

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD QUERETARO

**DESARROLLO DE UN MODELO
MATEMÁTICO DEL PROCESO “HIGH
VELOCITY OXY-FUEL” (HVOF)**

Tesis que presenta

Cindy Claus



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y
DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL
INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL**

**COORDINACIÓN GENERAL DE
SERVICIOS BIBLIOGRÁFICOS**

Para obtener el Grado de

Maestra en Ciencias

En la Especialidad de

Materiales

**CINVESTAV
IPN
ADQUISICION
DE LIBROS**

Director de la Tesis

Dr. Luis Gerardo Trápaga Martínez

Santiago de Querétaro, Qro.

27 de Agosto del 2010

CLASIF.:	17397.5-1001
ADQUIE.:	17397.5+
FECHA:	18 Julio - 2011
PROCED.:	Dep. - 2011
	\$

17397.5-1001

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Luis Gerardo Trápaga Martínez por su ayuda y su apoyo.

Le doy las gracias mi esposo, mi hija, mis papas y mi familia para su apoyo moral.

Gracias a Martha por su amistad y su apoyo.

Gracias a mis amigos y compañeros de trabajo y a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis.

Al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para la realización de este proyecto.

Resumen

La aplicación de recubrimientos protectores por medio de rociado térmico presenta un desarrollo importante. Entre estos procesos esta el proceso de Pistola de Combustión Supersónica (HVOF, por sus siglas en ingles).

Para optimizar la calidad de los recubrimientos obtenidos por el proceso HVOF, es necesario conocer el efecto de los diferentes parámetros del proceso, por lo que se utilizó la modelación matemática. En el presente trabajo se estudiaron el efecto de las diferentes variables que afectan el proceso HVOF, inicialmente se estudió un caso de referencia. Posteriormente se estudio el efecto del flujo másico total, del flujo del combustible (i.e., oxy-fuel), del flujo de aire, del flujo de nitrógeno así como la longitud del barril y la distancia al sustrato. Los resultados muestran que las variables que más afectan el proceso son el flujo másico total y flujo de oxy-fuel, así como la longitud del barril y la distancia al sustrato.

Abstract

The application of protective coatings by thermal spray processes presents an important development. One of these processes is the High Velocity Oxy-Fuel process (HVOF).

In order to optimize the quality of the coatings obtained by the HVOF process, it is necessary to know the effect of the different parameters of the process that is why the mathematical modeling was used. In the present work the effect of the different variables was studied on the HVOF process. Initially a case of reference was studied. Later the effect of the total gas flow rate, the flow of oxy-fuel, the flow of air, the flow of nitrogen as well as the length of the barrel and the distance to the substrate were studied. The results show that the variables that affect most the process are the total gas flow rate and the flow of oxy-fuel, as well as the length of the barrel and the distance to the substrate.

Contenido General

Capitulo I- Introducción	p.1
1- Objetivo general	p.1
2- Objetivos particulares	p.1
3- Justificación	p.2
Capitulo II- Rociado térmico	p.4
1- Procesos de rociado por combustión	p.7
a) Proceso de flama	p.7
b) Proceso de detonación	p.7
c) Proceso de pistola de combustión supersónica	p.8
2- Procesos de rociado eléctrico	p.9
a) Proceso de plasma	p.9
b) Proceso de arco eléctrico	p.10
Capitulo III- Proceso HVOF	p.12
1- Cámara de combustión	p.15
2- Inyector	p.16
3- Barril y chorro supersónico	p.20
Capitulo IV- Flujo compresible	p.26
1- Ecuación de estado	p.26
2- Definición de velocidad del sonido y número de Mac	p.27
3- Ecuaciones	p.29
4- Sobresaturación	p.31
5- Ondas de choque	p.31
a) Ondas de choque normal	p.32
b) Ondas de choque oblicuas	p.32
c) Ondas de expansión de Prandtl-Meyer	p.33
d) Ondas Mach	p.34
Capitulo V- Simulación matemática	p.36
1- Antecedentes	p.36
2- Modelo y caso de referencia	p.36
a) Condiciones de simulación	p.36
b) Caso de referencia	p.40
3- Resultados	p.44
a) Efecto del flujo másico total	p.44
b) Efecto del flujo de oxy-fuel	p.47
c) Efecto del flujo de aire	p.48
d) Efecto del flujo de nitrógeno	p.50
e) Efecto del cambio de la longitud del barril	p.52
f) Efecto del cambio de la distancia al sustrato	p.53
Capitulo VI- Conclusiones y perspectivas	p.56
Referencias	p.58

Capitulo I- Introducción

En las ultimas décadas se ha observado un desarrollo importante en la aplicación de recubrimientos protectores por medio de rociado térmico.

Estos recubrimientos se depositan con el fin de mejorar las propiedades físicas y químicas de las piezas aumentando su tiempo de vida de operación. Se utilizan en un gran número de componentes como son: partes de turbinas de avión, componentes de automóviles y barcos, además en aplicaciones médicas, entre otros.

1- Objetivo general

El propósito de este trabajo es desarrollar un modelo matemático del proceso HVOF con el uso del código comercial CFD-ACE+, con fin de entender su funcionamiento y optimizar las variables de operación, representando y analizando las operaciones de aplicación de recubrimientos.

2- Objetivos particulares

Los objetivos particulares son:

- ♦ Revisión bibliográfica y estado del arte en el campo de los recubrimientos por combustión.
- ♦ Aprendizaje del código CFD-ACE+.
- ♦ Formulación matemática comprendiendo combustión y flujo compresible.
- ♦ Dibujo de las geometrías.
- ♦ Validación de cálculos utilizando la información reportada en la literatura.
- ♦ Definición y análisis de la interrelación que existe entre las distintas variables de proceso (proporción de los gases, distancia pistola / sustrato, longitud de la pistola, etc)

3- Justificación

El proceso HVOF es un proceso utilizado en un gran número de aplicaciones. Los recubrimientos se aplican para mejorar la resistencia al desgaste, a la abrasión y corrosión, también para depositar barreras térmicas y eléctricas.

Este proceso se caracteriza por velocidades altas de partículas y una energía térmica relativamente baja en comparación con otros procesos alternativos, tal como el proceso de plasma. Este permite obtener un recubrimiento con una fuerza de enlace más alta, una velocidad de deposición y durezas más altas, mejorando la resistencia al desgaste.

La microestructura y las propiedades de los recubrimientos son determinadas por los parámetros de proceso tales como: el diseño de la pistola, la razón combustible / oxígeno, la posición del sustrato con respecto a la pistola, el tamaño y la forma de las partículas, así como la distribución de tamaños, los materiales utilizados, entre otros.

Para optimizar la calidad de estos recubrimientos, es necesario cuantificar el efecto de los parámetros del proceso, por lo que la modelación matemática es un buen complemento a los experimentos.

Los resultados de la modelación matemática permitirán predecir la velocidad, la composición y la temperatura de las partículas que se impactan en el sustrato, las características del rociado, tal como los campos de velocidad, temperatura, densidad y composición química.

La modelación matemática, además de dar un mejor entendimiento del proceso, permite bajar los costos, ya que la medición in-situ de los parámetros es difícil, costosa, y para algunos parámetros, imposible hasta la fecha. [1]

La investigación del proceso HVOF es interdisciplinaria: aspectos de la ciencia de materiales, de dinámica de los gases y de termodinámica química deben ser considerados juntos.

Un análisis teórico puede permitir un mejor entendimiento del sistema y por lo tanto llegar a un progreso más profundo en las tecnologías de rociado térmico.

La simulación de los procesos de rociado térmico usando la Dinámica computacional de fluidos (i.e., "Computational Fluid dynamics"-CFD) se volvió una herramienta importante para analizar los campos de flujo y dar respuestas a como ciertos parámetros como la geometría, la tasa combustible-oxígeno o la presión de la cámara de combustión cambian las características del flujo. [2]

Capítulo II- Rociado Térmico

El rociado térmico es un término genérico para un grupo de procesos en los cuales materiales cerámicos, metálicos, "cermet" (mezcla metal-cerámico) y algunos polímeros, en forma de polvo, alambre o barra son puestos en una antorcha ó pistola en la cual son calentados cerca de su punto de fusión por medio eléctrico (plasma ó arco) ó químico (combustión). Las gotas fundidas ó casi fundidas resultantes son aceleradas en un chorro de gas y proyectadas contra la superficie a recubrir (el sustrato). Al impactar, las gotas se deforman en láminas delgadas, conocidos como obleas, o mas comúnmente "splats", adhiriéndose a la superficie, superponiéndose mientras se solidifican. El espesor total del recubrimiento se obtiene por lo general a través de múltiples pasos de rociado.[3]



Figura 1- Proceso de rociado térmico

Fue al inicio del siglo XX que un inventor suizo, el Dr. Max Schoop, inventó el rociado térmico, con el diseño de una pistola que utilizaba oxígeno y acetileno como fuente caliente y aire comprimido para proyectar el material fundido. El proceso fue tomado y desarrollado por el grupo "Metco Incorporated" en 1933. Metco continuó a desarrollar procesos de rociado térmico. En 1988, Metco introdujo el sistema HVOF [4]

El rociado térmico es una técnica de tratamiento de superficie usada para aplicar recubrimientos protectores en una gran variedad de aplicaciones industriales.

Los recubrimientos por rociado térmico son una manera versátil y bien establecida de proteger los metales de la corrosión en una gran variedad de ambientes. Diferentes materiales pueden ser utilizados para producir los recubrimientos por rociado térmico: metales, cerámicos, polímeros y combinaciones.

Estos recubrimientos permiten mejorar la protección a la corrosión, el aislamiento eléctrico o térmico, y la resistencia a la abrasión y a la erosión. [2]

Es una de las técnicas más versátiles de recubrimiento desde el punto de vista económico, del rango de materiales y del número de aplicaciones. Permite aplicaciones rápidas de recubrimientos de espesor de unos micrones hasta más de 25 mm.

El rociado térmico no está virtualmente limitado a la escala y complejidad de aplicaciones, al extenderse de sujetadores pequeños a estructuras. La producción de los recubrimientos es rápida y puede ser automatizada.

La calidad de los recubrimientos se determina midiendo su porosidad, su contenido de óxido, su macro y microdureza, su fuerza de enlace y la aspereza de la superficie. [5]

Cualquier tipo de sustrato se puede utilizar, pero pueden existir incompatibilidades con ciertas técnicas (debilidad, sensibilidad térmica, geometría muy compleja, etc.) ó con el material de recubrimiento, debido a problemas de adherencia.

Las primeras aplicaciones industriales del rociado térmico aparecieron en 1914 en el área militar (proyección de estaño sobre la superficie trasera de proyectil), en el dominio de la anticorrosión (depósitos de aluminio) ó para decoración (depósitos de bronce). Después de la segunda guerra mundial el dominio de aplicaciones del rociado térmico se amplió a la industria mecánica (recubrimientos de acero para la renovación de piezas dañadas) y a la industria aeronáutica. El rociado térmico interesa hoy a todos los sectores industriales. [6]

Se pueden separar las distintas técnicas de rociado térmico en dos familias, [7] tal como se ilustra en la figura 2.

Se distinguen los procesos por combustión: flama, detonación y pistola de combustión supersónica, y los procesos eléctricos: plasma y arco eléctrico.

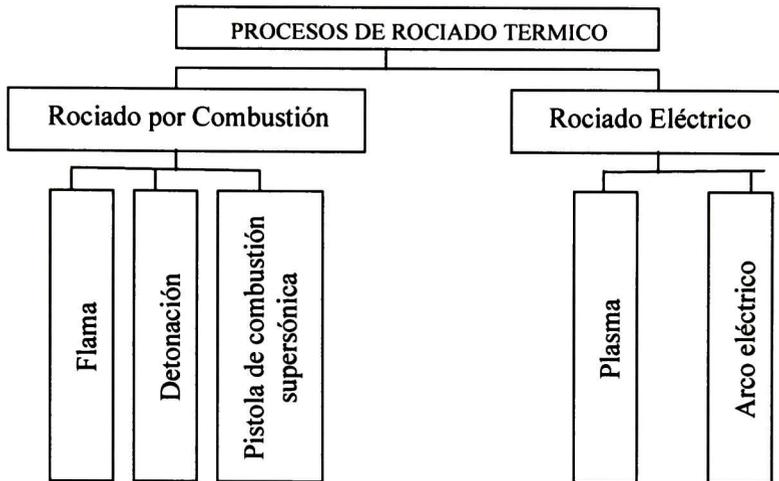


Figura 2- Procesos de rociado térmico

La figura 3 muestra diferentes procesos de rociado térmico y su fecha de introducción.

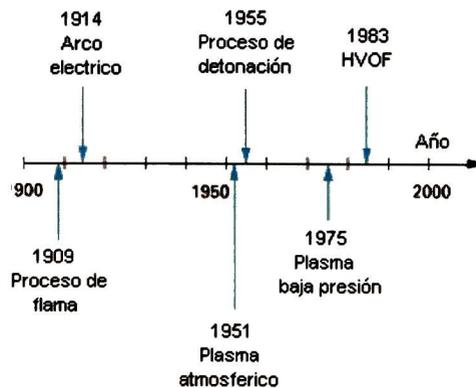


Figura 3- Procesos de rociado térmico [8]

A continuación se presentan los distintos procesos de rociado térmico [3]

1- Procesos de rociado por combustión

a) Proceso de flama

Este proceso utiliza un gas combustible como fuente caliente para fundir el material de recubrimiento, que puede tener forma de alambre, barra o polvo.

En el caso de alambre o barra, el material es llevado a la cámara de combustión, donde se funde, y las partículas se propulsan, debido a los flujos altos de los gases, sobre el sustrato (Figura 4). En el caso del polvo, este es llevado por un gas adicional (generalmente nitrógeno) en la pistola para la combustión y la deposición.

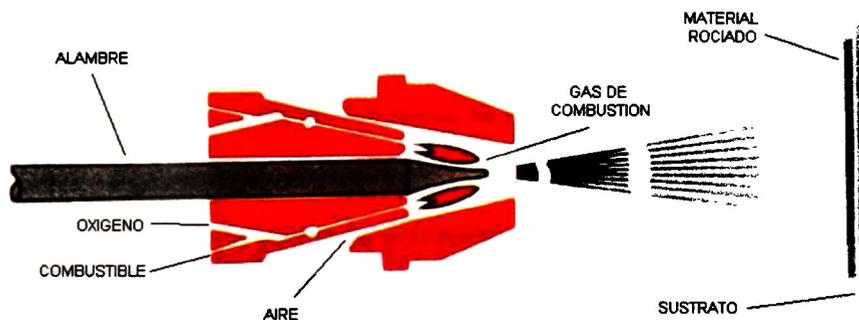


Figura 4- Pistola de rociado por flama (a) con alambre o barra (b) con polvo.

Esta técnica es muy simple y muy presente en la industria, pero esta limitada en temperatura y velocidad de proyección.

b) Proceso de detonación

Este proceso no utiliza una combustión continua pero una detonación como fuente de calor.

Una mezcla de oxígeno y acetileno, con un pulso de polvo, es introducido en un barril y detonado usando una chispa producida por una bujía. La detonación de alta temperatura y alta presión calienta las partículas a sus

puntos de fusión ó más arriba (hasta 4500 °C) y las acelera a velocidades del orden de los 750 m/s.

Después de cada detonación, el barril es purgado con nitrógeno y el proceso es repetido 10 veces por segundo. En lugar de un paso continuo de recubrimiento como en los otros procesos de rociado térmico, un círculo de recubrimiento de 25mm de diámetro y unos micrómetros de espesor es depositado a cada detonación. Un recubrimiento uniforme sobre la pieza se alcanza superponiendo los círculos de recubrimiento.

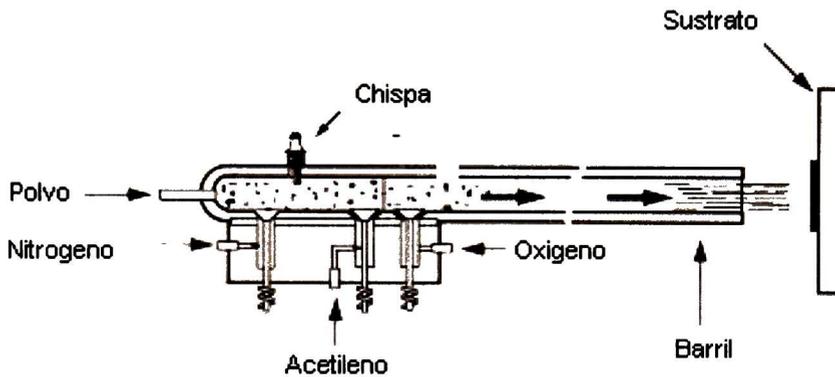


Figura 5- Sistema de detonación

c) Proceso de pistola de combustión supersónica

En este proceso, el combustible se mezcla con oxigeno para dar lugar a una combustión. Los productos de la combustión se expanden a través de un inyector donde los gases se vuelven supersónicos. El polvo se introduce para ser calentado y acelerado.

El polvo se funde parcialmente o completamente y alcanza velocidades de más de 1350 m/s a la salida de la pistola. La temperatura de la flama esta entre 2300 y 3000 °C. En la figura 6 se presenta un esquema del equipo.

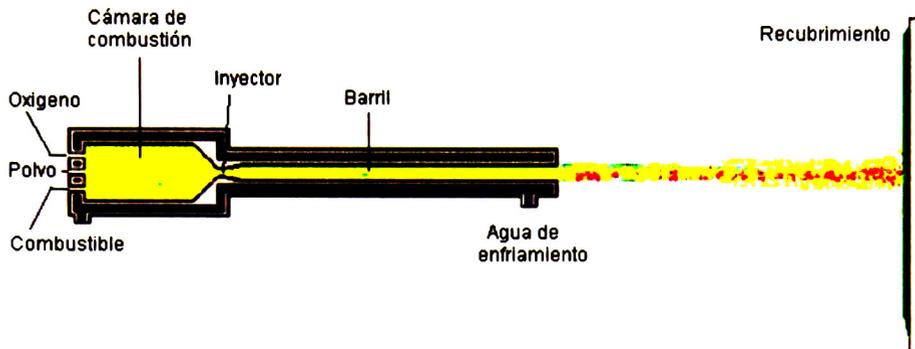


Figura 6- Esquema del sistema HVOF

2- Procesos de rociado eléctrico

a) Proceso de plasma

En el proceso de plasma, un gas, por lo general argón, fluye entre un cátodo de tungsteno y un ánodo de cobre enfriado por agua. Un arco eléctrico se inicia entre los 2 electrodos usando una descarga de alta frecuencia y sosteniéndola usando una corriente CD. El arco ioniza el gas, creando un plasma de alta presión. El incremento resultante en la temperatura del gas, que puede exceder 30000 C, incrementa el volumen del gas, y por lo tanto su presión y velocidad a la salida del inyector. El polvo se inserta justo fuera de la pistola ó en la región divergente del inyector (ánodo) y es calentado y acelerado por el plasma de alta temperatura y alta velocidad. Las velocidades de las partículas alcanzan un rango de 300 a 550 m/s. Las temperaturas son las del punto de fusión, o muchos mayores.

El rociado por plasma se puede hacer en atmósfera inerte y/ó cámara de baja presión (P bajo 0.001-0.01 Pa). Esos procesos de plasma han demostrado ser efectivos para aplicar recubrimientos complejos y

resistentes a la corrosión en caliente. El proceso de plasma de baja presión permite que el material de rociado guarde su química y su composición original y las partículas pueden alcanzar velocidades de 1000 m/s.

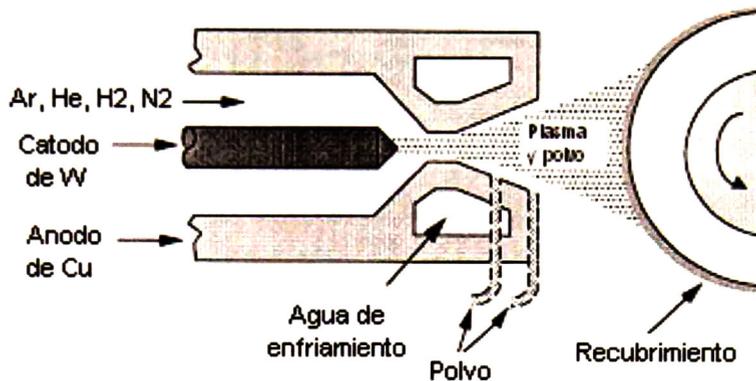


Figura 7- Proceso de rociado por plasma

b) Proceso de arco eléctrico

El proceso de arco eléctrico utiliza metal en forma de alambre. Este proceso difiere de los otros procesos de rociado térmico en que no hay una fuente de calor externa como una flama ó un plasma inducido eléctricamente.

El calentamiento y la fusión ocurren cuando dos alambres cargados eléctricamente de manera opuesta (con una diferencia de potencial de 18 a 40 volts), incluyendo el material de rociado, son puestos en contacto de tal manera que un arco controlado aparece en la intersección de ellos mismos. El arco crea temperaturas de más de 6000°C y el metal fundido sobre las extremidades del alambre es atomizado y propulsado por una corriente de aire comprimido u otro gas sobre el sustrato preparado.

Ese proceso es más barato que los otros procesos de rociado térmico, ya que los requisitos de potencia eléctrica son bajos y, por lo general, no se necesita de un gas caro, como el argón.

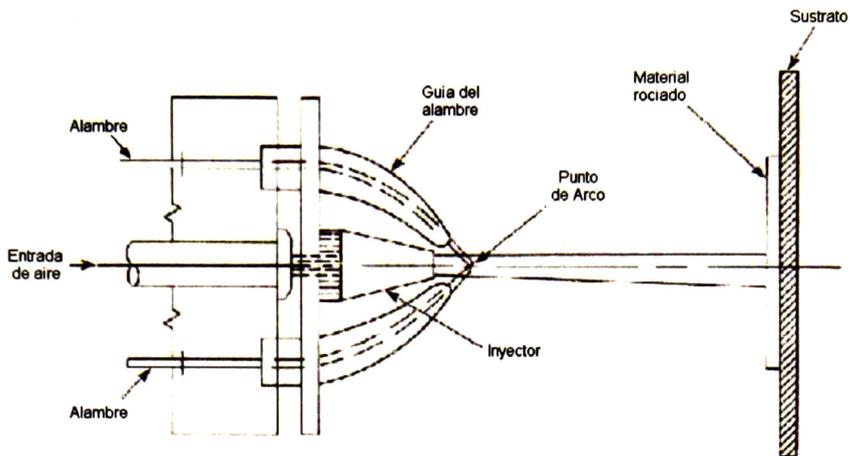


Figura 8- Dispositivo típico de rociado por arco eléctrico.

A continuación se presenta una tabla comparativa de los diferentes procesos:

Proceso	Fuente de calor	propulsor	Tipo de material	Temp. pistola (°C)	Velocidad partículas (m/s)	Materiales de recubrimiento
Arco eléctrico	Arco entre electrodos	aire	alambre	6000	240	Materiales dúctiles
Plasma	Arco de plasma	Gas inerte	Polvo	16000	120-600	Metálicos, cerámicos, polímeros y compuestos
Plasma baja presión	Arco de plasma	Gas inerte	Polvo	16000	900	Metálicos, cerámicos, polímeros y compuestos
Flama	Oxiacetileno Oxihidrogeno	Onda de detonación	Polvo	3300	240	Metálicos y cerámicos
HVOF	Oxipropileno, Oxihidrogeno, Oxipropano	Aire	Polvo	2800	1350	Metálicos y cerámicos

Se puede apreciar en esta tabla que el proceso HVOF presenta una baja temperatura en comparación de los otros procesos, pero una velocidad muy alta de las partículas.

Capítulo III- Proceso HVOF

El proceso de Pistola de Combustión Supersónica, “High Velocity Oxy-Fuel” (por sus siglas en inglés HVOF) fue desarrollado como alternativa del proceso de detonación en los años 80.

Este proceso es efectivo para producir recubrimientos densos, con baja porosidad y alta fuerza de enlace, debido al uso de la energía cinética para propulsar el material fundido con velocidades supersónicas del gas de transporte.

Es un proceso que ha sido adoptado por muchas industrias por su flexibilidad y calidad de sus recubrimientos. Hoy en día, este proceso se utiliza en varias áreas en la industria: motores diesel, turbinas de gas, automotores, ferrocarril, área médica, aeroespacial, exploración petrolera, etc.

Oxy-fuel se refiere a una tecnología que quema oxígeno con un combustible. Comparado con aire, que contiene 20.95% de oxígeno, se pueden alcanzar más altas temperaturas con oxígeno puro.

La pistola supersónica consiste en:

- Una cámara de combustión, donde el combustible y un gas oxidante se mezclan y producen una combustión
- Un inyector (i.e., una boquilla convergente-divergente), donde los productos de la combustión son acelerados a velocidades supersónicas.
- Un barril, donde el flujo sigue acelerándose. Ese chorro calienta y acelera las partículas a altas temperaturas y velocidades.

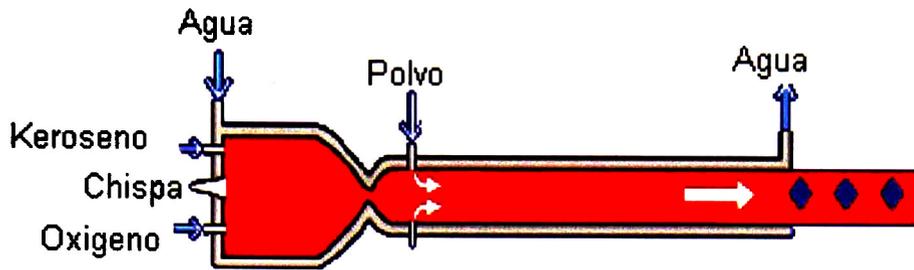


Figura 9 - Pistola supersónica

Después del barril los gases salen a la atmósfera en un chorro libre ("jet") supersónico. Las partículas salen del barril y son propulsadas sobre el sustrato. [9]

El proceso HVOF representa el estado del arte de los procesos de recubrimientos por rociado térmico. Utiliza una combinación de combustible (propano, propileno, hidrogeno ó keroseno líquido) y de gas oxidante (oxígeno ó aire) que produce una combustión que combina baja temperatura (3000°) con alta velocidad (2000 m/s), en comparación con otras técnicas. Esto resulta en recubrimientos densos, con poca oxidación. [10]

La calidad de un recubrimiento puede ser medida por diferentes criterios, incluyendo el espesor del recubrimiento, la aspereza de la superficie, la microestructura y la dureza, el contenido de óxidos, la porosidad, etc. [2]

El polvo a depositar es inyectado en el chorro de gas, directamente en la zona de combustión o en el barril. Estas partículas de polvo son calentadas y aceleradas por los gases y propulsadas fuera de la pistola en un chorro de partículas fundidas o ablandadas directamente sobre el sustrato. Bajo el impacto un enlace se forma entre la superficie y las partículas, causando una acumulación y la capa del recubrimiento. Como cualquier otro proceso de rociado térmico, el objetivo del proceso HVOF es de transferir energía cinética y térmica de los gases de combustión a las partículas de polvo. [2]

El proceso HVOF es muy utilizado en las industrias automotriz y aeroespacial. Usar la energía térmica producida por la combustión del combustible con oxígeno para calentar y propulsar las partículas, proporciona una manera más eficiente de modificar las propiedades de superficie del sustrato para extender el tiempo de vida útil de la pieza, aumentar el desempeño y reducir los costos de mantenimiento.

Recientemente, se vio un aumento en el interés de los recubrimientos nanoestructurados por HVOF, cuyo tamaño de grano es menor de 100 nm. Este interés se debe a que los recubrimientos nanoestructurados muestran propiedades superiores que los recubrimientos micro.

El proceso HVOF es una mejor manera de depositar material nanoestructurado porque las partículas se impactan al sustrato con una velocidad relativamente alta, lo que produce recubrimientos de densidad y dureza altas, y la temperatura baja del gas previene que las partículas sean sobre calentadas durante el vuelo, y ayuda a preservar la estructura nanocristalina de los polvos depositados.

Desde el punto de vista de modelación, el proceso HVOF es un proceso complejo que involucra combustión, flujo compresible, transferencia de calor y transiciones subsónico supersónico. [11]

Las propiedades físicas y químicas de los recubrimientos por HVOF dependen de la micro o nano estructura del depósito, que depende de los estados de las partículas al impacto, como es la velocidad, la temperatura, el grado de fusión, etc. Estas variables, sin embargo, dependen de unos parámetros clave tal como la razón combustible / oxígeno, la distancia de rociado, la longitud del barril, etc. Para mejorar la eficiencia de los recubrimientos, se necesita estudiar el efecto de estos parámetros sobre las propiedades físicas y mecánicas de los recubrimientos. Con la ayuda de la modelación matemática, se puede hacer estudios para entender qué pasa si se cambian uno o varios parámetros de operación, esto sin tener que hacer experimentos en planta, que son más costosos.

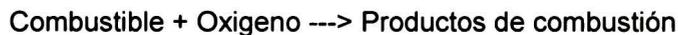
1- Cámara de combustión

Los gases entran en la cámara de combustión a temperatura ambiente y a alta presión. Se considera que el combustible y el oxígeno son mezclados antes de entrar a la cámara de combustión. El aire es inyectado cerca de las paredes de la cámara de combustión para aumentar el enfriamiento.

El flujo másico de oxy-fuel y de aire es casi el mismo, mientras que el de nitrógeno representa aproximadamente 3% de este flujo másico. La combustión toma lugar en la cámara de combustión. El mezclado turbulento ocurre y los gases se expanden debido a la liberación de energía térmica.

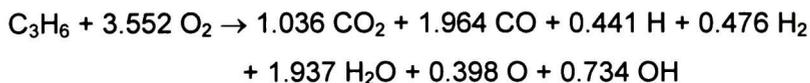
Las paredes de la cámara de combustión son enfriadas por agua, ya que la temperatura alcanzada es del orden de 3000K, y sin enfriamiento, las paredes, generalmente hechas de cobre, se fundirían. [2]

La reacción de combustión se puede expresar de la manera siguiente:



Por lo general el combustible es un hidrocarburo simple, como acetileno o heptano, o una mezcla de hidrocarburos, como keroseno o gas natural. El oxidante es oxígeno puro (temperaturas más bajas se alcanzarían si se utilizaría aire, por la presencia de nitrógeno, que absorbe una buena cantidad del calor producido).

Aquí se consideró la combustión de propileno (C_3H_6) con oxígeno.



La reacción de combustión es exotérmica, es decir que libera energía. [9]

2- Inyector

El inyector considerado es una garganta convergente – divergente, conocido como inyector de Laval (Figura 10).

El inyector de Laval es un tubo cuya área esta reducida en el medio. Su propósito es acelerar un flujo de gas pasando en el a una velocidad supersónica. Para eso, se necesita una grande diferencia de presión entre la entrada y la salida del inyector. La energía térmica propulsando el flujo de gases se convierte en energía cinética. [8]

Este inyector fue desarrollado por el inventor Gustaf de Laval en el siglo 19.

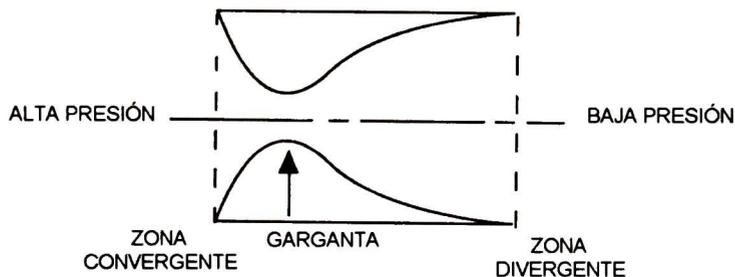


Figura 10- Inyector de Laval

El inyector de Laval se divide en 3 zonas:

- . Una zona convergente, donde el flujo subsónico es acelerado. La aceleración de los gases da un enfriamiento debido a la conversión de la energía térmica en energía cinética.

- . Una garganta, donde se encuentra el área más pequeña, y donde el flujo llega a condiciones sónicas, es decir que la velocidad de los gases es la misma que la velocidad del sonido a la temperatura que los gases tienen a este punto.

- . Una zona divergente, donde el área aumenta y el flujo acelera de una velocidad sónica a una velocidad supersónica. [8]

Dentro de un inyector convergente-divergente, la razón de las presiones de salida y de entrada determina el tipo de flujo (Figura 11). Existen tres posibilidades:

- Si la presión a la salida del inyector no es suficientemente baja, el flujo sónico no se induce en la garganta, y el flujo permanece subsónico. En este caso la presión aumenta mientras la velocidad disminuye (curvas A, B, C).

- Si la presión a la salida del inyector es suficientemente baja, se obtiene un flujo supersónico a la salida del inyector. En este caso la presión disminuye mientras la velocidad aumenta en la parte divergente. Este es la condición de operación deseada (curva F).

- Si una onda de choque esta presente en el inyector, el flujo cambia de subsónico a supersónico, pero en la parte divergente el flujo se vuelve de nuevo subsónico. En este caso la presión disminuye primero pero repentinamente la presión presenta un discontinuidad y vuelve a aumentar (curvas D, E).

Entonces, si la relación de presiones es suficientemente alta, el flujo será supersónico a la salida del inyector, pero si la relación es mas baja que cierto valor, el flujo será subsónico.

Una onda de choque es una onda fija de presión alta. Una onda de choque se caracteriza por una discontinuidad en las propiedades del flujo: la presión y la densidad aumentan, mientras que la velocidad y el número de Mach disminuyen. [8, 12]

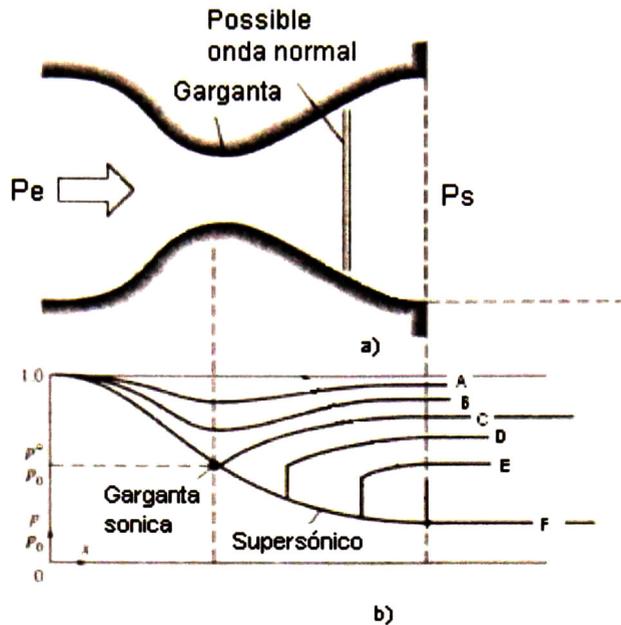


Figura 11- Tipos de flujo posibles en función de la presión de salida

Este tipo de inyector se utiliza en algunos tipos de turbinas y es una parte esencial de los motores de cohetes y de aviones supersónicos.

Su funcionamiento se basa en las diferentes propiedades de los gases que fluyen a velocidades subsónicas y supersónicas. La velocidad de un flujo subsónico se incrementa si el tubo que lo lleva se estrecha (figura 12)

Geometría del ducto	Subsónico $Ma < 1$	Supersónico $Ma > 1$
 $dA > 0$	$dV < 0$ $dP > 0$ Difusor Subsónico	$dV > 0$ $dP < 0$ Inyector Supersónico
 $dA < 0$	$dV > 0$ $dP < 0$ Inyector Subsónico	$dV < 0$ $dP > 0$ Difusor Supersónico

Figura 12- Efecto del cambio de área sobre la velocidad del flujo

En un flujo subsónico, cuando el área aumenta, la velocidad disminuye y la presión aumenta, lo que caracteriza un difusor subsónico. Pero si el flujo es supersónico, la velocidad aumenta con el aumento de área, lo que caracteriza un inyector supersónico.

El mismo tipo de comportamiento ocurre para un área que disminuye: un flujo subsónico es acelerado y un flujo supersónico es desacelerado.

Teniendo un flujo subsónico en la parte convergente, el número de Mach aumenta y pasa por un punto donde $Ma=1$. Este punto se alcanza al final del área convergente, es decir en la garganta, donde el área es la mínima. Se dice que la garganta está en condiciones sónicas ($Ma=1$) o críticas. A este punto, el flujo que pasa es el máximo posible. Se dice que el ducto está sobresaturado ("choked") y no puede llevar flujo adicional. [12]

El flujo a través de un inyector de Laval es isentrópico (entropía del gas casi constante) y adiabático (pérdida o ganancia de calor casi cero). El sonido, una pequeña onda de presión, se propaga en gas. El flujo siendo supersónico, se habla de flujo compresible.

La presión del gas a la salida de la porción de expansión de la salida del inyector no debe ser muy baja. La presión de salida puede ser debajo de la presión del ambiente donde sale el flujo supersónico, pero si está muy por debajo, entonces el flujo va a dejar de ser supersónico. En práctica, la presión del ambiente no debe ser más alta que 2-3 veces la presión en el gas supersónico para que el flujo supersónico quite el inyector.

El análisis del flujo de gas a través de un inyector de Laval involucra varios conceptos y suposiciones:

- Para simplificar los cálculos, el gas de combustión se considera como gas perfecto.
- El flujo de gas es isentrópico, sin fricción y adiabático.
- El flujo de gas es constante durante la combustión.

- El flujo de gas sigue una línea recta desde la entrada hasta la salida del gas.
- El comportamiento del gas es compresible ya que el flujo fluye a altas velocidades. [13]

La figura 13 muestra como evolucionan la temperatura, la velocidad y la presión en un inyector de Laval. La temperatura y la presión van disminuyendo, mientras la velocidad aumenta.

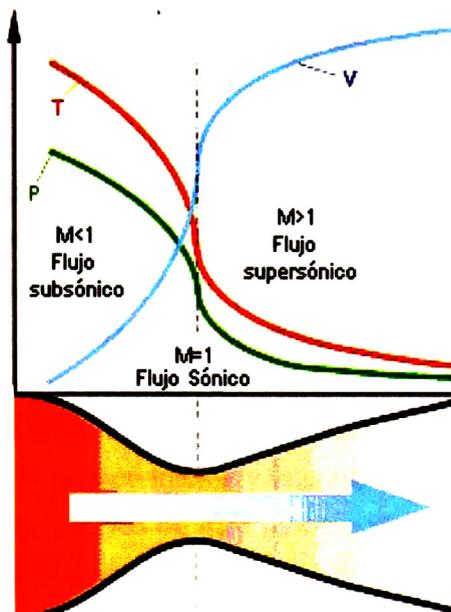


Figura 13- Variación de la temperatura, velocidad y presión en un inyector de Laval

3- Barril y chorro supersónico

El barril es un paso a través del cual los gases fluyen a altas temperaturas y a velocidades supersónicas.

Afuera de la pistola, el chorro supersónico se ajusta a la presión ambiente por una serie de compresiones-expansiones, y unos diamantes de choque se forman debido a la luminiscencia de varios gases a alta temperatura.

Los diamantes de choque son un fenómeno que ocurre cada vez que un flujo sale de un inyector a velocidades supersónicas y a presión diferente de la presión atmosférica.

Se pueden presentar dos casos diferentes, dependiendo de si la presión de salida del gas es más alta o más baja que la presión atmosférica. Se habla de flujo sobre-expandido si la presión de salida es más baja que la presión atmosférica, y de flujo bajo-expandido en el caso contrario.

Aquí se presenta a detalles lo que pasa en un flujo sobre-expandido (Figura 14).

Cuando un flujo es sobre-expandido, la presión baja del gas a la salida del inyector comparada con la presión atmosférica causa una compresión del flujo. Esta compresión aumenta la presión del escape. Sin embargo el flujo puede ser comprimido tanto que su presión excede la presión atmosférica. Como resultado, el flujo se expande hacia el exterior para reducir de nuevo la presión. Este proceso puede expandirse tanto que la presión interna baje abajo de la presión ambiente.

La diferencia entre la presión interna y la presión externa se reduce cada vez que el flujo pasa a través de este proceso de compresión-expansión. Este proceso se repite hasta que la presión de salida sea la misma que la presión atmosférica. El flujo se contrae y se expande repetidamente mientras se igualan las presiones de salida y atmosférica.

El método por el cual el flujo hace estas compresiones y expansiones es a través de diferentes tipos de ondas: ondas de choque normal, oblicua, ondas de expansión de Prandtl-Meyer, ondas de compresión de Prandtl-Meyer.

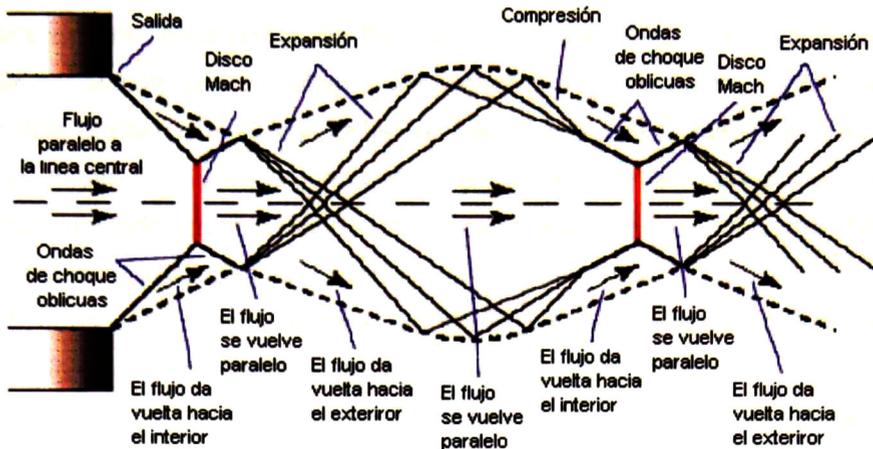


Figura 14- Flujo sobre-expandido

Saliendo del inyector, el flujo cerca de la línea del centro se mueve paralelamente a esta línea del centro.

Sin embargo la presión atmosférica más allá del chorro es mayor que la presión de salida. Esta presión alta provoca que el flujo de salida de vuelta hacia la línea central. Esta vuelta se puede hacer a través de una onda de choque oblicua. Cada onda de choque causa un cambio en la presión del flujo, en este caso un aumento. Una onda oblicua se denomina así por el hecho que esta inclinada con cierto ángulo de la dirección del flujo pasando a través de ella.

Por otra parte, una onda de choque perpendicular a la dirección del flujo es una onda de choque normal. Una onda normal se puede ver en el diagrama de arriba cuando el flujo vuelve a ser paralelo a la línea central. Esta onda normal crea un disco Mach en el flujo. Pasar a través de esta onda normal causa que la temperatura del flujo aumente, encendiendo el exceso de combustible presente. Es esta combustión que hace que los discos Mach resplandecan y se vuelven visibles.

Al igual que la onda oblicua, la onda normal solo aumenta la presión de los gases. Sin embargo, el flujo esta tan comprimido que la presión esta ahora mayor que la presión atmosférica. Como resultado el flujo empieza

a dar vuelta hacia afuera y los gases se expanden, intentando igualar el aire externo. Esta vuelta del flujo se hace a través de una serie de onda de expansión que se reflejan del chorro y hacia la línea central. Estas ondas causan que el flujo se voltee hacia fuera y se reduzca en presión. Las ondas de expansión encuentran en la línea central a su "gemelo", que parte del lado opuesto del inyector, y se reflejan hacia el límite del chorro, también llamado discontinuidad de contacto.

Mientras el flujo pasa a través de estas ondas de expansión, se vuelve paralelo a la línea central y de nuevo se reduce en presión.

La expansión disminuye la presión de la salida, pero esta es ahora más baja que la presión ambiente de nuevo. Como las ondas de expansión alcanzan de nuevo la discontinuidad de contacto, se reflejan de nuevo hacia el interior para crear ondas de compresión. Estas ondas de compresión fuerzan el flujo a dar vuelta hacia el interior y aumenta la presión. Si las ondas de compresión son suficientemente fuertes, van a combinarse en ondas oblicuas y formar un nuevo disco Mach similar a que esta a la salida del inyector. Esta serie de ondas de compresión y de choque aumenta la presión arriba de la del aire externo, causando la formación de una nueva expansión, y así sucesivamente.

Este proceso se repite varias veces para crear una serie de discos de Mach, que conocemos como diamantes de choque.

Un proceso similar ocurre para un flujo bajo-expandido saliendo de un inyector a alta altitud. (Figura 15)

La secuencia de compresión –expansión es idéntica que la descrita para el flujo sobre-expandido, solo que empieza con la creación de una expansión en lugar de ondas oblicuas. Este comportamiento causa que el flujo se vuelva hacia el exterior inicialmente en lugar de comprimirse hacia dentro.

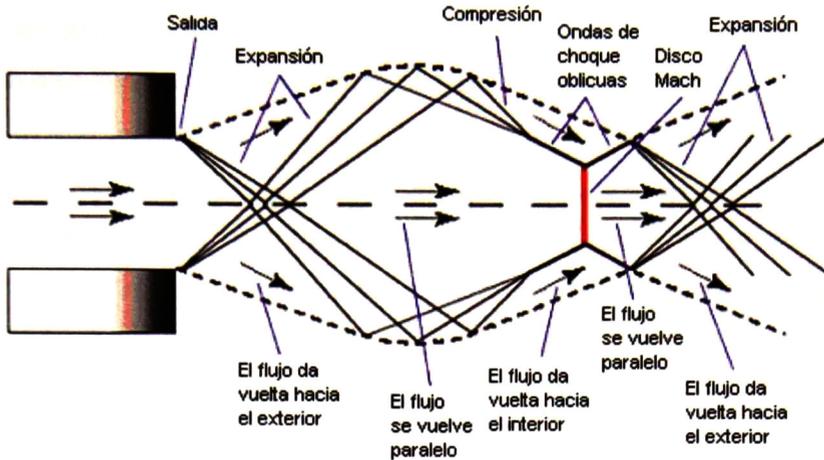


Figura 15- Flujo bajo-expandido

En un gas ideal, el proceso de expansión y contracción continuaría para siempre creando un número infinito de discos Mach. Los gases no son ideales, y la fricción creada entre el aire y el escape resulta en una capa de corte turbulenta (“turbulent shear layer”). Esta capa crea un amortiguamiento (“damping”) que disipa gradualmente la estructura de la onda. La fricción iguala eventualmente las diferencias de presión entre el chorro y la atmósfera, por lo que los diamantes de choque ya no pueden ser formados. [14]

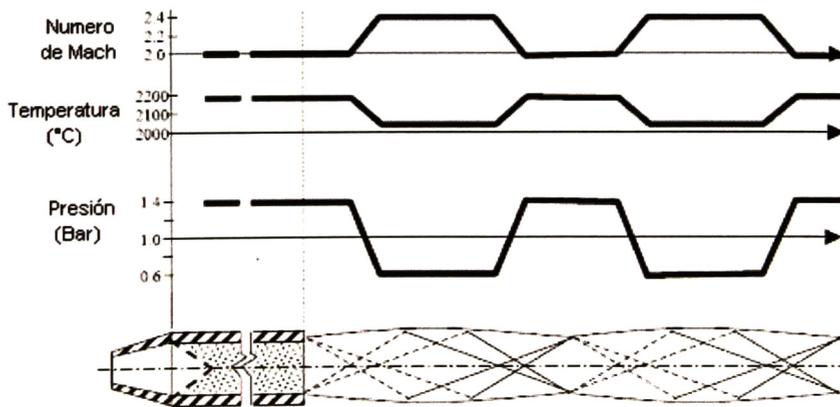


Figura 16- Flujo bajo-expandido: Evolución del número de Mach, de la temperatura y de la presión en los diamantes de choque.

Durante la expansión el número de Mach aumenta, mientras la temperatura y la presión disminuyen. En la fase de compresión, lo contrario ocurre: el número de Mach disminuye mientras la temperatura y la presión aumentan.

Además de la pistola supersónica, el equipo consiste en una unidad de alimentación de gas, un flujometro y una unidad de alimentación de polvo. También se requiere un extractor para el polvo que no se deposita y queda en el aire.

El equipo HVOF genera mucho ruido, de la orden de 120 dB, similar a lo que genera un avión.

En la figura 17, se compara el nivel de ruido generado por el proceso HVOF con el ruido que se puede experimentar todos los días. [4]

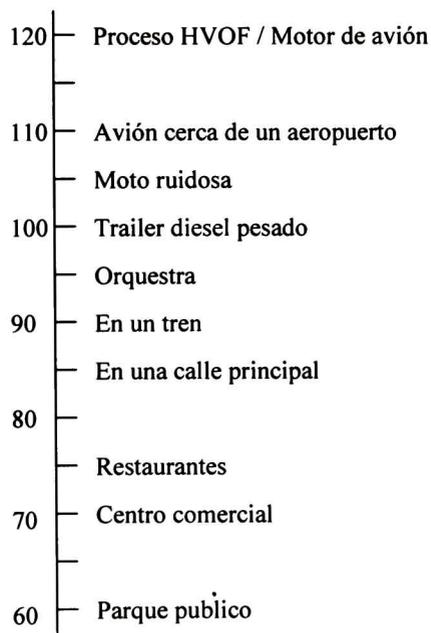


Figura 17- comparación del nivel de ruido del proceso HVOF con ruidos de todos los días

Por este nivel de ruido alto producido por el proceso HVOF, es necesario poner el equipo en una cámara aislada.

Capítulo IV- Flujo compresible

Cuando un flujo se mueve a velocidades comparables a su velocidad del sonido, los cambios de densidad se vuelven significativos y el flujo se define como compresible. Los cambios de densidad son por lo general resultado de cambios de presión de un punto al otro.

Los efectos más importantes de la compresibilidad son la sobresaturación, que hace que el flujo sea limitado por las condiciones sónicas y las ondas de choque que se caracterizan por una discontinuidad en las propiedades del flujo supersónico.

El estudio del flujo compresible toma en cuenta cuatro ecuaciones básicas, que son la ecuación de continuidad, la ecuación de momentum, la ecuación de energía y la ecuación de estado, con cuatro incógnitas que son la presión, la temperatura, la densidad y la velocidad del flujo.

La teoría general del flujo compresible es algo complicado, por lo que se hacen varias simplificaciones, asumiendo que el flujo es adiabático e isentrópico.

1- Ecuación de estado

El flujo de gas se considera como mezcla de gases. Suponiendo la ley de gas perfecto, la ecuación de estado es

$$P = \rho RT \quad \text{Ec.1}$$

Donde P es la presión del gas, ρ la densidad, T la temperatura y R la constante de los gases.

Tenemos la relación siguiente:

$$R = R_u / M_{\text{gas}} \quad \text{Ec.2}$$

R_u : constante universal de los gases ($8314\text{m}^2/\text{s}^2\text{K}$) y M_{gas} : peso molecular del gas

Combinando las ecuaciones 1 y 2 obtenemos:

$$P = \frac{\rho R_u T}{M_{\text{gas}}}$$

Ec.3

2- Definición de velocidad del sonido y numero de Mach

- La *velocidad del sonido* para cualquier fluido, gas o liquido, se define como

$$a^2 = k \left. \frac{\partial P}{\partial \rho} \right|_T$$

Ec.4

Con a la velocidad del sonido, P la presión, ρ la densidad y k la razón de los calores específicos (c_p/c_v)

Para un gas perfecto,

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{R_u T}{M_{\text{gas}}}$$

Ec.5

Lo que da

$$a^2 = k \frac{R_u T}{M_{\text{gas}}}$$

Ec.6

con $k=C_p/C_v$.

Los fluidos incompresibles tiene altas velocidades del sonido, mientras los fluidos compresibles las tiene bajas. Por ejemplo a 20 C y 1 atm, la velocidad del sonido en agua es 1483.2 m/s y en aire es 331.3 m/s

- El *numero de Mach* se define como

$$Ma = \frac{V}{a}$$

Ec.7

donde V es la velocidad del fluido y a la velocidad del sonido en el fluido.

Utilizando la definición de velocidad del sonido (Ec.6), se obtiene

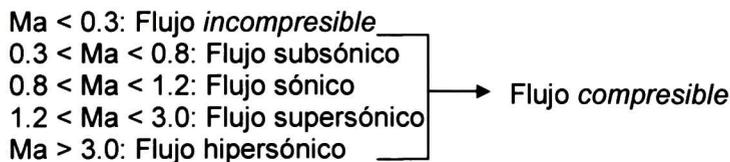
$$Ma^2 = \frac{V^2 M_{gas}}{kR_v T}$$

Ec.8

Una clasificación simple diferencia flujos subsónicos, sónicos y supersónicos:

- Cuando $Ma < 1$, el flujo es subsónico
- Cuando $Ma = 1$, el flujo es sónico
- Cuando $Ma > 1$, el flujo es supersónico

Existe una clasificación más completa para los diferentes tipos de flujo en función de del valor de número de Mach:



Cuando $Ma < 0.3$, las variaciones de densidad son pequeñas por lo que , aunque el fluido sea un gas, se puede considerar como incompresible.

Cuando $Ma < 0.8$, en ninguna zona del flujo se producen ondas de choque

Cuando $Ma > 0.8$, se pueden producir ondas de choque de intensidad creciente conforme aumenta el numero de Mach. [12, 15-16]

3- Ecuaciones

Consideramos un flujo unidimensional por un ducto de sección $A=A(x)$. En una determinada sección, el fluido va a una velocidad V , con presión P , temperatura T y densidad ρ .

El flujo considerado es adiabático y isentrópico.

Tenemos la ecuación de estado (Ec.1)

$$P=\rho RT$$

La entalpía para un gas ideal de calor específico constante es

$$h = c_p T$$

Ec.9

con T la temperatura, c_p el calor específico y h la entalpía

La entropía para un gas ideal de calor específico constante es

$$s = s_0 + c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0}$$

Ec.10

Con s la entropía, T la temperatura, P la presión y R la constante de los gases.

En un proceso isentrópico la entropía es constante, por lo que obtenemos

$$PT^{\frac{k}{k-1}} = cste \text{ y } P\rho^{-k} = cste$$

Ecs.11 y 12

Con $k=c_p/c_v$, P la presión, T la temperatura y ρ la densidad

Del primer principio de la termodinámica, obtenemos la ecuación de energía:

$$\delta Q - \delta W = d\left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right)$$

Ec.13

Con Q el calor, W el trabajo, V la velocidad y gz la energía potencial

Para un proceso adiabático sin dispersión ni trabajo y despreciando la energía potencial, obtenemos

$$h + \frac{V^2}{2} = cste = h_0$$

Ec.14

h_0 es la máxima entalpía que puede adquirir el fluido cuando se lleva al reposo isentrópico.

La ecuación de continuidad para un flujo estacionario unidimensional es

$$\dot{m} = \rho AV = cste \text{ lo que da } \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} = 0$$

Ec.15

Para un flujo estacionario en un tubo de corriente, la ecuación de movimiento es

$$\frac{dP}{\rho} + VdV = 0$$

Ec.16

Las ecuaciones anteriores se pueden expresar en función del número de Mach, dando:

$$\frac{dV}{V} = - \frac{dP}{\rho V^2} = \frac{dA}{A} \frac{1}{Ma^2 - 1}$$

Ec.17

El cambio de área tiene efectos opuestos según que el flujo es subsónico o supersónico debido al término $Ma^2 - 1$

	Flujo subsónico	Flujo supersónico
$dA > 0$	$dV < 0, dP > 0$	$dV > 0, dP < 0$
$dA < 0$	$dV > 0, dP < 0$	$dV < 0, dP > 0$

Para $Ma=1$, se tiene el área mínima. [16]

4- Sobresaturación

Se habla de flujo sobresaturado cuando un fluido a cierta presión y temperatura pasa a través de un área limitada (como la garganta de un inyector convergente-divergente) hacia una zona de presión más baja y el flujo másico alcanza un máximo. Por la conservación de masa, la velocidad debe aumentar (para condiciones iniciales subsónicas) mientras el fluido pasa a través del área más pequeña y la presión disminuye. Este fenómeno existe solo en flujos compresibles.

El punto al cual ocurre la sobresaturación para condiciones adiabáticas es cuando la velocidad esta a condiciones sónicas o a número de mach 1. El flujo másico se puede incrementar si se aumenta la presión, o si se disminuye la temperatura corriente arriba.

Todos los gases fluyen de una zona de alta presión a una zona de presión más baja. Existen diferentes situaciones en donde la sobresaturación ocurre, como es el cambio de área en un inyector de Laval.

En el caso de un inyector, el flujo fluye hacia el inyector si la presión corriente abajo es menos que la presión corriente arriba. La velocidad máxima del flujo se encuentra en la garganta del inyector, donde el área es mínima. Cuando la presión corriente abajo se disminuye, el flujo llega al inyector con más velocidad. Pero llega un punto donde el flujo alcanza la velocidad sónica en la garganta, y aunque exista más disminución en la presión corriente abajo no tendrá efecto sobre el flujo, Se dice que el inyector esta sobresaturado y el flujo másico del fluido es el máximo. [17]

5- Ondas de choque

Una onda de choque es un tipo de propagación de una perturbación. Se puede propagar a través de un medio (sólido, líquido o gas) y se caracteriza por una discontinuidad abrupta en las características del medio.

A través de una onda de choque las propiedades del flujo cambian casi de manera instantánea. La presión y la temperatura aumentan de manera extremadamente rápida.

Existen ondas de choque normales, perpendicular a la dirección del flujo, y ondas de choque oblicuas, que tiene cierto ángulo con la dirección del flujo.

Las ondas de choque se forman cuando la velocidad del gas cambia a más de la velocidad del sonido.

Medidas del espesor de las ondas de choque resultaron en valores del orden de magnitud de micrómetros. [18]

a) Ondas de choque normales

Una onda de choque normal es perpendicular a la dirección del flujo.

A partir de las ecuaciones de continuidad y de energía, y considerando un gas ideal, se obtienen las relaciones que dan los cambios de las propiedades del flujo a través de una onda de choque normal.

Las razones de las propiedades son función de $k=c_p/c_v$ y del número de Mach corriente arriba Ma_1 :

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{k+1} [2kMa_1^2 - (k-1)] \quad \text{y} \quad Ma_2^2 = \frac{(k-1)Ma_1^2 + 2}{2kMa_1^2 - (k-1)}$$

Ecs. 18 y 19

Como Ma_1 es supersónico, para todo k , Ma_2 debe ser subsónico.

Una onda de choque normal desacelera un flujo de condiciones supersónicas a subsónicas. [12]

b) Ondas de choque oblicuas

Una onda de choque oblicua esta inclinada respecto a la dirección del flujo. Se produce cuando el flujo encuentra una esquina que lo comprime (Figura 18)

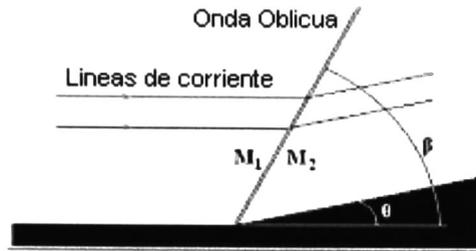


Figura 18- Onda de choque oblicua

Las líneas de corriente son desviadas después de la onda de choque.

La manera más común de producir una onda de choque oblicua es de poner una cuña en un flujo compresible supersónico.

De igual manera que para una onda normal, la onda oblicua tiene un espesor del orden de micrómetros y las propiedades del flujo cambian cuando este pasa a través de la onda. La presión y la temperatura aumentan. El flujo se desacelera pero dependiendo del ángulo de la onda, puede seguir siendo supersónico o volverse subsónico.

Pero mientras que para la onda normal el flujo que la atraviesa no cambia de dirección, para la onda oblicua la dirección del flujo corriente arriba es diferente de la dirección corriente abajo. [19]

c) Ondas de expansión de Prandtl-Meyer

Cuando un flujo supersónico se encuentra con una esquina convexa, se forma una expansión que consiste en un número infinito de ondas de expansión (o ondas Mach) centradas en la esquina (Figura 19)

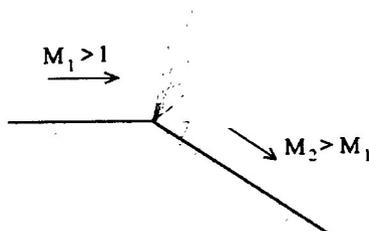


Figura 19- Ondas de Prandtl-Meyer

Cuando pasa a través de esas ondas, el flujo se acelera y el número de Mach aumenta, mientras que la presión y la temperatura disminuyen. [20]

d) Ondas Mach

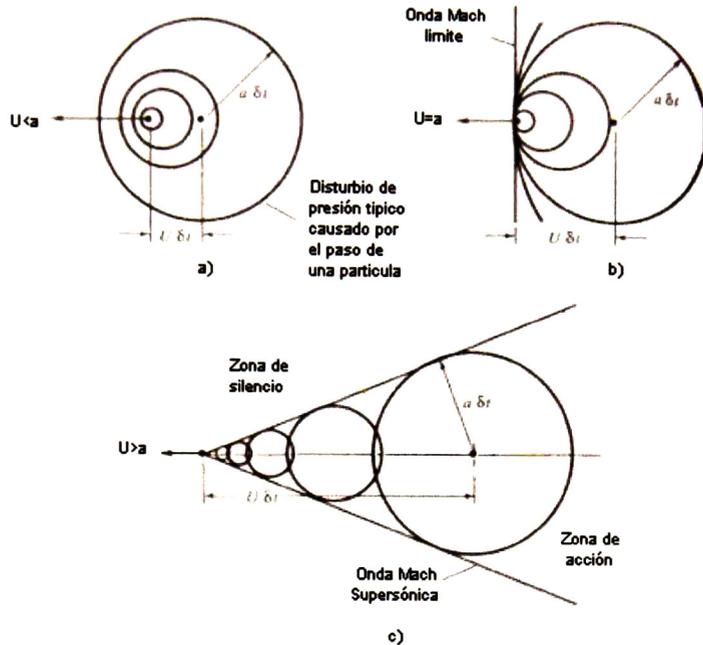


Figura 20- Ondas Mach

La figura 20 muestra las ondas de sonido emitidas por una partícula moviéndose a velocidad U a través de un fluido que tiene una velocidad del sonido a .

Dependiendo si la velocidad de la partícula es subsónica o supersónica, el comportamiento de esas ondas de sonido es diferente.

En el caso a), $Ma = U/a < 1$. Las ondas se mueven en todas las direcciones y no se atrapan una con la otra. Se puede oír o sentir el aumento de presión antes que nos alcance.

En el caso b), $Ma = 1$. Las ondas se mueven a la velocidad de la partícula y se juntan a la izquierda de la posición de la partícula en lo que llamamos una onda Mach. Situándonos a la izquierda de la partícula, no se oye el la llegada del movimiento.

En el caso c), $Ma > 1$. Las ondas no pueden atraparse con la partícula que las crea. Son tangentes a un cono, llamado cono Mach. No se oye el disturbio causado por la partícula supersónica hasta estar en la zona de acción dentro del cono Mach. [12]

Capítulo V- Simulación matemática

1- Antecedentes

La modelación y la simulación matemática representa una posibilidad de optimizar sistemas.

En los últimos años la modelación matemática ha sido utilizada para estudiar el proceso HVOF.

Se han estudiado la evolución de los campos de velocidad, así como el movimiento y la temperatura de las partículas de diferente tamaño. Este análisis permite caracterizar la influencia de las variables de proceso controlables (presión de la cámara de combustión, razón oxígeno / combustible, distribución de tamaño de las partículas) sobre los valores de velocidad y temperatura de las partículas al impacto sobre el sustrato. [21]

También se llevó a cabo un análisis paramétrico para estudiar la relación que existe entre los parámetros de proceso, el comportamiento en vuelo de las partículas y la microestructura de los recubrimientos. [22,23]

La modelación del proceso HVOF reveló que la velocidad y el grado de fusión de las partículas al impacto con el sustrato tienen un papel importante en la formación de la microestructura del recubrimiento [24]

También se utilizó un modelo computacional para investigar la combustión y la dinámica de los gases en el proceso HVOF utilizando propano líquido. [25]

2- Modelo y caso de referencia

a) Condiciones de simulación

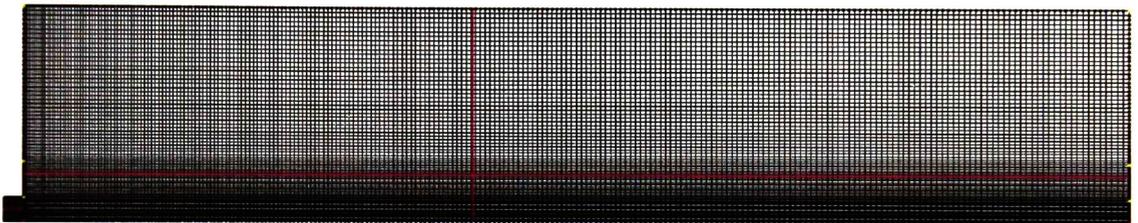
Se hizo la simulación matemática del proceso HVOF con el código comercial CFD-ACE+. Es uno de los códigos CFD (Computational Fluid Dynamics) más avanzados.

Permite llevar a cabo simulaciones combinando fenómenos de fluido, térmicos, químicos, biológicos, eléctricos y mecánicos.

Debido a que la geometría de la pistola HVOF es simétrica alrededor de sus ejes, utilizamos una malla axi-simétrica 2D. La geometría se divide en 2 partes: un dominio que representa la parte interior de la pistola, y un dominio que representa la parte afuera de la pistola (Figura 21)



(a)



(b)

Figura 21- (a) Dominio interior de la pistola y (b) Dominio exterior a la pistola.

El dominio completo contiene 27490 celdas. La malla es más fina dentro de la pistola y a lo largo del eje de simetría, y más gruesa en el resto del dominio.

Se consideran 3 entradas: la de aire para enfriar las paredes, la de oxy-fuel para la combustión y la de Nitrógeno para transportar las partículas (figura 22).

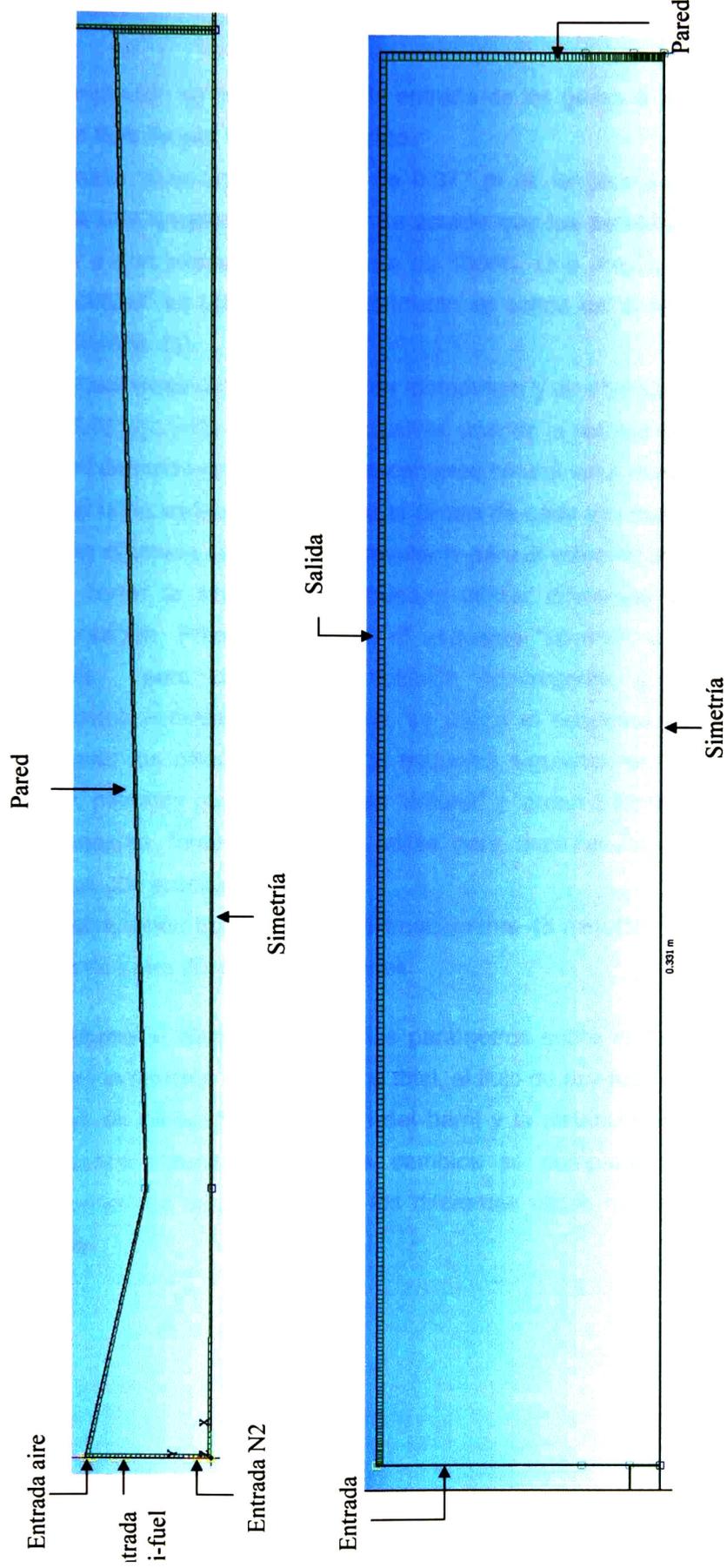


Figura 22- Geometría utilizada para la simulación matemática

La simulación se realiza desde la entrada de los gases a la pistola hasta que el flujo de gas llegue al sustrato.

La pistola tiene una dimensión de 0.077 m de longitud y el dominio de afuera una longitud de 0.25 m. Se asume que las paredes de la pistola están a una temperatura uniforme de 1000K. Una presión constante de 100000N/M^2 se utiliza para la condición de salida del dominio de afuera de la pistola. [1]

Las ecuaciones de continuidad, de momentum y de energía son resueltas por el código CFD-ACE+. Se resuelven usando la técnica de volumen de control centrado en la celda ("cell-centered control volume approach"), por la cual cada variable se resuelve al centro de cada volumen de control, y el valor obtenido se considera prevalecer para el volumen de control total. Para correr la simulación se pueden utilizar diferentes esquemas de interpolación. Primero se utiliza el esquema "upwind", que es el más estable, para obtener una solución convergente, y utilizando los resultados obtenidos como inicio, se utiliza el esquema siguiente para continuar los cálculos y pasar al esquema siguiente, el "central", y así sigue, pasando por los esquemas "orden2" y "orden 2 limiter" hasta llegar al esquema "orden3", que se utiliza para capturar los diamantes de choque con precisión.

Una simulación típica dura aproximadamente 45 minutos. Por cada caso se corrió entre 25 y 30 simulaciones.

Se estudio el efecto de diferentes parámetros sobre el flujo de gas. Se cambió la relación de flujo másico total, el flujo de oxy-fuel, el flujo de aire, el flujo de nitrógeno, la longitud del barril y la distancia al sustrato. Los resultados obtenidos de estos cambios se compararon al caso de referencia. La tabla 1 muestra los diferentes casos que se tomaron en cuenta.

	Oxy-fuel	Aire	N ₂	Longitud barril	Distancia al sustrato
Ref	M _{OF}	M _A	M _N	L	D
Caso 1	0.33 M_{OF}	0.33M_A	0.33M_N	L	D
Caso 2	0.5M_{OF}	0.5M_A	0.5M_N	L	D
Caso 3	0.67M_{OF}	0.67M_A	0.67M_N	L	D
Caso 4	1.33M_{OF}	1.33M_A	1.33M_N	L	D
Caso OF0.5	0.5M_{OF}	M _A	M _N	L	D
Caso OF2	2M_{OF}	M _A	M _N	L	D
Caso A0.5	M _{OF}	0.5M_A	M _N	L	D
Caso A2	M _{OF}	2M_A	M _N	L	D
Caso N0.5	M _{OF}	M _A	0.5M_N	L	D
Caso N2	M _{OF}	M _A	2M_N	L	D
Caso L0.5	M _{OF}	M _A	M _N	0.5L	D
Caso L2	M _{OF}	M _A	M _N	2L	D
Caso D0.5	M _{OF}	M _A	M _N	L	0.5D

Tabla 1. Casos de estudio

b) Caso de referencia

Para el caso de referencia, se tomaron datos de la literatura. [26]

Para este caso, se considero como combustible el propileno C₃H₆ mezclándose con oxígeno para la combustión, y nitrógeno como el gas que transporta las partículas de polvo. Aire se utiliza para enfriar las paredes de la pistola. La velocidad de entrada del oxy-fuel y del aire es de 300 m/s, y la del nitrógeno es de 13 m/s.

Las figuras 23, 24 y 25 muestran las graficas de velocidad, presión y temperatura.

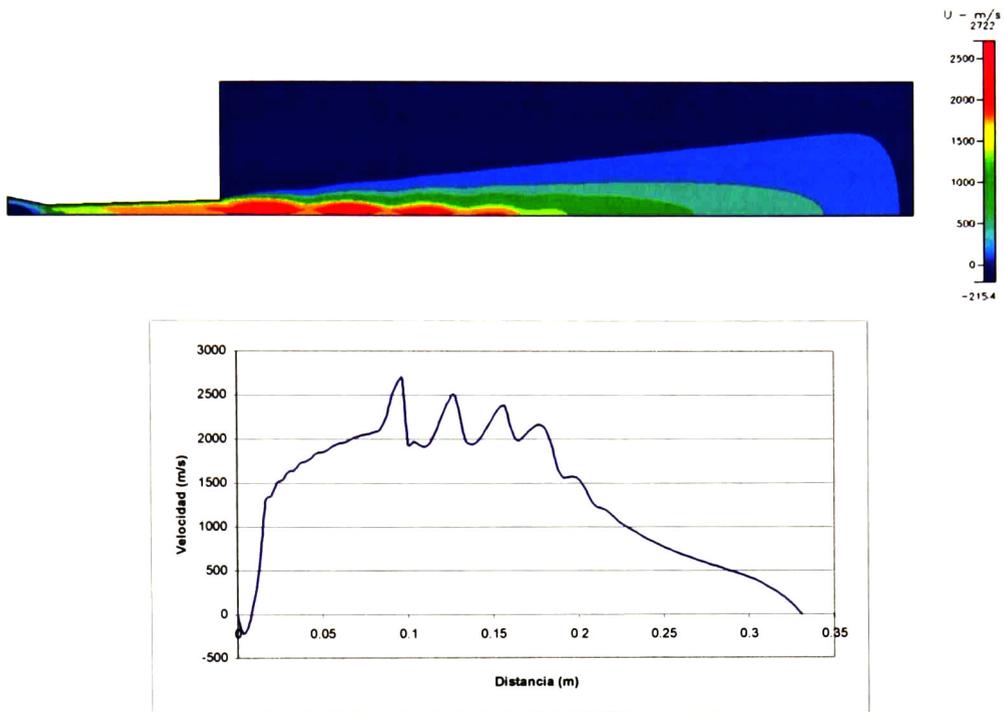


Figura 23- Velocidad (m/s) vs. Distancia (m)

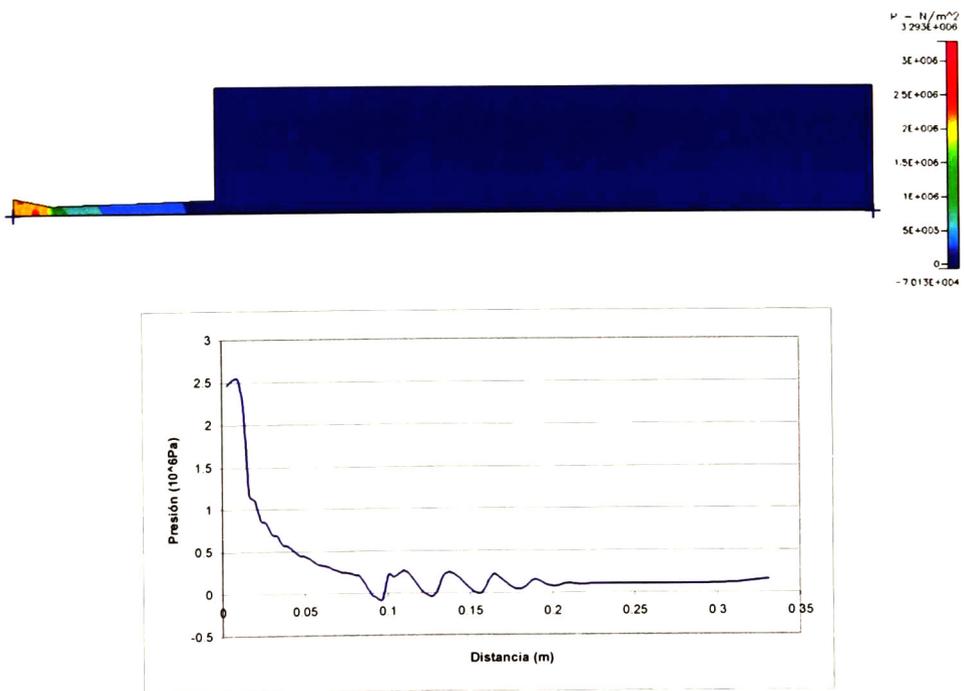


Figura 24- Presión (10^6 Pa) vs. Distancia (m)

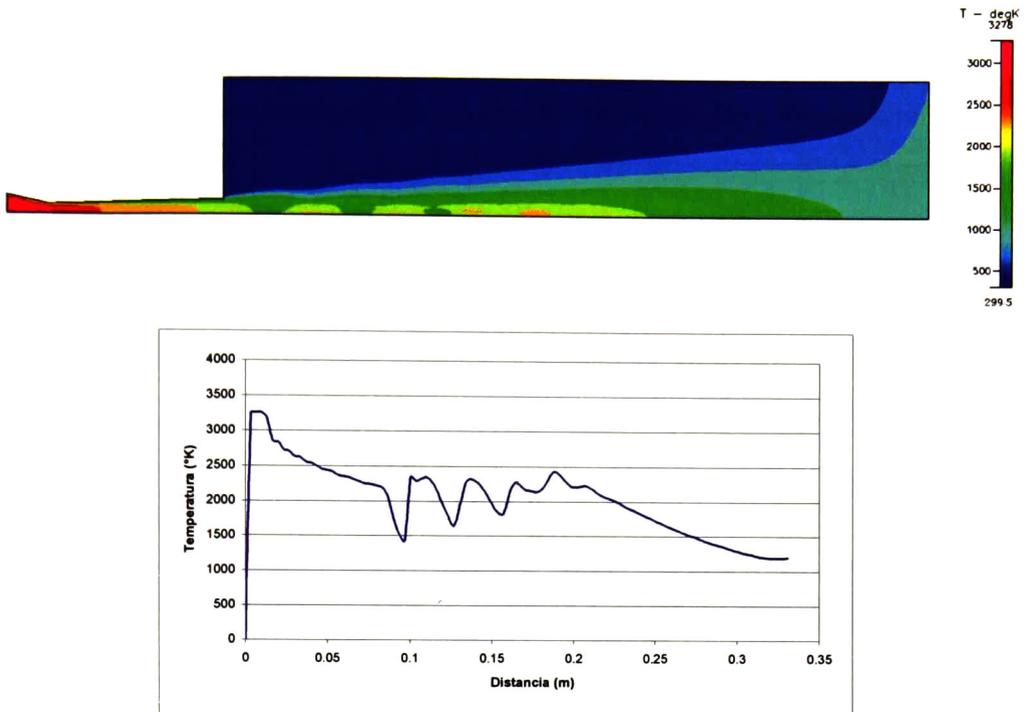


Figura 25- Temperatura (°K) vs. Distancia (m)

La velocidad a la salida de la pistola es de aproximadamente 2100 m/s, y la temperatura de 2200 K.

Se puede ver que la temperatura y la presión mas alta se encuentran dentro de la pistola ($0 < x < 0.08$), en la cámara de combustión, mientras la velocidad mas alta se encuentra a la salida de la pistola ($x > 0.08$).

La temperatura más alta alcanzada es de 3300 K y la presión de $2.5E+06$ Pa.

Afuera de la pistola, se llega a una velocidad máxima de 2700 m/s, en un diamante de choque.

La temperatura alta alcanzada en la parte convergente de la pistola es el resultado de la combustión. En la parte divergente de la pistola, la temperatura empieza a disminuir debido a la transferencia de energía a energía cinética.

En la figura 25 se puede ver que la temperatura es mas baja a lo largo de las paredes de la pistola, esto debido al enfriamiento por aire.

A la salida de la pistola, la velocidad, la temperatura y la presión presentan variaciones, debido a la presencia de los diamantes de choque, dentro de los cuales la temperatura y la presión disminuyen, mientras la velocidad aumenta.

Se pueden distinguir 4 diamantes de choques bien marcados y 2 más pequeños:



Figura 26- Presencia de los diamantes de choque

Por lo que se refiere al número de Mach, este alcanza el valor de 1 en la garganta de la pistola ($x=0.015$) y sigue aumentando hasta la salida de la pistola ($x=0.08$) donde alcanza $Ma=2.1$ (Figura 26).

El número de Mach varía después con los diamantes de choque. En este caso, aumenta durante la expansión hasta $Ma=3.3$ y va disminuyendo conforme pasa por las fases de compresión-expansión de los diamantes de choques.

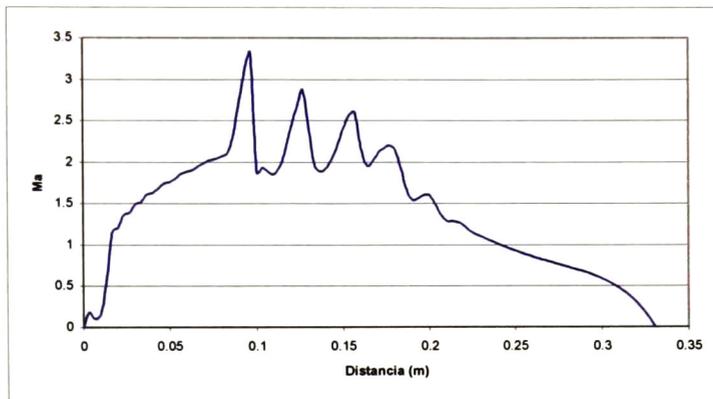
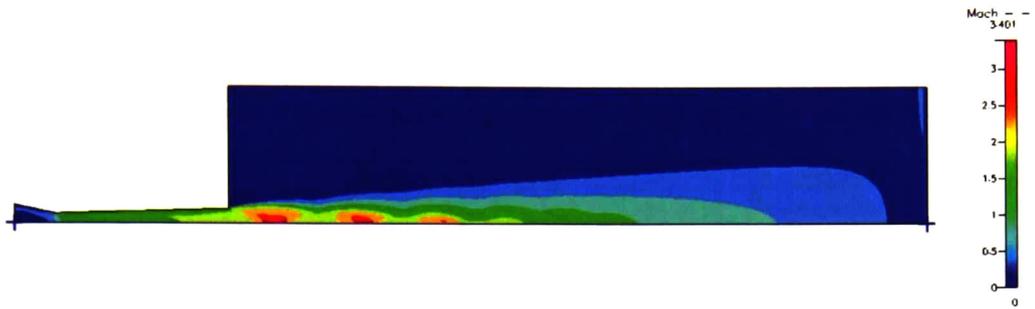


Figura 27- Ma vs. Distancia (m)

3- Resultados

a) Efecto del flujo másico total

Se investigó el efecto del flujo másico total sobre la velocidad, la temperatura y la presión del sistema. Se multiplico la velocidad de entrada por 0.33, 0.5, 0.67 y 1.33.

Los resultados se muestran en las figuras 28,29 y 30.

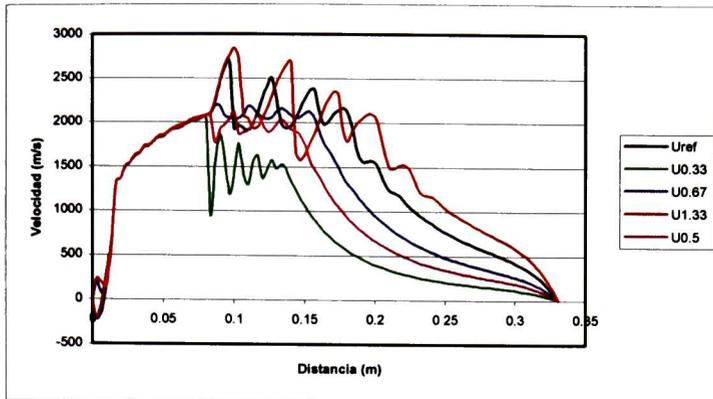


Figura 28- Efecto del flujo másico total sobre la velocidad (m/s)

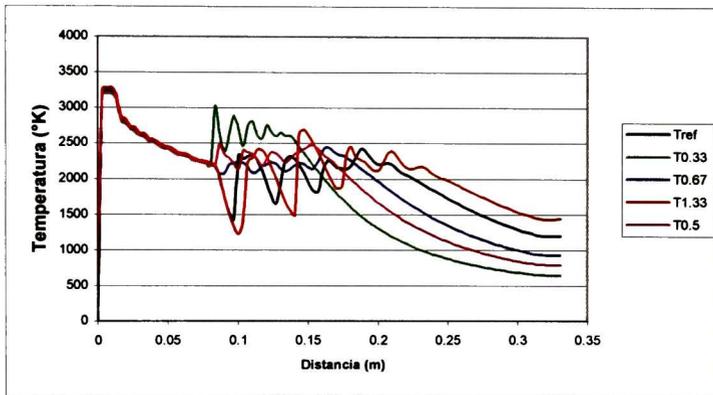


Figura 29- Efecto del flujo másico total sobre la temperatura (°K)

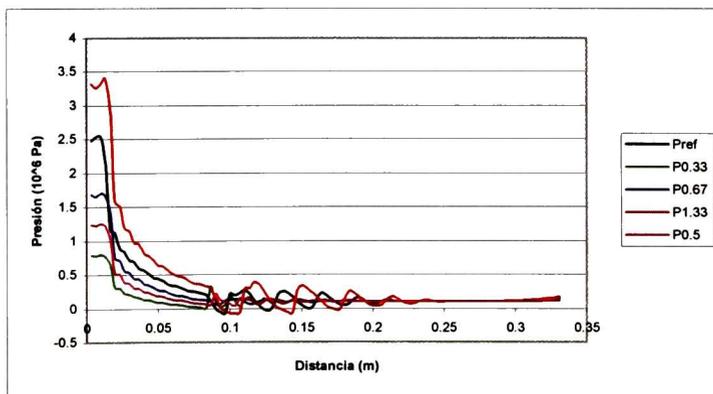


Figura 30- Efecto del flujo másico total sobre la presión (10^6 Pa)

Se puede ver que el cambio del flujo másico total tiene poco efecto sobre la velocidad y la temperatura dentro de la pistola ($0 < x < 0.08$) pero influye sobre la presión. La presión dentro de la pistola aumenta con el aumento del flujo másico total. La presión adentro de la cámara de combustión es la más alta, así como la temperatura. La presión en la cámara de combustión aumenta, siendo esta de $2.47E+06$ Pa para el caso de referencia, y $3.32E+06$ Pa para el caso 4 ($Mx1.33$). La temperatura máxima alcanzada es la de la cámara de combustión y aumenta ligeramente con el aumento del flujo másico total. La temperatura máxima del caso de referencia es de 3256 K, mientras que para el caso 4 es de 3281 K.

La velocidad va aumentando en la pistola, hasta la salida, y después varía en función de los diamantes de choque. El aumento del flujo másico total conduce a un aumento de la velocidad afuera de la pistola (para el caso de referencia la velocidad máxima es 2692 m/s, y para el caso 4 es 2840 m/s) y se puede ver que el flujo se mantiene a una velocidad más alta sobre una distancia mayor. Esto debe de afectar el comportamiento de las partículas y por lo tanto la calidad del recubrimiento. En muchos casos se recomienda utilizar un flujo másico total máximo.

El espacio entre los diamantes de choque aumenta con el aumento del flujo másico total.

Se pueden distinguir dos casos a la salida de la pistola: un flujo bajo-expandido o un flujo sobre-expandido.

Los casos 1.33, ref. y 0.67 son bajo-expandido, y los casos 0.5 y 0.33 son sobre-expandido.

En el caso bajo-expandido, la presión de salida de la pistola es mayor que la presión atmosférica y en el caso sobre-expandido, la presión de salida de la pistola es menor que la presión atmosférica ($P_{atm} = 0.1E+06$ Pa).

En los casos 0.33 y 0.5, la presión de salida es $0.0071E+06$ Pa y $0.062E+06$ Pa respectivamente, Y en los casos ref., 0.67 y 1.33, esta presión es $0.223E+06$ Pa, $0.116E+06$ Pa y $0.331E+06$ Pa, respectivamente.

En las figuras 28, 29 y 30 se puede ver que para el flujo bajo expandido la velocidad a la salida de la pistola aumenta mientras la presión y la temperatura disminuyen, y por lo contrario, en el caso sobre-expandido, la velocidad a la salida disminuye mientras la presión y la temperatura aumentan.

b) Efecto del flujo de oxy-fuel

Cambiamos el flujo de oxy-fuel manteniendo constantes las otras variables. El caso of0.5 tiene un flujo que es la mitad del caso de referencia y el caso of2 tiene un flujo que es el doble del caso de referencia.

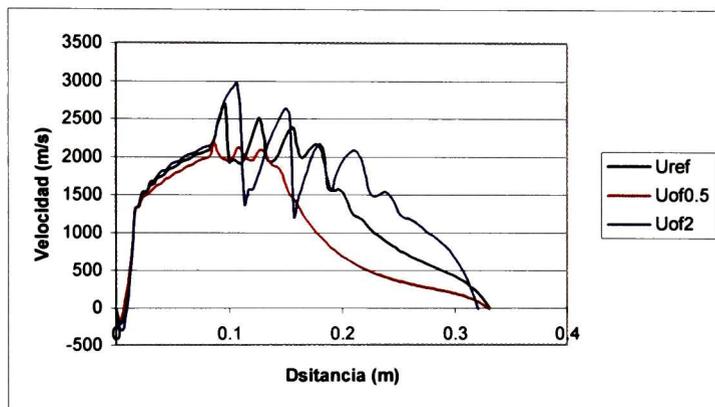


Figura 31- Efecto del flujo de Oxyfuel sobre la velocidad (m/s)

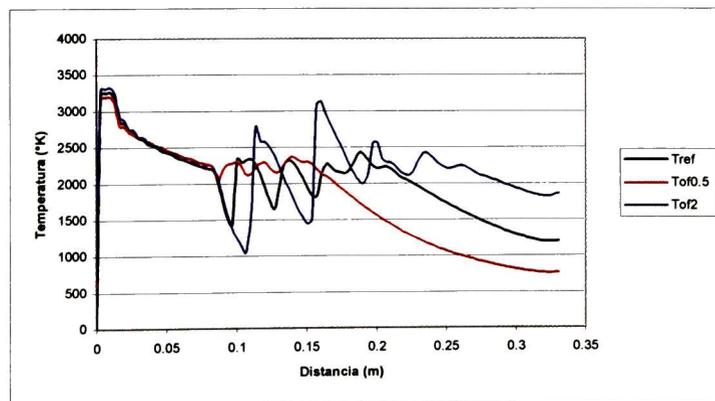


Figura 32- Efecto del flujo de Oxyfuel sobre la temperatura (°K)

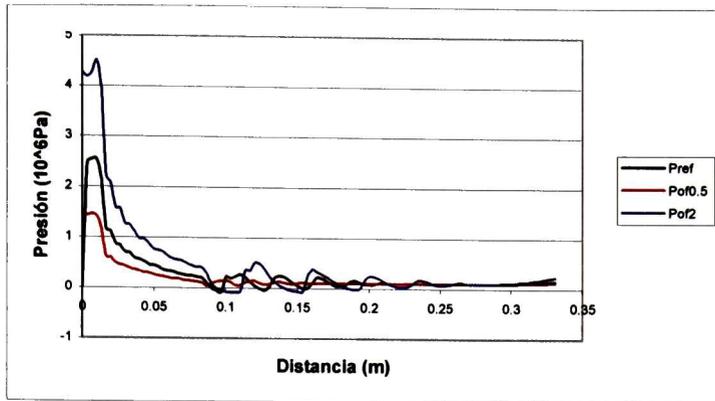


Figura 33- Efecto del flujo de Oxyfuel sobre la presión (10^6Pa)

Se puede ver en las figuras 31, 32 y 33 los resultados obtenidos. Aumentando el flujo de oxy-fuel aumenta la velocidad y la temperatura fuera de la pistola, mientras que dentro de la pistola, en la parte convergente ($x < 0.15$) el cambio de flujo de oxy-fuel tiene muy poco efecto. El hecho de que la velocidad dentro de la pistola no tenga cambio se debe al hecho que en la garganta el flujo es sobresaturado y tiene un número de Mach máximo de 1.

En la parte divergente de la pistola, la velocidad y la temperatura empiezan a tener unos pocos cambios. La diferencia de velocidad alcanza 200 a 300 m/s en el barril, y la diferencia de temperatura alcanza 100 K.

Llegando a la salida de la pistola, la velocidad y la temperatura tienen un cambio notable. La diferencia de velocidad alcanza unos 600 m/s, y la diferencia de temperatura unos 700 K.

El cambio del flujo de oxy-fuel resulta en cambios en la presión adentro y afuera de la pistola.

c) Efecto del flujo de aire

Las figuras 34, 35 y 36 muestran el efecto del flujo de aire sobre la velocidad, temperatura y presión. En uno de los casos se dividió el flujo de aire por 2, y en el otro se multiplicó por 2.

El propósito del flujo de aire es proteger las paredes de la pistola de la exposición a las altas temperaturas. Disminuye la transferencia de calor por convección.

Existe una mezcla del aire con la flama, pero este es ligero, por lo que el efecto es pequeño sobre el flujo de gas oxy-fuel.

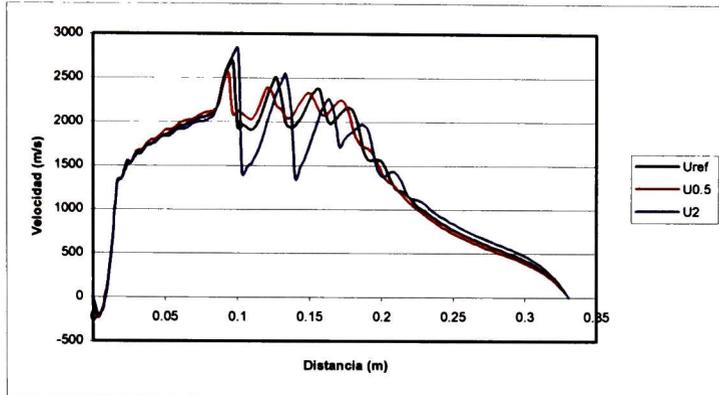


Figura 34- Efecto del flujo de aire sobre la velocidad (m/s)

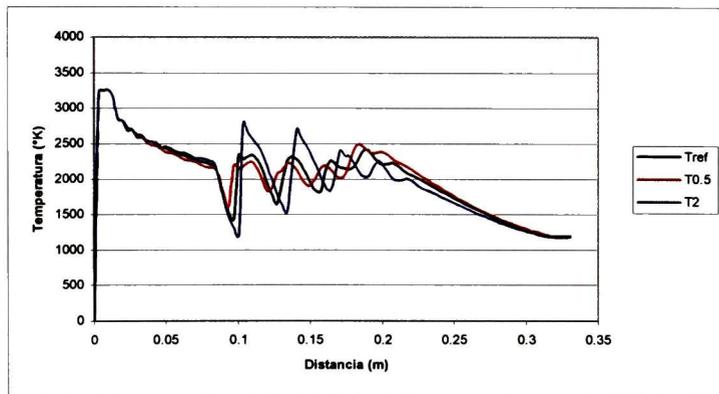


Figura 35- Efecto del flujo de aire sobre la temperatura (°K)

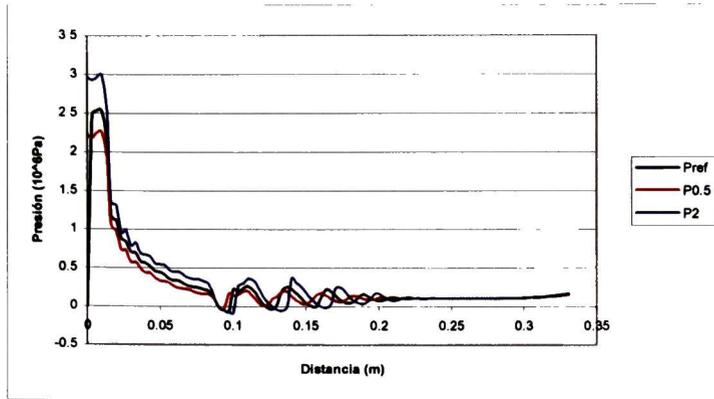


Figura 36- Efecto del flujo de aire sobre la presión (10^6Pa)

El cambio del flujo de aire no tiene efecto sobre la velocidad y la temperatura adentro de la pistola ($X < 0.08$). A la salida de la pistola, el aumento del flujo de aire lleva a un aumento de la velocidad. La velocidad máxima alcanzada pasa de 2700 m/s a 2850 m/s. La temperatura máxima alcanzada afuera de la pistola aumenta, pasando de 2340 K a 2804 K.

d) Efecto del flujo de nitrógeno

Las figuras 37, 38 y 39 muestran el efecto del flujo de Nitrógeno sobre la velocidad, la temperatura y la presión. Se puede ver que los resultados obtenidos son los mismos para el caso de referencia que para un flujo multiplicado por 0.5 o 2. Pero lo mejor es tener un flujo de Nitrógeno mínimo para tener una alimentación "suave" de las partículas.

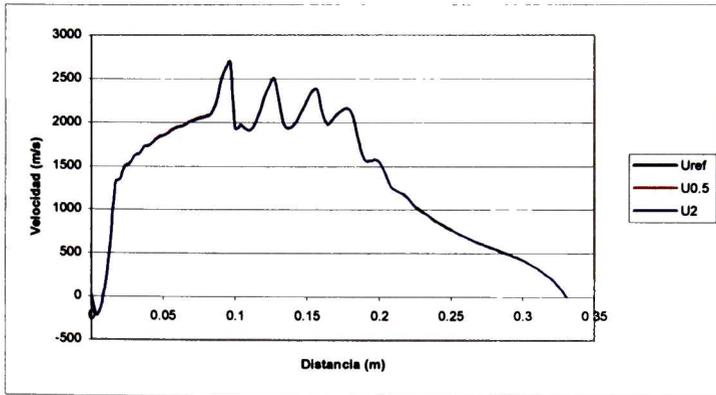


Figura 37- Efecto del flujo de nitrógeno sobre la velocidad (m/s)

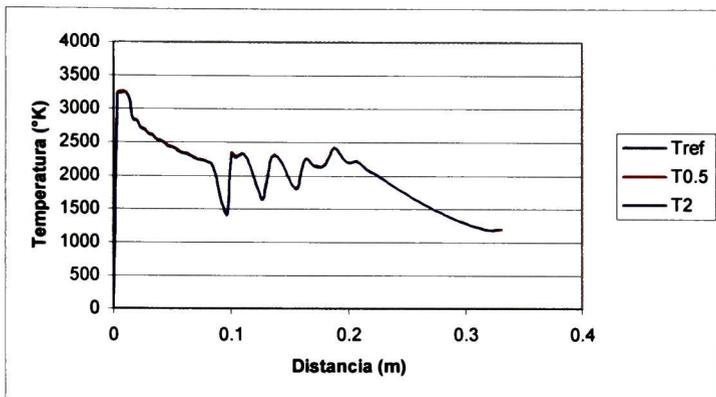


Figura 38- Efecto del flujo de nitrógeno sobre la temperatura (°K)

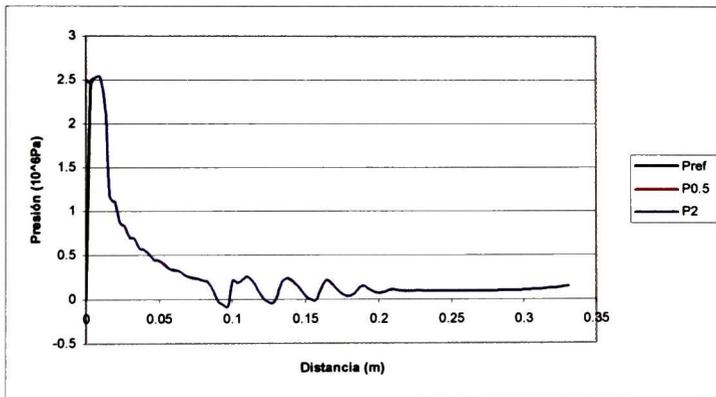


Figura 39- Efecto del flujo de de nitrógeno sobre la presión (10⁶Pa)

e) Efecto del cambio de la longitud del barril

Se cambio la longitud del barril de la pistola, que la parte situada entre la garganta y la salida de la pistola. En un caso se multiplicó esta longitud por 0.5, y en otro por 2. Los resultados del efecto de este cambio sobre la velocidad, la temperatura y la presión se presentan en las figuras 40, 41 y 42.

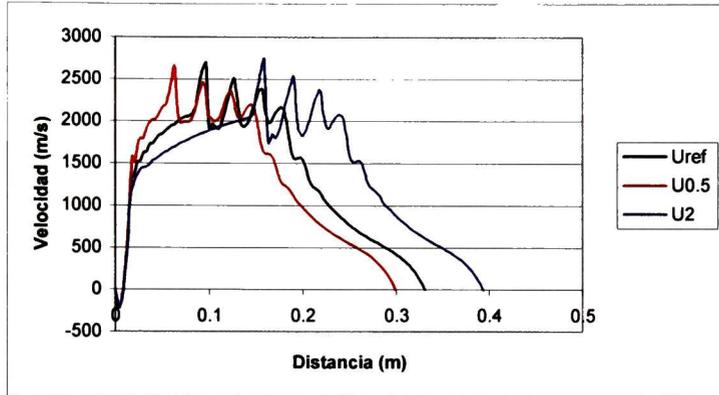


Figura 40- Efecto de la longitud del barril sobre la velocidad (m/s)

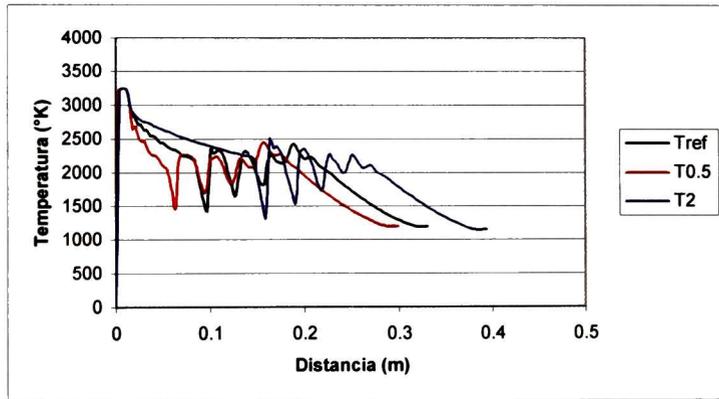


Figura 41- Efecto de la longitud del barril sobre la temperatura (°K)

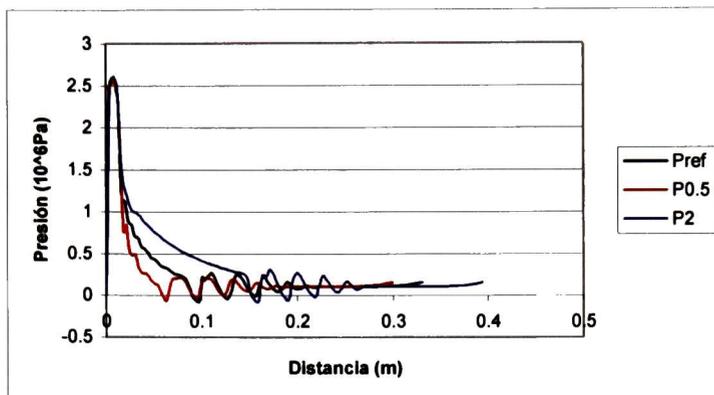


Figura 42- Efecto de la longitud del barril sobre la presión (10^6Pa)

El cambio de la longitud del barril no tiene efecto sobre el flujo de gas en la parte convergente de la pistola ($x < 0.015$).

En la parte divergente, la velocidad aumenta más lentamente para un barril más largo, y la temperatura disminuye más lentamente que para un barril más corto.

A la salida del barril, la velocidad máxima alcanzada es mayor para un barril más largo, así como la temperatura máxima alcanzada. En el chorro supersónico, se puede notar que tanto la velocidad y la temperatura son más altas con un barril más largo. Por ejemplo, en la posición $x = 0.25$, la velocidad para el barril más corto es de 550 m/s mientras que para el barril más largo es de 1575 m/s. En esta posición la velocidad del caso de referencia es de 766 m/s.

Aumentar la longitud del barril resulta en que la velocidad está mantenida más alta por más tiempo, lo que ayuda a acelerar las partículas.

f) Efecto del cambio de la distancia al sustrato

Se cambió la distancia entre la salida de la pistola y el sustrato. Se dividió esta distancia por 2. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 43, 44 y 45.

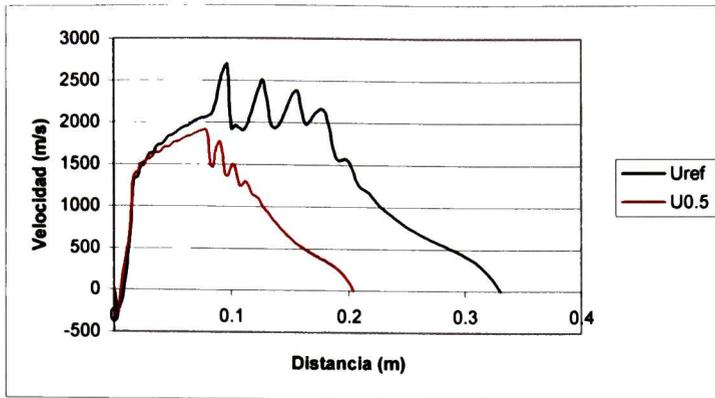


Figura 43- Efecto de la distancia al sustrato sobre la velocidad (m/s)

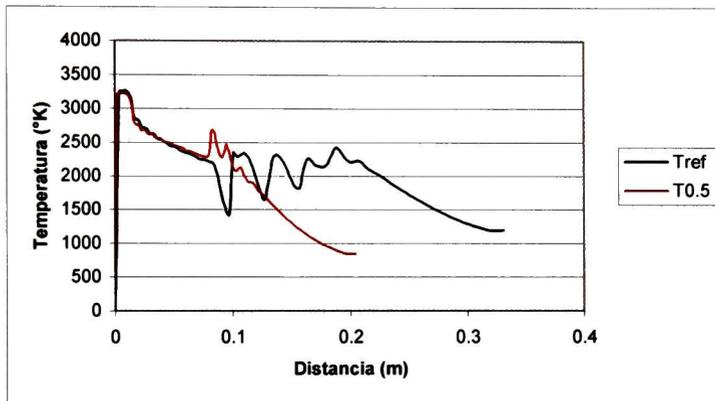


Figura 44- Efecto de la distancia al sustrato sobre la temperatura (°K)

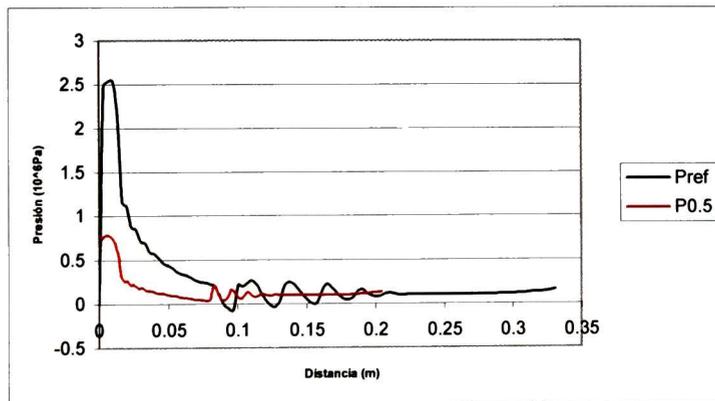


Figura 45- Efecto de la distancia al sustrato sobre la presión (10^6 Pa)

Se puede ver que la velocidad disminuye drásticamente cuando la distancia al sustrato se divide por 2. La velocidad máxima alcanzada pasa de 2692 m/s a 1916 m/s. En la parte convergente de la pistola, la diferencia es mínima, pero después de la garganta, esta diferencia se acentúa más y más.

Por otra parte, la presión máxima pasa de $2.53E+06$ Pa a $0.79E+06$ Pa.

Por lo que concierne la temperatura, esta no tiene mucha diferencia adentro la pistola, pero afuera de esta, la temperatura disminuye muy rápidamente.

Capítulo VI- Conclusiones

En este trabajo se estudio el efecto de diferentes condiciones de operación sobre el sistema. Los resultados obtenidos fueron comparados con el caso de referencia, que es el caso de una geometría típica y unas condiciones de operación estándares. Para este caso de referencia, se considero como combustible el propileno C_3H_6 mezclándose con oxígeno para la combustión, y nitrógeno como el gas que transporta las partículas de polvo. Aire se utiliza para enfriar las paredes de la pistola. La velocidad de entrada del oxy-fuel y del aire es de 300 m/s, y la del nitrógeno es de 13 m/s.

Para el caso de referencia, el flujo de gas tiene una velocidad baja en la parte convergente de la pistola y es acelerado en la garganta hasta $Ma=1$, que representa la condición de sobresaturación, y el flujo es acelerado a velocidades supersónicas en la parte divergente, hasta alcanzar $Ma=2.1$ a la salida de la pistola (aproximadamente 2100 m/s). La velocidad máxima alcanzada afuera de la pistola de 2692 m/s. El flujo se desacelera y se enfría mientras pasa a través de seis diamantes de choque.

La temperatura máxima alcanzada se encuentra en la cámara de combustión y es de 3256 K, y pasando la garganta y en la parte divergente, la temperatura va disminuyendo, ya que la energía térmica se convierte en energía cinética.

La presión máxima alcanzada también se encuentra en la cámara de combustión, lo que permite obtener un flujo transónico en el inyector.

Un aumento del flujo másico total tiene poco efecto sobre la velocidad y temperatura adentro de la pistola, pero resulta en un aumento de la presión. Afuera de la pistola, el flujo se mantiene a una velocidad y una temperatura más alta sobre una distancia mayor.

Un aumento del flujo de oxy-fuel resulta en un aumento de la velocidad y temperatura del flujo. Estos cambios son muy significativos afuera de la pistola.

El cambio del flujo de aire tiene poco efecto adentro de la pistola. Afuera, el aumento del flujo de aire resulta en un aumento de la velocidad máxima alcanzada, así como un aumento de la temperatura máxima alcanzada.

El cambio del flujo de Nitrógeno no tiene efecto que sea adentro o afuera de la pistola. Pero se recomienda tener un flujo de Nitrógeno mínimo para tener una alimentación "suave" de las partículas.

Un aumento en la longitud del barril da como resultado una velocidad y una temperatura mas altas, esto sobre una distancia mayor, lo que ayuda a acelerar las partículas.

El cambio de la distancia al sustrato da como resultado una disminución muy rápida de la velocidad y de la temperatura afuera de la pistola.

Las perspectivas que abre este trabajo son las siguientes:

- Estudiar el comportamiento de las partículas en la pistola, y el efecto que podrían tener un cambio de tamaño o forma de estas partículas.
- Estudiar lo que sucede cuando las partículas se impactan sobre el sustrato, es decir como se deforman, y como solidifican.
- Estudiar el efecto que tendrían unos cambios en la geometría, como un cambio de volumen de la cámara de combustión, o un aumento del diámetro del barril de la pistola.

Referencias

- [1]. D Cheng, G Trápaga, J W McKelliget and E J Lavernia. "Mathematical modeling of high velocity oxygen fuel thermal spraying of nanocrystalline materials: an overview" Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, Volume 11, R1-R31.
- [2]. "Computational Fluid Dynamics of Thermal Spray Processes – Investigation of Combustion Mechanisms and Chemical Kinetics" Thesis Of Ayhan Ayar, Thayer School of Engineering Dartmouth College, Hanover, New Hampshire, USA.
- [3]. ASM Handbook, volume 5, Surface Engineering, p497-502, 1994.
- [4]. "The Theory and Application of the HVOF (High Velocity Oxy-fuel) Thermal Spray Process" Joseph Stokes.
- [5]. http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_spray
- [6]. http://www.techniques-ingenieur.fr/dossier/rev_ecirc_tements_par_projection_thermique/M1645
- [7]. http://www.thermalspray.org/site_whatIs.asp
- [8]. <http://www.techniques-ingenieur.fr/book/m1645/1/revetements-par-projection-thermique.html>
- [9]. "A mathematical model of the High Velocity Oxygen Fuel thermal spraying gun"-Thesis of Raúl Gerardo Quintero de la Garza, Massachussets Institute of Technology, 1993.
- [10]. L.Fedrizzi, S.Rossi, R.Cristel, P.L.Bonora "Corrosion and wear behavior of HVOF cermet coatings used to replace hard chromium" Electrochimica Acta, Volume 43, 2004, Pages 2803-2814.
- [11]. M Li, P D Christofides "Modeling and analysis of HVOF thermal spray process accounting for powder size distribution", Chemical Engineering Science, Volume 58, 2003, Pages 849-857.
- [12]. F. M. White "Fluid Mechanics" 3rd edition, p.539-540
- [13]. http://en.wikipedia.org/wiki/De_Laval_nozzle
- [14]. <http://www.aerospaceweb.org/question/propulsion/q0224.shtml>
- [15] A H Shapiro "The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow".
- [16] Apuntes de Mecánica de Fluidos, curso 2008-2009, Escuela politécnica Superior de Ingeniería de Gijón.

- [17]. <http://www.answers.com/topic/choked-flow>
- [18]. http://en.wikipedia.org/wiki/Shock_wave
- [19]. http://en.wikipedia.org/wiki/Oblique_shock
- [20]. http://en.wikipedia.org/wiki/Prandtl%E2%80%93Meyer_expansion_fan
- [21]. M Li, P D Christofides "Modeling and analysis of HVOF thermal spray process accounting for powder size distribution" Chemical Engineering Science, Volume 58, Issues 3-6, February 2003, Pages 849-857.
- [22]. M Li, P D Christofides "Multi-scale modeling and analysis of an industrial HVOF thermal spray process" Chemical Engineering Science, Volume 60, Issue 13, July 2005, Pages 3649-3669
- [23]. V V Sobolev, J M Guilemany, A J Martin, J A Calero, P Vilarrubias "Modelling of the in-flight behavior of stainless steel powder particles in high velocity oxy-fuel spraying" Journal of Materials Processing Technology, Volume 79, Issues 1-3, July 1998, Pages 213-216.
- [24]. M Li, D Shi, p Christofides "Modeling and control of HVOF thermal spray processing of WC-Co coatings" Powder Technology, Volume 156, Issues 2-3, 23 August 2005, Pages 177-194
- [25]. S Kamnis, S Gu "Numerical modeling of propane combustion in a high velocity oxygen-fuel thermal spray gun" Chemical Engineering and Processing, Volume 45, Issue 4, April 2006, Pages 246-253.
- [26]. D.Cheng, Q.Xu, G.Trapaga, E.J.Lavernia "A numerical Study of High-Velocity Oxygen Fuel Thermal Spraying Process. Part I: Gas Phase Dynamics"

EL JURADO DESIGNADO POR LA UNIDAD QUERÉTARO DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, APROBÓ LA TESIS DE MAESTRÍA DE LA C. CINDY CLAUSS TITULADA: “DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DEL PROCESO “HIGH VELOCITY OXY-FUEL” (HVOF)” FIRMAN AL CALCE DE COMÚN ACUERDO LOS INTEGRANTES DE DICHO JURADO, EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO, QRO., A LOS VEINTISIETE DIAS DEL MES DE AGOSTO DEL AÑO DOS MIL DIEZ



DR. LUIS GERARDO TRAPAGA MARTINEZ



DR. FRANCISCO JAVIER ESPINOZA BELTRAN



DR. JUAN MUÑOZ SALDAÑA



DR. JOSE MARTIN YANEZ LIMON



CINVESTAV
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000009757