

## **XI.2. Temple a la llama**

Es un proceso de tratamiento térmico en el cual la superficie de una aleación ferrosa templable, es calentada rápidamente por encima de la temperatura de transformación mediante la aplicación directa de una llama de alta temperatura o por los productos de combustión de gases, y luego enfriada a una velocidad tal que pueda producir la estructura y dureza deseable.

La llama de alta temperatura es obtenida por la combustión de una mezcla de un gas combustible con oxígeno o aire, en distintos tipos de cabezales y picos.

Normalmente se puede obtener profundidades de temple de 0.8 a 6.5 mm o más, dependiendo del gas combustible usado, el diseño del cabezal de combustión, el tiempo de calentamiento, la templabilidad del material, el medio de temple y el método. El proceso puede usarse para un temple total de piezas hasta 70 mm. o menos de diámetro, dependiendo de la templabilidad del acero.

### **XI.2.1. Métodos de temple a la llama**

La versatilidad de los equipos de temple a la llama y el amplio rango de las condiciones de calentamiento que puede obtenerse con los quemadores de gas, permiten una variedad considerable de métodos; los principales son:

- 1— Estacionario
- 2— Progresivo
- 3— Rotativo
- 4— Combinación de progresivo y rotativo

La selección del método apropiado depende de la forma, el tamaño y composición de la pieza, el área a ser endurecida, la profundidad de capa requerida y el número de piezas a ser endurecidas. En muchas circunstancias, los resultados deseados pueden obtenerse empleando más de un método, la elección dependerá de los costos comparativos.

#### **XI.2.1.1- Método estacionario**

Como se representa en la fig. XI.16, consiste en el calentamiento localizado en el área seleccionada con un adecuado cabezal de llama, seguido de un temple.

El diseño del cabezal de calentamiento puede ser de uno o múltiples orificios, dependiendo de la extensión del área a calentar. El calentamiento debe estar balanceado para obtener temperatura uniforme en toda el área elegida. Después del calentamiento, normalmente las piezas se templean por inmersión o por chorro.

Básicamente, el método estacionario no requiere un equipo elaborado (excepto algunos dispositivos y temporizadores para asegurar la uniformidad del proceso en cada pieza), no obstante la operación puede automatizarse para el calentamiento y temple posterior.

#### **XI.2.1.2. Método progresivo**

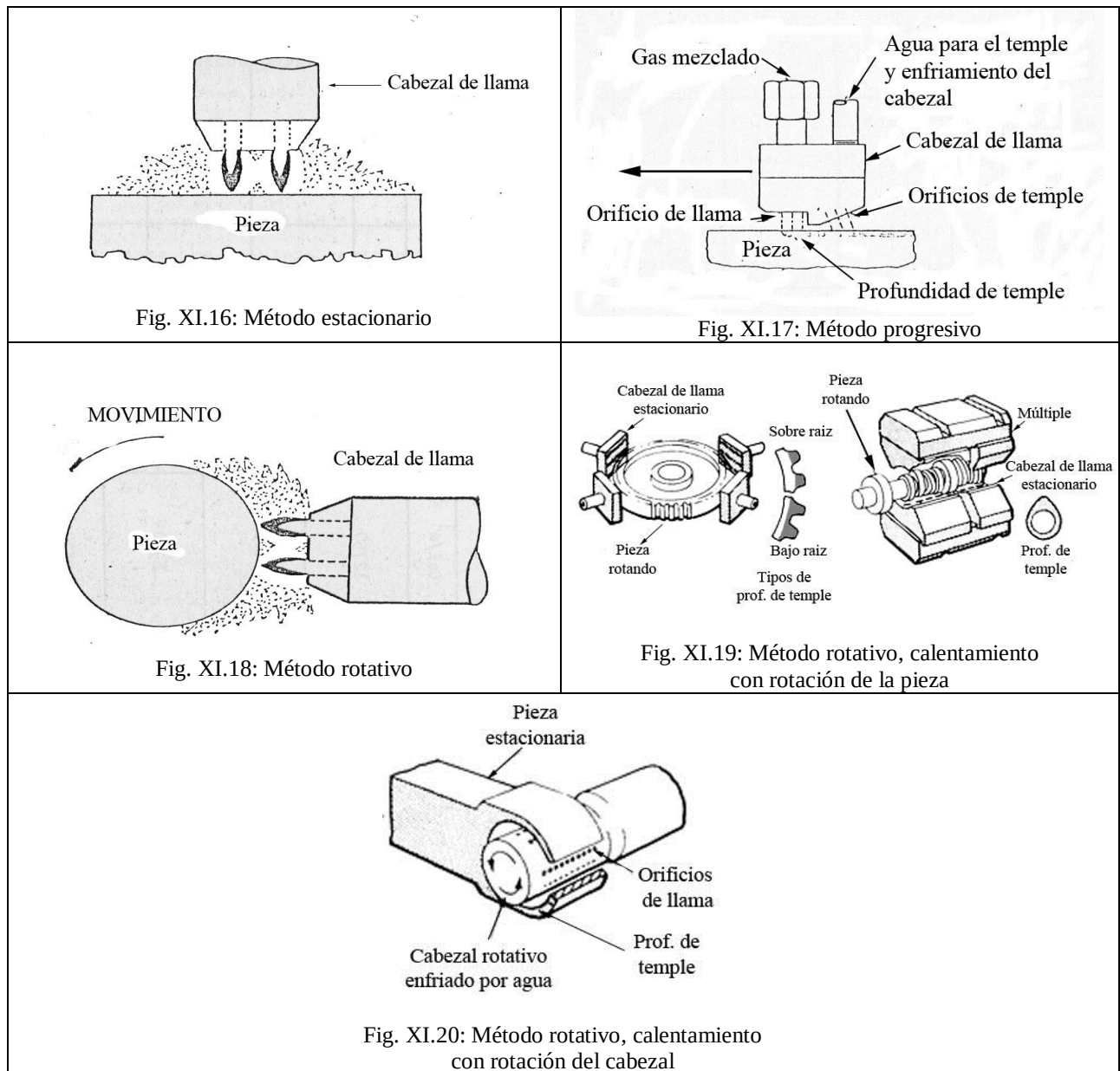
Se lo ilustra en la Fig. XI.17. Permite endurecer grandes áreas, mayores a lo posible con el método estacionario. En el método progresivo, el cabezal de llama es usualmente del tipo de orificio múltiple, y el cabezal de temple puede estar integrado al de calentamiento o separado de éste. El cabezal de llama calienta progresivamente un área de profundidad delgada, que es posteriormente templada por la ducha de enfriamiento.

El equipo necesario consiste en uno o más cabezales de llama y de temple montados sobre un carro transportador que se mueve sobre un carril a una velocidad regulada y uniforme (los pantógrafos para corte por llama son adaptables a este tipo de trabajo).

Las piezas o los quemadores pueden montarse en una mesada giratoria o torno, ya sea que el cabezal de llama o la pieza realicen el movimiento longitudinal para el temple progresivo.

El límite de longitud a ser templada, depende de la longitud del carril sobre el que se mueve el cabezal de llama.

La velocidad de movimiento del cabezal de llama sobre la superficie de la pieza, está determinada principalmente por la capacidad de calentamiento de los quemadores, la profundidad de capa requerida, la



composición y forma de la pieza, el tipo de temple utilizado. Las velocidades de temple varían de 0.8 a 5.0 mm/seg. El medio de temple es usualmente agua a temperatura ambiente, pero pueden utilizarse medios menos severos como agua caliente, o solución de aceite soluble.

### XI.2.1.3. Método rotativo

Se ilustra en las Fig. XII.18, 19 y 20; se aplica a redondos o piezas semiredondas como ruedas, levas o engranajes pequeños. En su forma más simple, el método emplea un mecanismo para rotación de la pieza en plano horizontal o vertical, mientras la superficie es calentada por un cabezal de llama.

Se emplean uno o más cabezales de llama, enfriados con agua, iguales en ancho a la zona a ser calentada. No es tan importante la velocidad de rotación, siempre que se obtenga uniformidad de temperatura en la superficie calentada.

Posteriormente a que la superficie alcanza la temperatura deseada, se corta la llama y la pieza se separa del dispositivo y se temple por inmersión o por chorro o por combinación de ambos.

El método puede automatizarse y permite, por ejemplo, templear simultáneamente todas las levas de un árbol de levas. En contraste con el método progresivo, en el cual se utiliza normalmente acetileno (a causa de su alta temperatura de llama y rápida velocidad de calentamiento), se pueden obtener excelentes resultados usando gas natural, propano o gas manufacturado. La elección del gas combustible depende de la forma, tamaño y composición de la pieza, de la profundidad de temple y del costo relativo y disponibilidad del gas combustible.

En el método rotativo se puede utilizar una amplia gama de medios de temple. Dado que la llama se retira de la pieza antes de temprar, es posible el uso de aceite de temple si se utiliza inmersión; pero en el temple por chorro normalmente se usa agua o soluciones de aceite soluble.

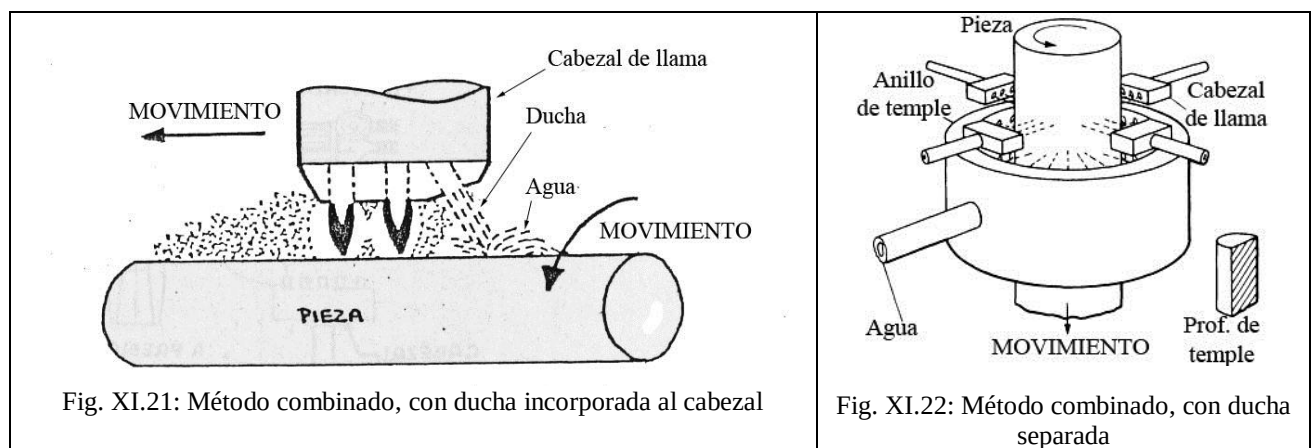
El ancho del cabezal de llama determinará aproximadamente el ancho de la zona a temprar, pero generalmente se necesita que un 30 a 40 % de la longitud de la circunferencia esté cubierta por la llama en todo momento del calentamiento para lograr profundidad y uniformidad de temple correcto.

#### XI.2.1.4. Método combinado progresivo y rotativo

Se muestra en las Fig. XI.21 y 22; combina ambos procesos para el temple de piezas largas como ejes, rodillos y tubos. La pieza rota y se traslada longitudinalmente atravesando los cabezales de calentamiento desde un extremo hasta el otro, mientras sólo se calienta una banda circunferencial.

El enfriamiento se produce inmediatamente, en forma de ducha proveniente de un anillo de temple que puede formar parte integral del cabezal de calentamiento o bien estar separado.

Este método permite temprar grandes superficies con caudales de gas relativamente bajos, y equipos que pueden adaptarse a diversos diámetros y longitudes de piezas.



#### XI.2.2. Gases combustibles

En temple a la llama se utilizan diferentes gases. La selección para cada aplicación, deberá basarse en la velocidad de calentamiento requerida, el costo del gas como así también el del equipo y su mantenimiento.

Un parámetro muy útil para relacionar la velocidad de calentamiento de diferentes gases con el oxígeno, es la "intensidad de combustión". Esto es el producto de la velocidad normal de quemado de la llama por el calor de combustión neto de la mezcla de oxígeno y gas combustible. El conocimiento de estos dos parámetros y la temperatura de la llama, permiten seleccionar el gas combustible más adecuado para alguna específica velocidad de temple y profundidad de capa.

Los gases combustibles comerciales de mayor uso están ordenados en función de la intensidad de combustión en el siguiente orden: acetileno, MAPP (acetogen<sup>1</sup>), propano, gas natural (metano) y gases manufacturados. Las propiedades de estos gases se detallan en la tabla XIb.1

**XI.2.2.1. Profundidad de calentamiento:** las profundidades del temple pequeñas (menos de 3 mm) se pueden lograr sólo con mezclas de oxígeno-gas combustible; la alta temperatura de llama lograda con estas mezclas, proveen la rápida transferencia de calor necesaria para alcanzar la profundidad efectiva. Profundidades de temple mayores permiten el uso de mezclas de aire-gas combustible, además de la mencionada arriba.

Las mezclas de oxígeno-gas combustible localizan el calor pero debe cuidarse de no producir sobre-calentamiento en la superficie cuando se desea profundizar el temple. Las mezclas de aire-gas combustible

<sup>1</sup> El acetogen es un gas inflamable, incoloro, con un ligero olor en altas concentraciones. Gas Combustible alternativo que produce velocidades intermedias de soldaduras entre propano y acetileno, de igual forma su temperatura de llama es inferior que el acetileno y mayor que el propano.

con su menor velocidad para la transferencia de calor (menor temperatura de llama), minimiza o elimina el sobrecalentamiento superficial pero generalmente extiende la profundidad de calentamiento más allá de los límites deseados.

Por esta razón, los temple a la llama con aire-gas combustible están generalmente limitados a aceros de baja templabilidad; de esta manera la profundidad de temple está controlada más por el temple que por el calentamiento. La mayor profundidad que se obtiene con las mezclas aire-gas combustible, también puede provocar una mayor distorsión en la pieza, por lo que se deben considerar los factores de tamaño, forma y profundidad de temple requeridos para seleccionar la mezcla adecuada para el calentamiento.

**XI.2.2.2. Consumo de gas. Tiempo y velocidad:** el consumo de gas varía proporcionalmente con el espesor de la capa que se desea obtener. Además, cuanto mayor es el espesor de las piezas, mayor será el consumo de gas debido al enfriamiento que produce la masa interior.

Para lograr la ventaja de la máxima temperatura de llama de la mezcla oxígeno-gas combustible, la distancia desde el extremo del cono interno de la llama a la pieza debería ser de 1,5 mm.

La velocidad del cabezal de llama en el método progresivo, como así también el tiempo de calentamiento para los métodos estacionarios y rotativos, varían con el espesor de capa deseada y la capacidad del cabezal. La velocidad de los métodos progresivos y combinados, varía usualmente entre 0,8 y 5 mm/seg.; no obstante, las piezas muy delgadas pueden requerir velocidad de 40 mm/seg. para evitar sobrecalentamiento o quemado.

Las relaciones tiempo-temperatura-profundidad para varios gases combustibles se muestran en las Fig. 23, 24 y 25 para los métodos estacionarios, rotativos y progresivos.

La gráfica de la Fig. 23, correspondiente al método estacionario fue obtenida analíticamente considerando la transferencia de calor en tres dimensiones desde el centro de calentamiento de una superficie de apoyo de un balancín. Los cálculos se basan en fuentes de calor de diferentes potencias que varían con la intensidad de combustión de los gases considerados (acetileno, propano y gas natural). La potencia de la fuente de calor también se ve afectada por factores como tamaño del pico, distancia del pico a la pieza, flujo total de gas y relación oxígeno-gas combustible, de allí que las curvas indican una tendencia en la relación tiempo-temperatura-profundidad antes que proveer valores operacionales estrictos.

Las curvas de relación tiempo-temperatura-profundidad para el método rotativo, mostrado en la Fig. 24 fueron obtenidas analíticamente considerando que la transferencia de calor fluye hacia el interior desde la superficie exterior de un cuerpo cilíndrico calentado uniformemente desde una fuente de calor. Además se presumió que la temperatura en el eje central no debería elevarse apreciablemente durante un calentamiento realizado de tal forma que asegurara temperatura uniforme en la superficie.

Las curvas del método progresivo que muestra la Fig. 25, fueron obtenidas analíticamente considerando la transferencia de calor dentro del cuerpo desde una fuente lineal moviéndose a lo largo del lado plano del cuerpo. El tiempo puede relacionarse con la velocidad siempre que se conozca el ancho de la zona de llama. Por ejemplo, una zona de llama de 25 mm de ancho pasará sobre un punto de la pieza en 15 seg. si la velocidad de carrera del cabezal de calentamiento es de 100 mm./min (1,7 mm/seg). Este ancho de llama indica la probabilidad de un cabezal multihilera de picos y, si la fuente de calor es todo lo potente que se presume en el cálculo de las curvas, sin duda dañará la superficie del acero; consecuentemente debería usarse una mayor velocidad de carrera; por ejemplo, 150 mm/min calentaría un punto de la pieza en 10 seg. resultando en una profundidad de temple de alrededor de 2,5 mm.

El rápido decrecimiento de la temperatura a elevados valores de tiempo es debido al efecto de temple de la masa, el cual en la práctica se aumenta por la ducha de agua u otro medio de temple.

### XI.2.3. Quemadores y equipo auxiliar

Los quemadores son los componentes básicos de todos los métodos de temple a la llama. Varían en su diseño, según se utilice mezcla de gas-oxígeno o de gas-aire.

La temperatura de llama obtenida por la combustión de gas-oxígeno alcanza a 2500° C o más; la transferencia de calor es producida por el impacto directo de la llama sobre la superficie de la pieza. Por esta razón los quemadores oxi-gas, son llamados comúnmente cabezales de llama.

Las temperaturas de llama obtenidas con mezclas gas-aire son considerablemente menores (1800° C ó más) y la transferencia de calor es debida al impacto de productos gaseosos de combustión de alta velocidad (no llama directa) o por la radiación de una superficie refractaria incandescente.

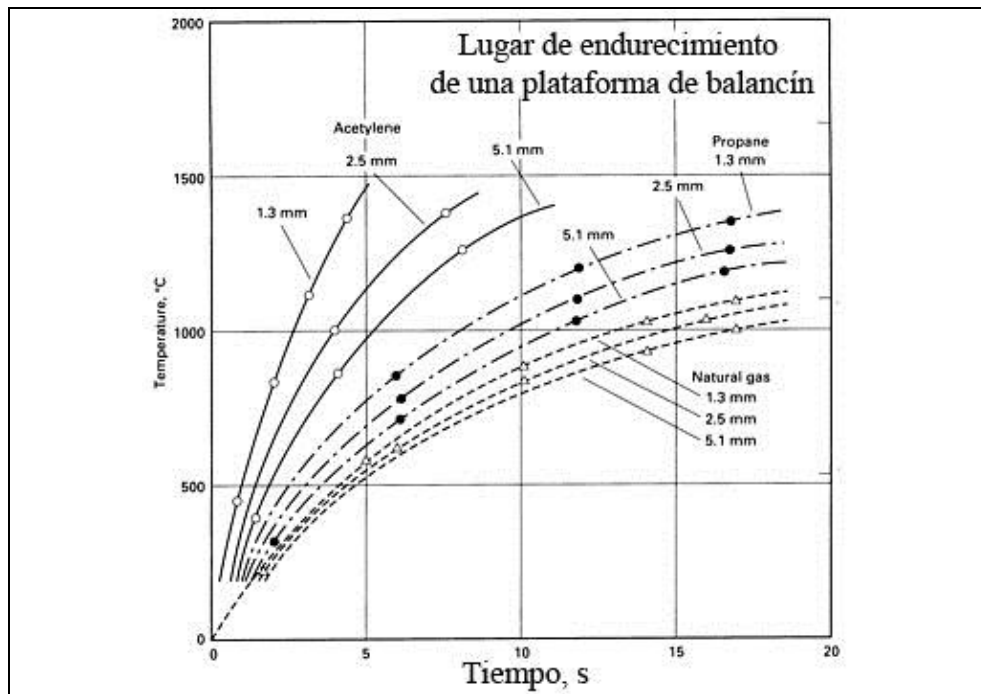


Fig. 23: Curvas Tiempo-Temperatura-Profundidad, para Método Estacionario

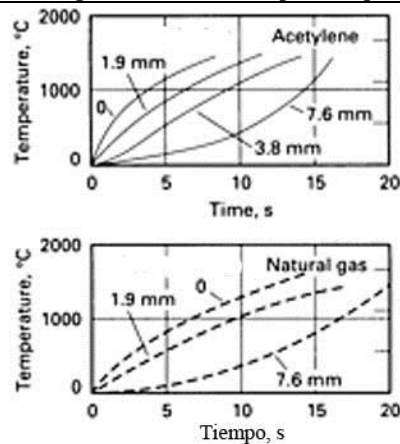


Fig. 24: Curvas Tiempo-Temperatura-Profundidad, para Método Rotatorio

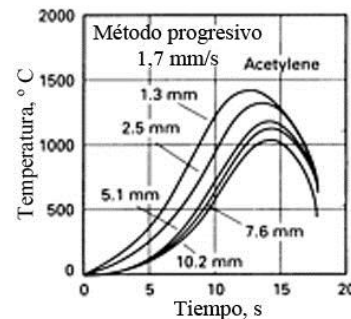


Fig. 25: Curvas Tiempo-Temperatura-Profundidad, para Método Progresivo

### XI.2.3.1. Cabezales de llama para oxígeno-gas:

La temperatura de la llama de las mezclas oxígeno-gas es superior a la que pueden resistir los materiales refractarios y metálicos, por ello los cabezales de llama están diseñados de tal manera que provean un modelo de llama que evite todo calentamiento directo sobre sus partes metálicas. Generalmente el cabezal de llama consiste de un tubo o una cámara con orificio o múltiples orificios maquinados dentro de ésta. El número y distribución de estos orificios depende del área requerida de calentamiento.

Los cabezales de llama para el uso con mezcla de oxígeno-gas se muestran en la Fig. 26; los picos pueden ser de tipo roscado o de inserto, como se observa en la misma figura.

La potencia del calentamiento del cabezal está gobernada por el número y tamaño de los orificios, cuando todos los otros factores son iguales.

El diámetro de los orificios varía entre 0,6 y 1,7 mm. Las partes integrales de un cabezal de llama son la cámara mezcladora y el tubo mezclador, donde el oxígeno y el gas combustible se homogenizan y fluyen a través de los orificios.

La capacidad de la cámara y del tubo mezclador debe estar de acuerdo con el tamaño y número de orificios; si el mezclador es muy pequeño puede hacer retroceder la llama y si es muy grande no funcionará eficientemente. Para asegurar una velocidad idéntica de los gases mezclados en los orificios, es común diseñar un cabezal con baffles agujereados a través de los cuales los gases pasen antes de ser quemados.

Los cabezales de múltiples orificios se deben enfriar con camisa de agua debido a que la elevada temperatura que se desarrolla alrededor de la llama podría causar un deterioro temprano.

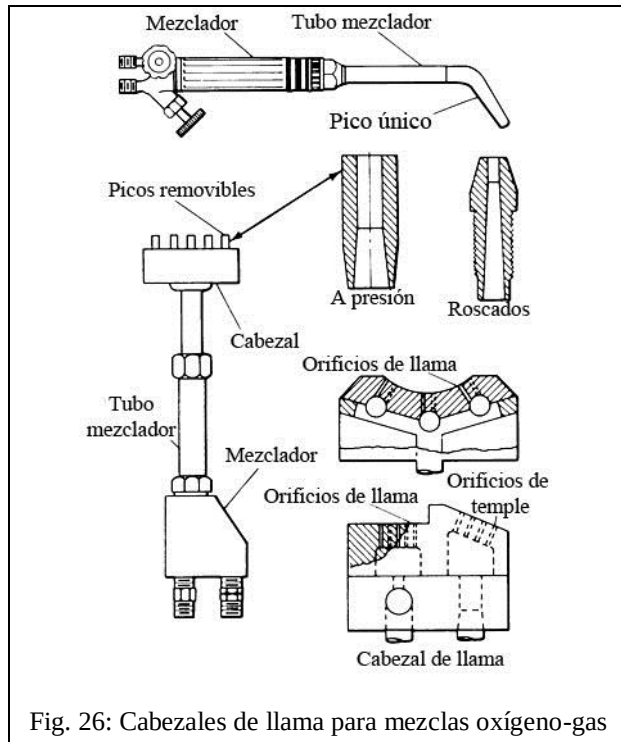


Fig. 26: Cabezales de llama para mezclas oxígeno-gas

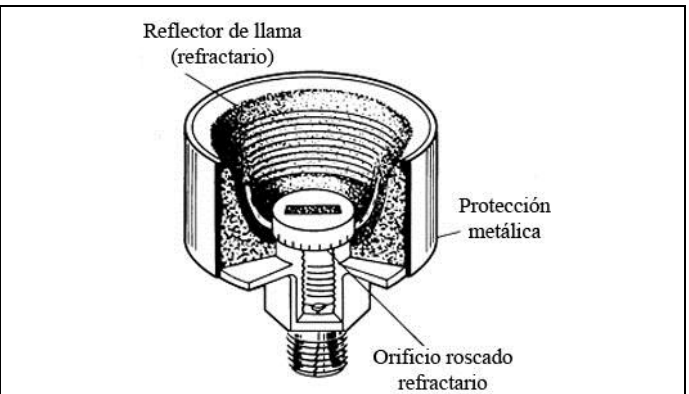


Fig. 27: Quemador tipo radiante, para mezcla aire-gas

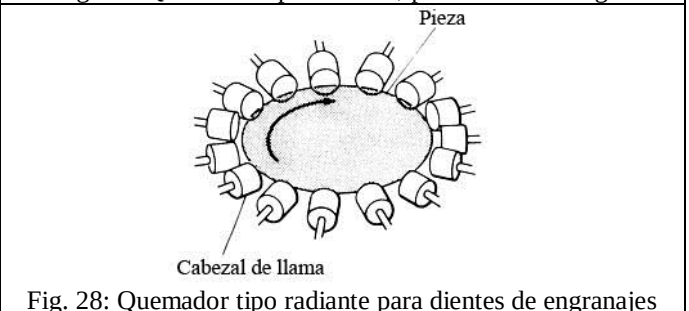


Fig. 28: Quemador tipo radiante para dientes de engranajes

#### XI.2.3.3. Quemadores para aire-gas combustible:

Estos quemadores desarrollan una temperatura de llama menor que la compatible con los materiales refractarios disponibles. Incorporan recubrimientos de refractarios resistentes al calor, generalmente de tipo radiante o de tipo de convección de alta velocidad.

**Quemador de tipo radiante:** Se ilustra en la Fig. 27. Es esencialmente una copa refractaria contenida en una protección metálica. La premezcla de aire y gas es suministrada a través de una cañería a la parte inferior del quemador donde se encuentra un pico de cerámica moldeada roscado a ella. Con numerosas ranuras angostas moldeadas en la periferia, el pico funciona esencialmente como un distribuidor de calor de un quemador de paso múltiple. Pequeñas llamas bañan la superficie interior de la copa haciéndola altamente incandescente para una rápida transferencia de calor por radiación. A causa de que la combustión es completada dentro de la copa, el quemador puede posicionarse muy cerca de la pieza sin que se produzca impacto de llama.

El quemador radiante standard empleado en el tratamiento de temple a la llama de los dientes de engranajes grandes, es de una hilera de quemadores distribuidos en forma de anillo que lo rodea para cubrir enteramente la superficie a ser templada. (Fig. 28)

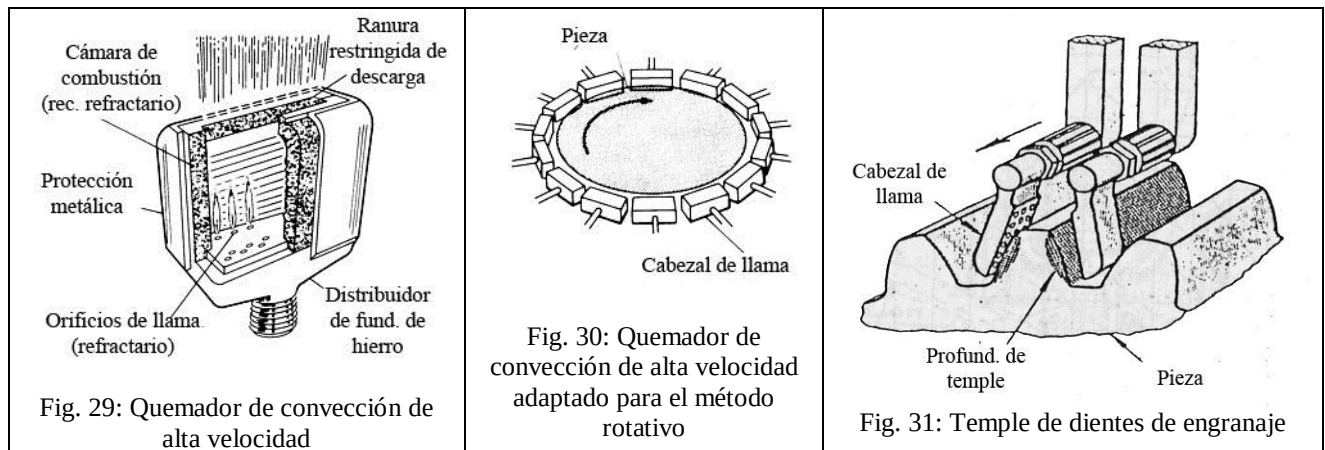
**Quemador de convección de alta velocidad:** Es básicamente un horno en miniatura con recubrimiento refractario, en el cual el calor es suministrado a una velocidad tan alta como  $10.000 \text{ Cal/m}^3.\text{seg}$ . La premezcla de aire-gas es provista por una cañería y fluye a través de los orificios de una placa cerámica. El diseño del quemador es tal que los gases quemados calientan el recubrimiento refractario hasta una temperatura cercana a la de llama teórica, esto permite un precalentamiento de los gases reactantes y acelera la combustión. De esta manera, los gases calientes a aprox.  $1650^\circ \text{C}$  se descargan a través de una ranura restringida para impactar en la pieza a velocidades hasta  $760 \text{ m/seg.}$ , como se muestra en la Fig. 29.

El quemador se adapta para el calentamiento localizado de piezas en operaciones de temple a la llama por método rotativo. Las Fig. 30 y 31 muestran una aplicación para temple de los dientes de engranajes de poco espesor.

#### XI.2.4. Procedimiento de operación y control

El éxito del temple a la llama depende del cuidado de la puesta a punto; las principales variables de operación son:

- 1) Distancia del cono interno de la llama oxígeno-gas combustible a la superficie de la pieza o la distancia del quemador aire-gas combustible a la pieza.
- 2) Presión de los gases y sus relaciones.



3) Velocidad de recorrido del cabezal de llama o de la pieza.

4) Tipo, volumen y aplicación del temple.

Estas variables deben controlarse cuidadosamente para lograr que se repita la dureza superficial y la profundidad de temple. Se deben realizar pruebas preliminares de calentamiento de una pieza y después de su control metalúrgico efectuar el proceso en forma productiva.

El control de una pieza templada a la llama involucra normalmente determinar el valor de la dureza superficial y la profundidad de temple. El control de la dureza exterior puede ser un ensayo no destructivo, pero la profundidad de temple generalmente hace necesario efectuar un corte de la pieza (excepto en caso de calentamiento estacionario de piezas de poco espesor, como dientes de engranajes, donde la profundidad puede observarse sin destruirlas). Por lo tanto, siempre debe templarse otra pieza con el mismo material y dimensiones, en iguales condiciones de calentamiento, para los controles internos de dureza y estructura metalográfica.

Con este concepto, los controles generales para el análisis metalúrgico de una pieza templada a la llama son:

- Control de dureza en la superficie: normalmente por el método Rockwell C, o superficial si la capa es poco profunda.
- Control de la profundidad de temple: en una sección transversal se determina dureza o microdureza en gradiente, de esta manera es posible graficar la profundidad de capa. Un examen microscópico es muy útil para determinar las componentes de una capa templada.
- Homogeneidad superficial de la zona templada: la superficie endurecida de cualquier área templada a la llama, puede ser determinada por un ligero arenado del área, con arena fina. La porción endurecida de la superficie quedará menos afectada que las áreas no templadas por la acción de corte de la arena. Este método también sirve para determinar puntos blandos por falta de uniformidad de calentamiento.

Otro procedimiento para determinar el área templada es atacando la superficie con solución de ácido nítrico al 10%. El área endurecida aparecerá más oscura que las zonas no templadas.

### XI.2.5 Fallas de los temples a la llama

Baja dureza: incorrecta potencia de los quemadores, excesivo tiempo entre calentamiento y enfriamiento, baja severidad de temple.

Baja profundidad de temple: poco tiempo de calentamiento, bajo tiempo entre calentamiento y enfriamiento.

Alta profundidad de temple: excesivo tiempo de calentamiento y/o entre calentamiento y temple, poca potencia de los quemadores que aumenta la profundidad a causa de la lentitud de calentamiento.

Fisuras de temple: sobrecalentamiento en la superficie por mala regulación de la potencia, de los quemadores o de la distancia de éstos a la pieza, sobrecalentamiento localizado por excesivo tiempo, elevada severidad de temple para la calidad del acero utilizado.

### **XI.2.6. Selección del material**

Las aplicaciones de temple a la llama están limitadas a los aceros templables y fundiciones de hierro.

Aceros al carbono: los aceros entre 0.37 a 0.55% C, son los más ampliamente usados en las aplicaciones de temple a la llama. Pueden utilizarse para el temple selectivo de pequeños engranajes, ejes y otras piezas de pequeña sección si se requiere templarlos uniformemente en toda la sección. En piezas de mayor tamaño, son aptos para profundidades de temple de 0.8 a 6.2 mm.

Aceros aleados: su uso se justifica solamente cuando

- a) se necesita una alta resistencia de núcleo, en cuyo caso, se temple primero totalmente y luego se efectúa el temple a la llama de la zona que se desea mayor resistencia. También cuando se desea una mayor profundidad de temple.
- b) Por la masa o forma de la pieza que requiera restricciones en la distorsión, o peligro de fisuras si se temple en agua, como en el caso de los aceros al carbono.

Los aceros aleados más comunes utilizados en el temple a la llama son: SAE 4135, 4140, 8640, 8642 y 4340.

Fundiciones de hierro: Las fundiciones grises, nodulares o maleable perlítica que tengan contenido de C combinado de 0.35 a 0.80 % pueden ser endurecidas a la llama. Las fundiciones que tengan menos de 0.35 % C combinado no responderán adecuadamente a causa de la incapacidad de la austenita a disolver grafito durante el corto tiempo de calentamiento.

El temple a la llama de estas fundiciones produce valores típicos de dureza de alrededor de HRc 40. Las fundiciones que tienen más de 0.80 % C en su matriz, son difíciles de temprar a la llama por su inherente fragilidad y susceptibilidad a fisurarse cuando se temple rápidamente.

El bajo punto de fusión y la presencia de grafito en la microestructura, incrementan la tendencia al "quemado" o también alguna fusión localizada durante el calentamiento con llama, por ello deben extremarse los cuidados para reducir el tiempo de calentamiento, como así también la distancia del cono interno de la llama no deberá ser demasiado pequeña. Quizás el factor más significativo en la respuesta de la fundición de hierro al temple a la llama, sea la microestructura previa de la misma.



Tabla 1

| GAS                                                             | CALOR DE COMBUSTION<br>(Cal/m <sup>3</sup> ) | TEMPERATURA DE LA LLAMA<br>(°C) |          | PROPORCION<br>DE LA MEZCLA<br>CON CO <sub>2</sub><br>(O <sub>2</sub> -fuel) | CALOR DE COMBUSTION<br>DE LA MEZCLA<br>(Cal/m <sup>3</sup> ) | VELOCIDAD DE QUEMADO<br>(m/seg) | INTENSIDAD<br>DE COMBUSTION<br>(Cal/m <sup>2</sup> seg) |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                                                                 |                                              | CON OXIGENO                     | CON AIRE |                                                                             |                                                              |                                 |                                                         |
| ACETILENO                                                       | 12750                                        | 3100                            | 2320     | 1:1                                                                         | 6370                                                         | 6,4                             | 40770                                                   |
| MAPP<br>(METILACETILENO Y PROPADIENO)                           | 21400                                        | 2930                            |          | 3,5:1                                                                       | 4750                                                         | 4,7                             | 22330                                                   |
| GAS NATURAL<br>(METANO)                                         | 8900                                         | 2700                            | 1870     | 1,7:1                                                                       | 3240                                                         | 3,3                             | 10690                                                   |
| PROPANO                                                         | 22420                                        | 2640                            | 1920     | 4,0:1                                                                       | 4480                                                         | 3,6                             | 16130                                                   |
| GAS DE CIUDAD<br>(destilación seca de hulla o carbón de piedra) | 2670 a 8000                                  | 2530                            | 1986     | DEPENDE DE LA COMPOSICION                                                   |                                                              |                                 |                                                         |
| HIDROGENO                                                       | 2590                                         |                                 |          | 0,5-1                                                                       | 1730                                                         | 11,0                            | 19030                                                   |