuación se enumeran una serie de pasos a realizar para el correcto funcionamiento del sistema de movimiento de la boquilla.

Primero Verificar la correcta posición de las palancas en el mando de velocidades del torno para obtener las correspondientes velocidades de rotación del plato. Dichas palancas se muestran en la figura 4.1. Ésta muestra las velocidades de rotación que pueden generarse en el torno, más no así las velocidades de rotación que se necesitan en el eje a temprar.



Figura 4.1 Disposición de las palancas en la caja de velocidades del torno, para generar 50 rpm.

El sistema de acoplamiento consta de un sistema de catarinas y cadena. En el plato del torno se hace el montaje de la catarina la cual consta de 40 dientes; la catarina que se encuentra formando parte del banco de pruebas consta de 33 dientes, creando un aumento en la velocidad de rotación. Este sistema puede ser observado en la figura 4.2.

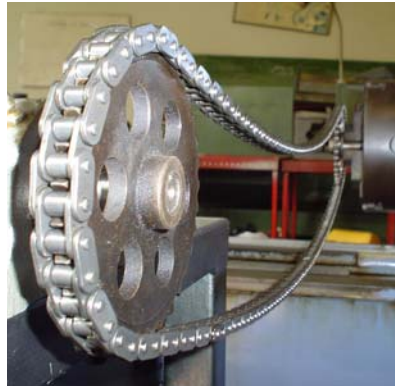


Figura 4.2 Sistema de catarinas y cadena utilizadas para la transmisión de potencia del torno al banco de pruebas.

El porcentaje de aumento en la velocidad de rotación es de:

$$\% \text{aumento} = \frac{40}{33} = 1.21$$

Por tanto, si el torno gira a 50 rpm. el eje del banco de pruebas gira a: $50 \times 1.21 = 60.6$ rpm. siéndo esta la velocidad utilizada en las pruebas descritas con anterioridad.

Segundo Verificar la velocidad de avance de la boquilla, esto se realiza observando la disposición de las palancas del torno en los controles del tornillo patrón, tal como cuando se necesita construir una rosca, la figura 4.3 muestra la disposición de las palancas en las pruebas realizadas en el presente trabajo.



Figura 4.3 Disposición de las palancas del sistema de control del tornillo patrón del torno utilizado para las pruebas de temple por flama.



La palanca de la derecha es la encargada de activar el tornillo patrón mientras que las palancas de en medio e izquierda crean una combinación tal que juntas producen una determinada velocidad de avance. Utilizando una combinación D-E-M se consigue una velocidad de velocidad de avance de 0.5 mm/rev, y ya que estamos utilizando una velocidad de rotación de 60.6 rpm (1.01 rev/s), se logra una velocidad de avance de:

$$g_{avance} = 0.5 \times 1.01 \cong 0.50 \text{ mm/s}$$

Tercero Asegurarse que el freno del plato del torno se encuentre activado (botón rojo del tablero de encendido del torno).

4.1.2 SISTEMA DE COMBUSTIÓN

Este sistema consta de muchos elementos los cuales se mencionan a continuación:

- a. Cilindro de Gas propano.
- b. Regulador de gas propano.
- c. Cilindro de oxígeno.
- d. Manómetros de oxígeno.
- e. Mangueras de propano y oxígeno.
- f. Regulador secundario de oxígeno.
- g. Válvulas de paso rápido para propano y oxígeno.
- h. Cámara mezcladora.
- i. Tubería de mezcla.
- j. Boquilla de temple por flama.
- k. Tubería del medio de enfriamiento.

Calibración del sistema de combustión Para obtener resultados satisfactorios en el temple de la probeta, debe de generarse una llama neutra o escasamente carburante con el objeto de que no exista descarburación del material por lo tanto la calibración del sistema de combustión es un factor clave en el tratamiento de temple por flama. A continuación se



detalla el proceso que debe llevarse a cabo para obtener una llama adecuada para el proceso:

Primero Verificar la presión del cilindro de oxígeno. La presión del cilindro deberá ser siempre mayor que la presión de salida del oxígeno ya que de lo contrario el cilindro estaría bajo de carga normal de trabajo. La figura 4.4 muestra el juego de manómetros utilizados en el cilindro de oxígeno, la presión en el cilindro es verificada en el manómetro de la derecha mientras que la presión de salida es verificada en el manómetro de la izquierda.



Figura 4.4 Juego de manómetros utilizado en el cilindro de oxígeno

Segundo Ajustar la presión de salida del oxígeno en 7 psi (0.5 bar)

Tercero Verificar la presión del cilindro de propano. De igual manera que se realizó para el cilindro de oxígeno, la presión del cilindro de propano se verifica en el manómetro de la derecha mientras que la presión de trabajo de propano es verificada en el manómetro de la izquierda en la figura 4.4.

Cuarto Ajustar la presión del combustible en 2 psi (0.14 bar).

Quinto Abrir parcialmente la válvula de regulación del combustible.

Sexto Encender la boquilla con un chispero.

Séptimo Aumentar el flujo de gas abriendo suavemente la válvula de oxígeno hasta obtener una llama totalmente carburante y amarilla.

Octavo Comenzar a abrir la válvula de oxígeno levemente hasta obtener una llama azul claro y más ruidosa.



Noveno Abrir totalmente la válvula de propano.

Décimo Abrir totalmente la válvula de oxígeno. Si la llama formada con estos valores de presiones es muy ruidosa y de color azul claro, regular directamente de la presión del oxígeno hasta obtener una llama como la que se presenta en la figura 4.5.

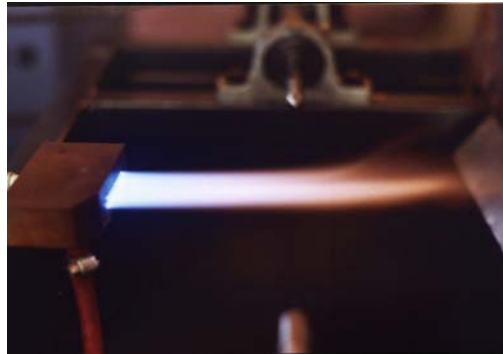


Figura 4.5 Tipo de llama utilizada en el proceso de temple superficial por flama.

Para colocar el espécimen en el banco de acoplamiento, se gira el tornillo-contrapunto hasta lograr la abertura necesaria para contener el espécimen (300 mm), como se presenta en la figura 4.6. Consecuentemente se sujeta el espécimen apretando nuevamente el tornillo-contrapunto y la contratuerca para evitar se aflojen ambos contrapuntos provocando que el espécimen se suelte o no gire adecuadamente.

4.1.3 PROCEDIMIENTO DEL TEMPLE POR FLAMA

Una vez descrito por separado es necesario describir como se realizan las pruebas con el sistema diseñado y las principales tareas a realizar antes de iniciar el temple de cualquier espécimen.

- a. *Preparación del espécimen a temprar* El espécimen tiene una longitud de 300 mm. El cual deberá refrentarse a ambos lados y perforarse con una broca para centros de 2.5 mm con el objeto de poder realizar el montaje entre puntos en le banco de pruebas como se presenta en la figura 4.6.

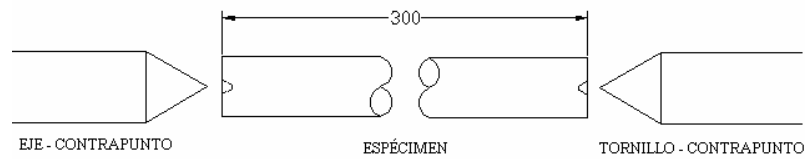


Figura 4.6 Forma de sujeción del espécimen a templar.

- b. *Verificación del paralelismo entre el torno y el banco de pruebas* Esta operación es necesaria e indispensable porque puede alterar los resultados del temple por flama, además de poner en riesgo la boquilla porque si esta llegará a chocar con la barra puede haber un estallido que de alguna forma deteriora los agujeros por donde sale la mezcla gas-oxígeno o en otros casos provocar accidentes en el operario. Con ayuda del torno se debe movilizar la boquilla paralelamente a la barra de prueba y corroborar iguales distancias de acoplamiento en uno y otro extremo cuando se ha movilizad la boquilla hacia los dos extremos de la barra como se presenta en las figura 4.7 y 4.8.

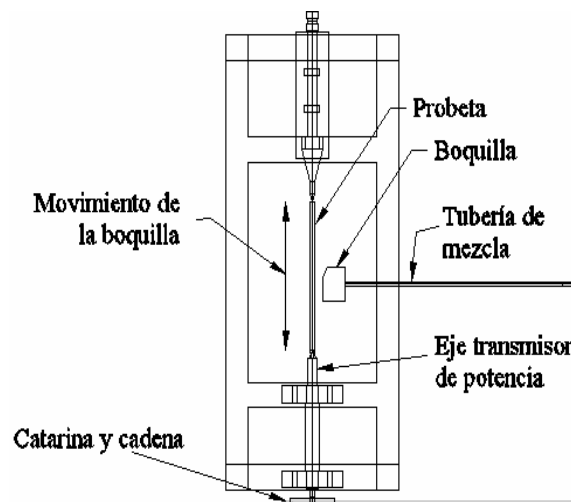


Figura 4.7 Banco de pruebas para el temple por flama de especímenes de 300 mm de longitud.

- c. *Verificación del nivel del banco de pruebas* Para ello se colocan niveles en los cuatro extremos del banco de pruebas y se regula la altura del banco de pruebas.



- d. *Calibración de la distancia de acoplamiento* Haciendo uso de un calibrador o pie de rey se hace las respectivas mediciones. Una vez hecho esto, se procede a colocar el nonio del carro transversal del torno en cero (0), y se retrocede el carro hasta una distancia prudencial para encender la llama, por lo que se debe tener en cuenta el número de vueltas que se ha retrocedido para volver al mismo punto.

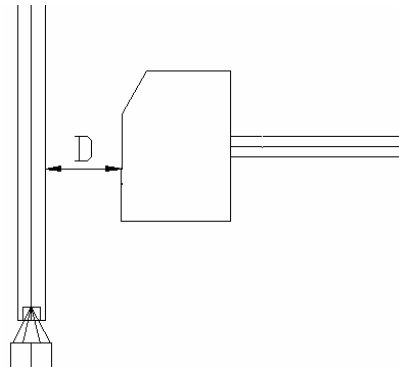


Figura 4.8 Distancia de acoplamiento

- e. *Verificación del sistema de avance de la boquilla* Esto indica la verificación de la velocidad de rotación y de la velocidad de avance de la boquilla, lo cual ha sido descrito en la sección 4.1.1.
- f. *Puesta en marcha del torno* El sistema automático de avance que se encuentra en el delantal de torno esta desembragado. Se enciende la bomba del torno pero se mantiene abierta parcialmente la válvula del sistema de enfriamiento.
- g. *Encendido de la llama* Esto indica realizar todos los pasos descritos en el apartado 4.1.2.
- h. *Ubicar distancia de acoplamiento* Movilizar la boquilla con ayuda del volante de avance transversal del torno transversalmente al espécimen hasta obtener la distancia de acoplamiento de prueba.
- i. *Embragar el sistema automático de avance del torno y abrir totalmente la válvula del sistema de enfriamiento.*
- j. *Proceso de temple por flama* Se debe tener cuidado que al acercarse la boquilla al extremo de la barra, ésta debe ser alejada para que no golpee las chumaceras, y debe ser apagada la llama cerrando primera la válvula del combustible y luego el oxígeno. El sistema de enfriamiento se deja por unos pocos segundos más.



- k. *Retracción de la boquilla* Retraer la boquilla lejos del espécimen para evitar choques con la chumacera del eje-contrapunto.
- l. *Cierre de válvulas de oxígeno y propano de sus respectivos tanques.*



Figura 4.9 Sistema de temple por flama acoplado a un torno. Al fondo se puede observar el banco de pruebas en donde es colocada el espécimen a templar. Montado en el portaherramientas se encuentra la boquilla tipo soplete.

4.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento se refiere a una cantidad determinada de actividades que deben realizarse con el objeto de conservar el servicio para el que fue diseñado cualquier dispositivo o elemento mecánico; para este caso, en particular va destinado a la conservación del quemador tipo soplete y sus componentes.

Con el cumplimiento de las recomendaciones para el mantenimiento del quemador, se puede disminuir el deterioro de la boquilla, del torno en donde se acopla el dispositivo y los demás componentes que están involucrados en el proceso de temple por flama.

- a) Comúnmente las fallas que se producen en un equipo o maquinaria son ocasionadas por:
- b) El dispositivo mismo es fuente de fallas cuando presenta deficiencias propias, debido a la calidad de material del que esta construido y/o un mal diseño.



- c) El ambiente circundante, que existe en el lugar donde el equipo presta sus servicios, en donde la alta humedad, temperaturas fuera de las recomendadas, polvo, salinidad o acidez, humo y otras; afectan las variables de operación del dispositivo.
- d) El personal que interviene en su operación cuando su forma de actuar no es la apropiada.

Para este caso el mantenimiento se basa en el control visual, el cual nos ofrece las siguientes ventajas:

- a) Ayuda a mejorar la calidad porque los parámetros dentro de los que deben estar las diferentes variables del proceso son fácilmente identificables en el sitio de operación.
- b) Ahorro de tiempo, tiempo para inspeccionar el dispositivo, para cambiar partes, para operar el equipo, para dar mantenimiento.
- c) Disminución de errores, pues la información esta visible en el mismo dispositivo.
- d) Aportan para que la gente que opera o mantiene el equipo sean más efectivos y eficientes en las tareas que desempeñan.
- e) Colaboran con la inducción de nuevo personal, al estar todo debidamente identificado y los procesos explicados en el sitio mediante diagramas de flujo.
- f) Ayudan en el entrenamiento del nuevo personal.
- g) Evitan accidentes.

En el caso de la boquilla para temple por flama, no se puede hablar de un programa de mantenimiento que deba seguirse, dadas las condiciones y el fin con el cual se ha construido, por lo tanto el mantenimiento se limita a realizarse cada vez que se ocupa el equipo.

A continuación se presentan las actividades de mantenimiento que se deben realizar para el óptimo estado del quemador tipo soplete.

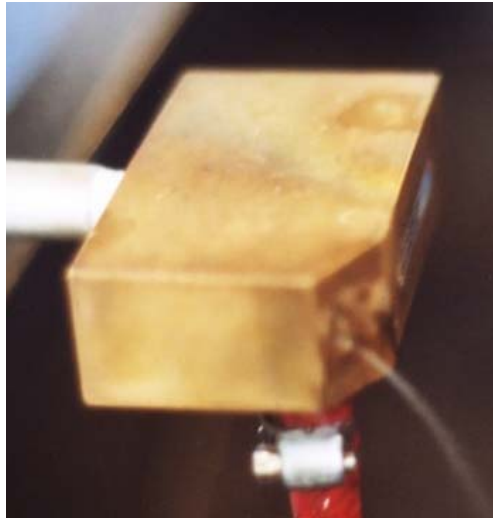


Figura 4.10 Quemador tipo soplete para temple por flama.

En cada inicio de operación:

- 1°. Limpiar los agujeros de la boquilla, con la herramienta respectiva (limpia boquilla) al igual que se hace para el orificio de un soplete de soldadura oxiacetilénica.
- 2°. Verificar el apriete de la abrazadera del sistema de enfriamiento, además para asegurarse que no exista obstrucción en los agujeros se recomienda accionar la bomba del torno y abrir totalmente la válvula del sistema de enfriamiento.
- 3°. Verificar el estado de las válvulas de oxígeno y combustible.
- 4°. Verificar que no existan fugas de gas combustible y oxígeno. Esto se realiza, manteniendo las válvulas cerradas y presurizando el sistema, luego con agua jabonosa aplicarla en cada empalme y a lo largo de las mangueras para verificar también el estado de éstas.

CAPITULO V



5. DETERMINACIÓN DE COSTOS

La determinación de costos para un determinado proyecto es un factor muy importante para tomar muchas decisiones en cuanto a procesos de fabricación, materiales, mano de obra y otro tipo de rubros, ya que la rentabilidad es preponderante en todo proyecto y las condiciones y disponibilidades que se tengan pueden definir si podrá llevarse a cabo físicamente.

En el presente capítulo se determinarán los costos incurridos para construir, probar y caracterizar una boquilla de temple por flama acoplada a un torno.

5.1 COSTOS INVOLUCRADOS

Para determinar el costo del trabajo de graduación se han separado estos en dos categorías las cuales son:

- 1°. Materia Prima: el cual se refiere específicamente al costo de los materiales de construcción del dispositivo.
- 2°. Mano de obra Directa: este rubro se refiere al costo de transformar la materia prima en el producto terminado.
- 3°. Mano de obra Indirecta: la que se refiere a la contribución que realiza la Universidad de El Salvador, a través de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por ejemplo el uso de equipo de laboratorio, máquinas herramientas, asesoría, etcétera.

A continuación se presentan las tablas que contienen las diferentes especificaciones de los costos del trabajo de graduación.



5.1.1 MATERIA PRIMA

Tabla 5.1 Materiales para construcción y uso de la boquilla

Descripción	Cantidad	P. U. (\$)	Total (\$)
Bronce fosforado 4 ½" x 1 ½"	1u	27.64	27.64
Barra de bronce Ø ½" x 3"	1u	0.59	0.59
Barra perforada de acero AISI 1020	1u	25.00	25.00
Barra de acero AISI 1045 ½" x 4 "	1u	0.31	0.31
Barra de acero AISI 1020 2 ¼" x 5"	1u	4.58	4.58
Manguera para propano	1u	175.00	175.00
Manguera para oxígeno	1u	150.00	150.00
Cilindro de propano 100 lbs.	1u	58.12	58.12
Cilindro de oxígeno	1u	193.72	193.72
Carga de oxígeno	1u	15.31	15.31
Carga de gas propano	1u	32.75	32.75
Regulador de presión (Propano)	1u	83.95	83.95
Regulador de presión (Oxígeno)	1u	135.60	135.60
Válvula de paso rápido ½"	1u	5.00	5.00
Válvula de paso rápido ¼"	1u	3.75	3.75
Nicle galvanizado ¼" x 2"	1u	0.45	0.45
Teflón	4u	0.25	1.00
		TOTAL	\$ 912.77

**Tabla 5.2 Materiales para Construcción de banco de pruebas**

Descripción	Cantidad	P. U. (\$)	Total
Tubo estructural chapa 14	2u	9.00	18.00
Lamina de hierro $\frac{1}{32}$ "	1u	22.00	22.00
Chumacera SKF 1"	2u	27.25	54.50
Rodamientos SKF 6203	2u	4.00	8.00
Catarina de 33 dientes	1u	8.90	8.90
Catarina de 40 dientes	1u	10.40	10.40
Cadena ADESCO (c/candado)	1u	17.53	17.53
Barra de acero AISI 01 $1\frac{1}{4}$ " x 5"	1u	8.03	8.03
Barra de acero VCN 150 2" x 7"	1u	15.07	15.07
Barra de acero AISI 1020 1" x 6"	1u	1.11	1.11
Barra de acero AISI 1020 1" x 15"	1u	2.69	2.69
Pletina AISI 1020 $\frac{3}{8}$ " x 3" x 200 mm	1u	4.71	4.71
Pletina AISI 1020 $\frac{1}{2}$ " x 2" x 4"	1u	2.47	2.47
Pintura Anticorrosivo (Color Negro)	$\frac{1}{4}$ gal	1.82	1.82
Solvente para pintura	1gal	6.00	6.00
TOTAL			\$ 181.23

5.1.1 MANO DE OBRA DIRECTA

Tabla 5.3 Costos de M. de O. para la construcción del banco de pruebas

Descripción	Cantidad	P. U. (\$)	Total
Mano de Obra del Tornero	10h	2.00	20.00
Mano de Obra del Soldador	8h	2.00	16.00
Mano de obra del pintor	2h	2.00	4.00
Uso de herramientas eléctricas manuales	8h	2.00	16.00
Uso de equipo de soldadura eléctrica	8h	2.00	16.00
Uso del torno	10h	2.00	20.00
Uso del compresor y equipo para pintar	2h	2.00	4.00
Disco para Corte	1u	5.00	5.00
Disco para pulir	1u	5.00	5.00
TOTAL			\$ 106.00

**Tabla 5.4 Costos de M. de O. para la construcción de la boquilla**

Descripción	Cantidad	P. U. (\$)	Total
Mano de obra del tornero	15h	2.00	30.00
Mano de obra del fresador	10h	2.00	20.00
Mano de obra del soldador	5h	2.00	10.00
Mano de obra del ensamblador	5h	2.00	10.00
Uso del torno	10h	2.00	20.00
Uso de la fresadora	10h	2.00	20.00
Uso del taladro de pedestal	5h	2.00	10.00
Uso del equipo de soldadura autógena	5h	2.00	10.00
Uso de herramientas manuales en Gral.	5h	5.00	25.00
TOTAL			\$ 155.00

5.1.2 COSTOS DEL PROYECTO

Los costos totales del trabajo de graduación son resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 5.5 Costos del Proyecto

Descripción	Cantidad	P. U. (\$)	Total
<i>Costos de Materia Prima</i>			
♦ Materiales para construcción de la boquilla	1	912.00	912.00
♦ Materiales para construcción del banco	1	181.23	181.23
<i>Costos de Mano de Obra Directa</i>			
♦ Construcción del banco de pruebas	1	106.00	106.00
♦ Construcción de la boquilla	1	155.00	155.00
SUBTOTAL			\$ 1354.23
Imprevistos (10%)			\$ 135.40
TOTAL			\$ 1489.63



CONCLUSIONES

La boquilla diseñada y construida es adecuada y funcional para efectuar el endurecimiento superficial de temple por flama.

Las barras con un diámetro de $\frac{1}{2}$ " son difíciles de someterse a endurecimiento superficial por flama, debido a que el calor rápidamente se propaga al centro del espécimen, lo cual puede ser atribuible a la cantidad de masa puesto que este efecto es directamente proporcional. Sin embargo, la utilización de propano se vuelve más aceptable debido a las propiedades de este combustible.

La distancia de acoplamiento recomendada es de 9 mm debido a las características metalográficas y a la curva de comportamiento de dureza.



RECOMENDACIÓN

Para poder tener la seguridad de reproducir la llama, es necesario contar con medidores de flujo, medidores de presión más precisos en el orden de milibares, y medidores de productos de combustión, los cuales deben ser adquiridos por la escuela de Ingeniería Mecánica.



BIBLIOGRAFIA

Anthony F. Mills, **TRANSFERENCIA DE CALOR**. Addison-Wesley Iberoamericana S.A. España 1994.

ASM HANDBOOK, HEAT TREATING. Volumen 4, USA 1996.

Asociación Salvadoreña de Industriales. Centro de capacitación industrial. **LA EFICIENCIA EN LA OPERACIÓN DE CALDERAS**.

B. V. Karlekar & R. M. Desmond, **TRANSFERENCIA DE CALOR**. Nueva Editorial Interamericana, S.A. de C.V. México. 1985.

Claudio Mataix. **MECÁNICA DE FLUIDOS Y MÁQUINAS HIDRAULICAS**. 2ª Edición. HARLA. México. 1982.

Frank Kreith, Marck S. Bohn. **PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR**. Editorial Thomson & Learning. México. 2001.

Frank P. Incropera & David P. De UIT, **FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR**. PRENTICE HALL, México. 1999.

Frank R. Palmer; George V. Luerssen; Joseph S. Pendleton Jr. **ACERO PARA HERRAMIENTAS**. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S. A. México. 1986.

Henry Orwitz, **SOLDADURA: APLICACIONES Y PRÁCTICA**, ediciones AlfaOmega S.A. de C.V, México 1990.

J. M. Kay, **INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS Y TRANSFERENCIA DE CALOR**. Editoriales Técnica MARCOMBO, S.A. Barcelona 1964.

John H. Perry. **MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO**. 1959



José A. Manrique, **TRANSFERENCIA DE CALOR**. Harper & Row Latinoamericana. México. 1981.

Joseph Edward Shigley & Charles R. Mischke. **DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA**. 5ª Edición. McGraw Hill Interamericana. México. 1990.

Kart-Erik Thelning **STEEL AND ITS HEAT TREATMENT. BOFORS HANDBOOK**, editorial Butterworths Group. Primera edición, Inglaterra 1967.

Keith Cornwell. **TRANSFERENCIA DE CALOR**. Editorial LIMUSA, S.A. México, 1981.

Organización Interamericana del Trabajo. Programa de Actividades Sectoriales. **PROYECTO DE REPERTORIO DE RECOMENDACIONES PRÁCTICAS SOBRE LA SEGURIDAD Y LA SALUD EN LAS INDUSTRIAS DE LOS METALES COMUNES**. Ginebra. 2001

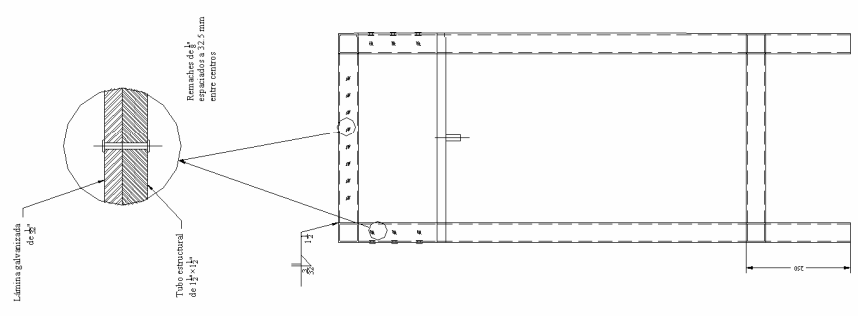
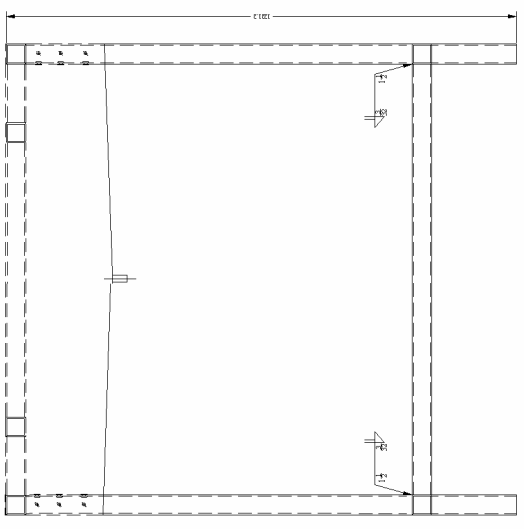
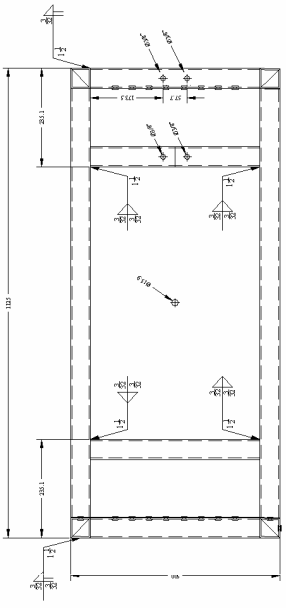
Robert W. Fox & Alan T. McDonald. **INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE FLUIDOS**. 2ª Edición. Nueva Editorial Interamericana. México. 1984.

Sydney H. Avner, **INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FÍSICA**, editorial McGraw-Hill. Segunda Edición, México 1980.

www.cflame.com

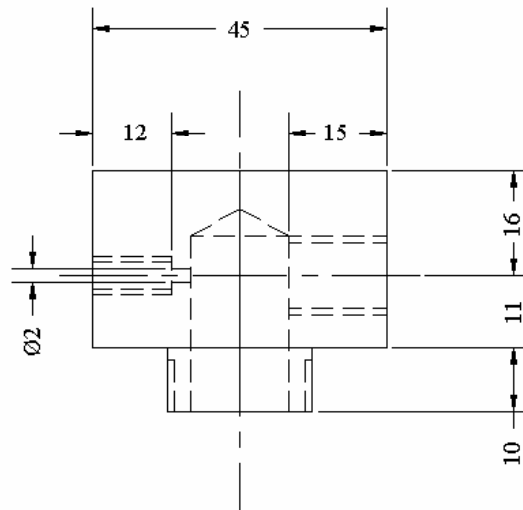
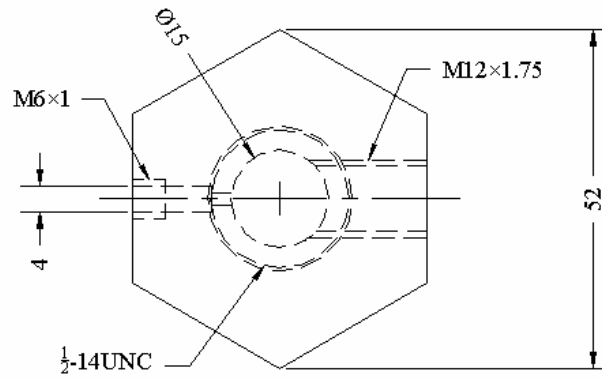
www.flametreatingsystems.com

PLANOS

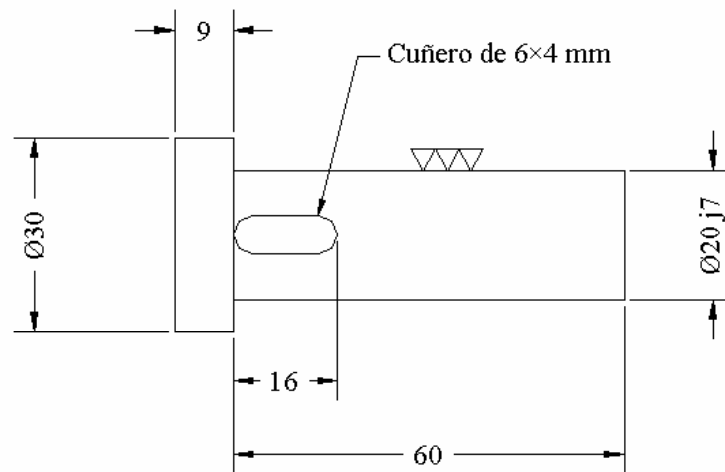


Resumen de Datos		Código de Proyecto	
1	3122	1	1
2	3122	2	2
3	3122	3	3
4	3122	4	4
5	3122	5	5
6	3122	6	6
7	3122	7	7
8	3122	8	8
9	3122	9	9
10	3122	10	10
11	3122	11	11
12	3122	12	12
13	3122	13	13
14	3122	14	14
15	3122	15	15
16	3122	16	16
17	3122	17	17
18	3122	18	18
19	3122	19	19
20	3122	20	20
21	3122	21	21
22	3122	22	22
23	3122	23	23
24	3122	24	24
25	3122	25	25
26	3122	26	26
27	3122	27	27
28	3122	28	28
29	3122	29	29
30	3122	30	30
31	3122	31	31
32	3122	32	32
33	3122	33	33
34	3122	34	34
35	3122	35	35
36	3122	36	36
37	3122	37	37
38	3122	38	38
39	3122	39	39
40	3122	40	40
41	3122	41	41
42	3122	42	42
43	3122	43	43
44	3122	44	44
45	3122	45	45
46	3122	46	46
47	3122	47	47
48	3122	48	48
49	3122	49	49
50	3122	50	50
51	3122	51	51
52	3122	52	52
53	3122	53	53
54	3122	54	54
55	3122	55	55
56	3122	56	56
57	3122	57	57
58	3122	58	58
59	3122	59	59
60	3122	60	60
61	3122	61	61
62	3122	62	62
63	3122	63	63
64	3122	64	64
65	3122	65	65
66	3122	66	66
67	3122	67	67
68	3122	68	68
69	3122	69	69
70	3122	70	70
71	3122	71	71
72	3122	72	72
73	3122	73	73
74	3122	74	74
75	3122	75	75
76	3122	76	76
77	3122	77	77
78	3122	78	78
79	3122	79	79
80	3122	80	80
81	3122	81	81
82	3122	82	82
83	3122	83	83
84	3122	84	84
85	3122	85	85
86	3122	86	86
87	3122	87	87
88	3122	88	88
89	3122	89	89
90	3122	90	90
91	3122	91	91
92	3122	92	92
93	3122	93	93
94	3122	94	94
95	3122	95	95
96	3122	96	96
97	3122	97	97
98	3122	98	98
99	3122	99	99
100	3122	100	100

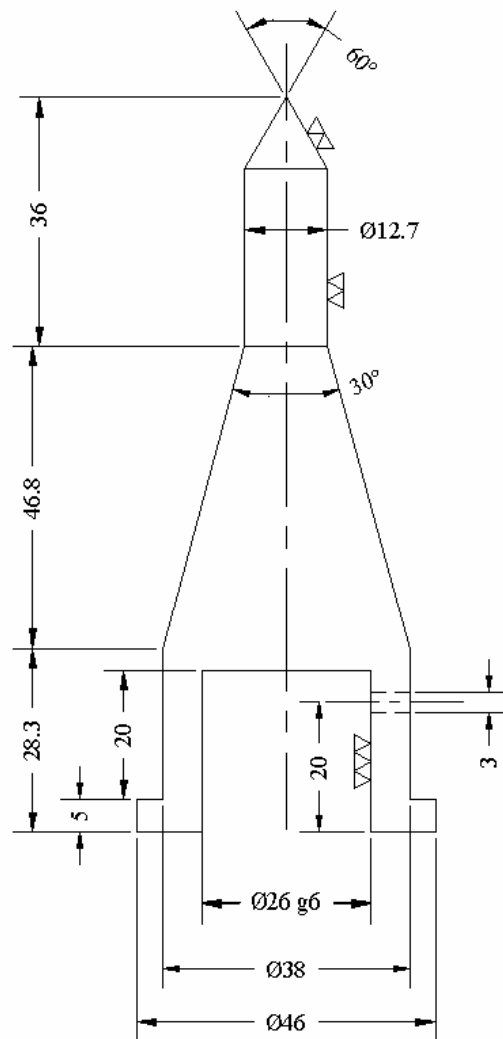
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VALENCIA
 ESCUELA DE INGENIERIA DE EDIFICACIONES



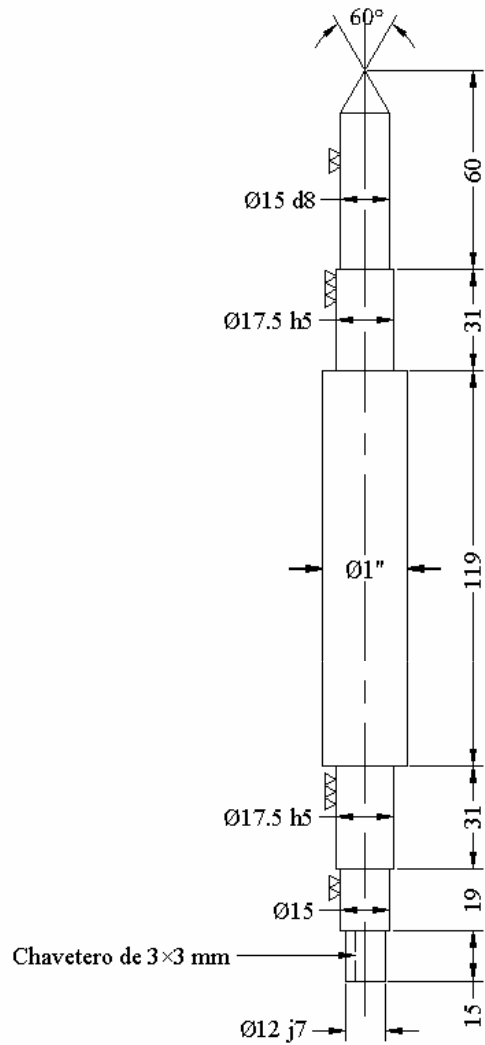
	1	Camára de Mezcla	Acero AISI 1020	Ø2 ¹ / ₈ ×5"	
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Medidas en bruto	Trat.térmico
Tiempo	5 horas	Escala	1:1	Fecha:	4 de julio de 2004
<i>Diseño, Construcción y Pruebas de una boquilla de temple por flama acoplada a un torno con fines didácticos</i>				Dibujado por Nelson Javier Méndez Montes Valeriano Vladimir Valdez Galicia	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				ISO A	



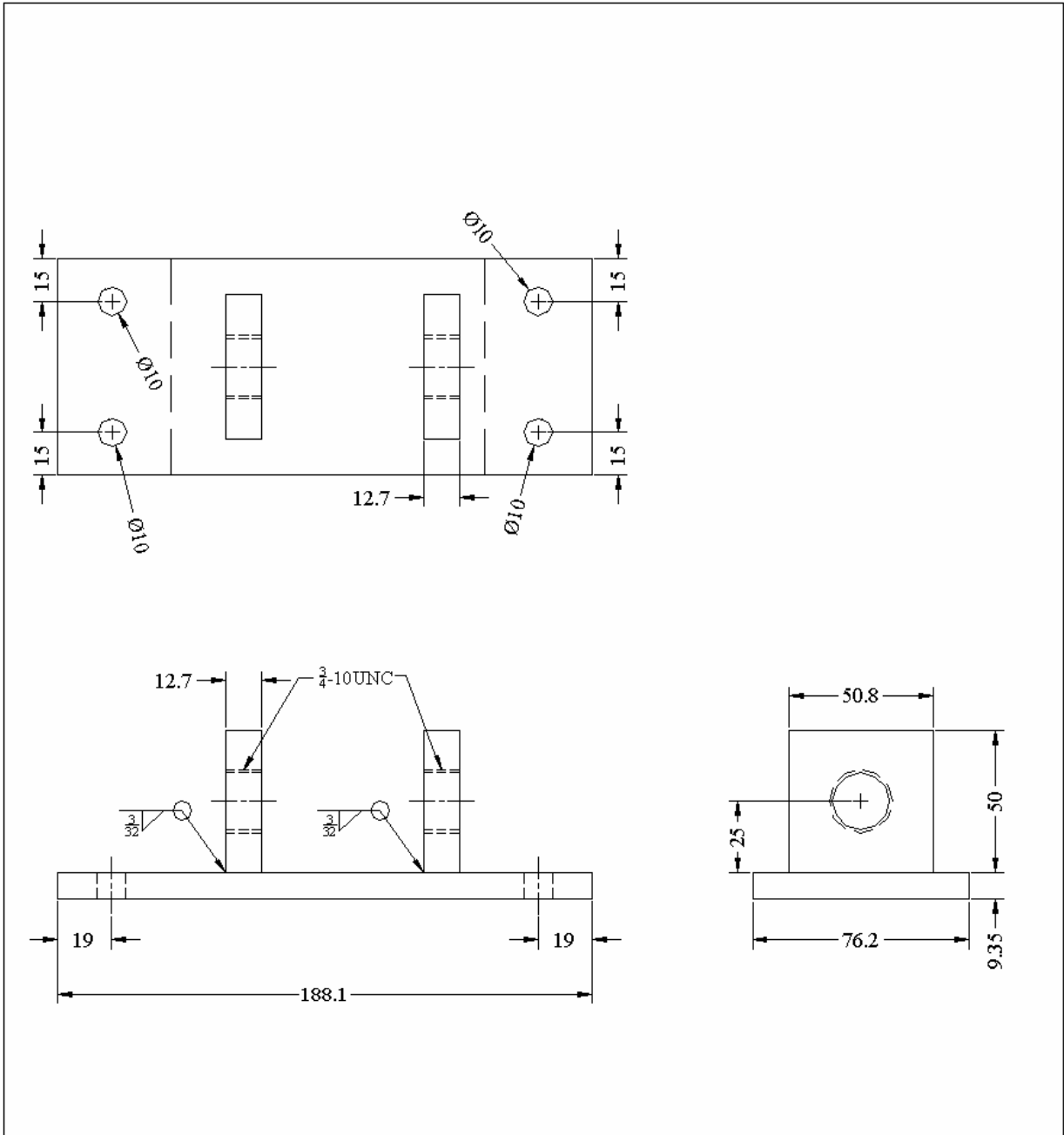
	1	Eje de acople	Acero AISI 1080	$\text{Ø}1\frac{1}{4}'' \times 5''$	
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Medidas en bruto	Trat. térmico
Tiempo	3 horas	Escala	1:1	Fecha	5 de julio de 2004
<i>Diseño, Construcción y Pruebas de una boquilla de temple por flama acoplada a un torno con fines didácticos</i>				Dibujado por Nelson Javier Méndez Montes Valeriano Vladimir Valdez Galicia	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				ISO A	



	1	Contrapunto giratorio	Acero AISI 4340	$\text{Ø}1\frac{1}{8}'' \times 7''$	
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Medidas en bruto	Trat.térmico
Tiempo	3 horas	Escala	1:1	Fecha	
<i>Diseño, Construcción y Pruebas de una boquilla de temple por flama acoplada a un torno con fines didácticos</i>				Dibujado por: Nelson Javier Méndez Montes Valeriano Vladimir Valdez Galicia	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				ISO A	



	1	Eje transmisor de potencia	Acero AISI 1020	Ø1" x 15"	
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Medidas en bruto	Trat. térmico
Tiempo	3 horas	Escala	1:2	Fecha	5 de julio de 2004
<i>Diseño, Construcción y Pruebas de una boquilla de temple por flama acoplada a un torno con fines didácticos</i>				Dibujado por Nelson Javier Méndez Montes Valeriano Vladimir Valdez Galicia	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				ISO A	



	1	Soporte del centropunto	Acero AISI 1020	Ø1"×15"	
Pos.	Cant.	Denominación	Material	Medidas en bruto	Trat.témico
Tiempo	5 horas	Escala	1:2	Fecha	5 de julio de 2004
<i>Diseño, Construcción y Pruebas de una boquilla de temple por flama acoplada a un torno con fines didácticos</i>				Dibujado por Nelson Javier Méndez Montes Valeriano Vladimir Valdez Galicia	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				ISO A	



6	Desbastado		Calibrador	Fresa de Ø10mm	28	365	-	2.8	5
Desbastado y Acabado de la superficie paralela. Ajustar a la altura requerida por la pieza.					40	525	-	1.75	3
5	Desbastado		Calibrador	Fresa de Ø10mm	28	365	-	2.8	5
Desbastado y Acabado de la superficie.					40	525	-	1.75	3
4	Desbastado		Calibrador	Fresa de Ø10mm	28	365	-	5.3	5
Desbastado y Acabado de la superficie paralela. Ajustar a la altura requerida por la pieza.					40	525	-	1.75	3
3	Desbastado		Calibrador	Fresa de Ø10mm	28	365	-	5.3	5
Desbastado y Acabado de la superficie.					40	525	-	1.75	3
2	Refrentado		Calibrador	Herramienta para refrentar	28	365	-	2.5	2
Desbastado y Acabado de la superficie. Ajustar a la altura requerida por la pieza.					40	525	-	1.35	1
1	Refrentado		Calibrador	Herramienta para refrentar	28	365	-	2.5	2
Desbastado y Acabado de la superficie.					40	525	-	1.35	1
N		CROQUIS	Instrumentos	Herramientas	v(m/s)	rpm	a/mm1	p/mm	# Pas
OPERACIONES					FACTORES DE CORTE				
Hoja de Trabajo Cabeza de flama (Hoja 1/3)									
Diseño, Construcción y Pruebas de una boquilla de temple por flama acoplada a un torno con fines didácticos									
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				Elaborado por: Méndez Montes, Nelson Javier Valdéz Galicia, Valeriano V.					



12	Perforado		Calibrador Granete Martillo	Broca Ø 1/32"	-	-	-	-	-
Perforación de 9 agujeros con espaciamento de 2.5 mm					40	525	-	-	-
11	Desbastado		Calibrador Goniometro	Fresa de Ø10mm	-	-	-	-	-
Fabricación de superficie a 30°					40	525	-	-	-
10	Taladrado		Calibrador	Broca Ø 10mm	28	365	-	5.3	5
Perforación con 17.7 mm de profundidad, perpendicular a los agujeros perforados con anterioridad.					40	525	-	1.75	3
9	Taladrado		Calibrador	Broca Ø 12 mm	-	-	-	-	-
Perforación con 10 mm de profundidad sobre la anterior.					40	525	-	-	-
8	Taladrado		Calibrador	Broca Ø 10mm	-	-	-	-	-
Perforación con 60.8 mm de profundidad a 35 mm de la arista en la superficie de 82.55mm					40	525	-	-	-
7	Taladrado		Calibrador	Broca Ø 10mm	-	-	-	-	-
Perforación con 60.8mm de profundidad a 10mm de la arista. Superficie de 50.8mm					40	525	-	-	-
N	OPERACIONES	CROQUIS	Instrumentos	Herramientas	v(m/s)	rpm	a/mm1	p/mm	# Pas
					FACTORES DE CORTE				
Hoja de Trabajo Cabeza de flama (Hoja 2/3)									
Diseño, Construcción y Pruebas de una boquilla de temple por flama acoplada a un torno con fines didácticos									
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA					Elaborado por: Méndez Montes, Nelson Javier Valdéz Galicia, Valeriano V.				



16	Machuelado									
Fabricación de rosca M12, con profundidad de 10 mm			Calibrador	Machuelo M12	28 40	365 525	- -	5.3 1.75	5 3	
15	Machuelado									
Fabricación de rosca M10, con 8 mm de profundidad			Calibrador	Machuelo M10	28 40	365 525	- -	5.3 1.75	5 3	
14	Machuelado									
Fabricación de rosca M10, con 5 mm de profundidad			Calibrador	Machuelo M10	28 40	365 525	- -	2.5 1.35	2 1	
13	Perforado									
Perforación de 47 agujeros con distanciamiento de 2.5 mm entre centros			Trazador Calibrador Granete Martillo	Broca Ø 1/32"	- 40	- 525	- -	- -	- 1	
N										
OPERACIONES		CROQUIS	Instrumentos	Herramientas	v(m/s)	rpm	a/mm1	p/mm	# Pas	FACTORES DE CORTE
Hoja de Trabajo		Cabeza de flama	(Hoja 3/3)							
Diseño, Construcción y Pruebas de una boquilla de temple por flama acoplada a un torno con fines didácticos										
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA					Elaborado por: Méndez Montes, Nelson Javier Valdéz Galicia, Valeriano V.					



12	Refrentado		Calibrador Plato de cuatro garras independens Comparador de reloj	Herramienta para refrentar	-	-	-	-	-
	Ajustar la pieza a las dimensiones dadas en el plano				40	525	-	-	1
11	Machuelado		Calibrador	Juego de machuelos M6	-	-	-	-	-
	Fabricacion de rosca M6				40	525	-	-	1
10	Taladrado		Calibrador	Broca Ø 2 mm Broca Ø 4 mm	28 40	365 525	-	5-3 1.75	5 3
	Inicialmente se perforará un agujero de Ø2 mm hasta enlazar con los agujeros anteriores, a continuacion se taladra una profundidad de 5mm para roscar posteriormente								
9	Machuelado		Calibrador	Juego de machuelos M12	-	-	-	-	-
	Fabricacion de rosca M12				40	525	-	-	1
8	Taladrado		Calibrador	Broca Ø 10mm	-	-	-	-	-
	Perforación para rosca M12				40	525	-	-	1
7	Fresado		Calibrador	Fresa de Ø10mm	-	-	-	-	-
	Desbastado y Acabado de hexagono (45mm entre caras)				40	525	-	-	1
N		CROQUIS	Instrumentos	Herramientas	v(m/s)	rpm	a/mm1	p/mm	# Pas
OPERACIONES					FACTORES DE CORTE				
Hoja de Trabajo Cámara de mezcla					(Hoja 2/2)				
Diseño, Construcción y Pruebas de una boquilla de temple por flama acoplada a un torno con fines didácticos									
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				Elaborado por: Méndez Montes, Nelson Javier Valdéz Galicia, Valeriano V.					