



Universidad Austral de Chile

Escuela de Ingeniería Mecánica

CORTE MEDIANTE CHORRO DE AGUA-ABRASIVO

Trabajo para optar al Título de:
Ingeniero Mecánico

Profesor Patrocinante:
Sr. Misael Fuentes P.
Ingeniero Mecánico

Alex Fabián Vyhmeister Franco
Valdivia – Chile
2003

El Profesor Patrocinante y Profesores Informantes del Trabajo de Titulación comunican al Director de la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería que el Trabajo de Titulación del señor:

Alex Vyhmeister Franco

ha sido aprobado en el examen de defensa rendido el día _____, como requisito para optar al Título de Ingeniero Mecánico. Y, para que así conste para todos los efectos firman:

Profesor Patrocinante:

Ing. Sr. Misael Fuentes P.



Profesores Informantes:

Ing. Sr. Nelson García M.

Dr. Sr. Héctor Noriega H.



VºBº Director de Escuela:

Sr. Enrique Salinas A.



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a las personas que gentilmente colaboraron en despejar dudas que se presentaron durante el desarrollo de este trabajo, así también por el envío de valiosa información: al Profesor Dr. Greg Galecki Departamento Rock Mechanics Universidad de Missouri-Rolla; USA, Srta. Estela Melian estudiante Universidad de Missouri-Rolla; USA, Sr. Vitus Pebalka Ingersoll-Rand; Alemania, Sr. Tony Ryd-Waterjet Sweden-AB; Suecia, Sr. José Muñoz Ingersoll-Rand; USA, Sr. Hector Pilot-Flow Latino América, Sr. Rodrigo Carrasco-Sernageomin; Chile, Sr. Peter Lüscher-Comercial ISESA S.A, Chile, Sr. Pedro Iturriaga-Proingas S.A; Chile y al Sr. Carlos Cartes-Astilleros Asenav Valdivia; Chile.

CONTENIDOS

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
OBJETIVOS.....	3
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Historia.....	4
1.2 Teoría.....	6
1.3 Tipos de cortadores.....	7
1.3.1 Chorro de agua.....	7
1.3.2 Chorro de agua-abrasivo	8
1.3.3 Sistema tipo.....	9
1.4 Ventajas del corte “Chorro de Agua-Abrasivo”	10
1.5 Desventajas del corte “Chorro de Agua-Abrasivo”	12
1.6 Limitaciones de los inyectores de agua pura.....	13
1.7 Limitaciones de los inyectores de agua-abrasivo	14
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CORTE.....	15
2.1 Problemas con métodos tradicionales.....	15
2.2 Aceros Inoxidables.....	15
2.2.1 Características principales de los aceros Inoxidables típicos.	17
2.3 Fuerza y presión a generar para realizar el corte	20
2.3.1 Energía necesaria para el corte	20
2.3.2 Presión de agua necesaria.....	22
2.3.3 Introducción de un abrasivo	25

2.4	Balance energético para producir el corte	27
2.5	Determinación de la presión ideal.....	33
2.6	Valores característicos de la mezcla agua-abrasivo	38
2.7	Sistemas generadores de presión.....	43
2.7.1	Bomba de émbolo v/s intensificador de presión.....	50
2.8	Abrasivo adecuado.....	53
2.9	Sistemas de alimentación de abrasivo	58
2.9.1	Sistema de alimentación convencional.....	58
2.9.2	Sistema tipo “Bypass”	61
2.9.3	Sistema de bombeo directo	63
2.10	Inyectores de agua-abrasivo	66
2.11	Micro-erosión del material.....	73
2.12	Generación de calor.....	75
2.13	La velocidad de avance en el corte	77
2.13.1	Parámetros críticos.....	77
2.14	El diseño del tubo colector.....	81
2.15	Estanque contenedor de residuos.....	84
2.16	Sistema controlador de movimiento del inyector.....	85
2.17	Reciclaje de abrasivo	87
2.18	Equipos Actuales.....	93
2.18.1	Proyecciones futuras.....	97
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE COSTOS.....		99
3.1	Introducción.....	99
3.2	Costo de los equipos.....	100
3.3	Costos de operación.....	101
3.3.1	Comparación con el “Plasma”	102
3.4	Posibilidades de adaptar un equipo	108
CONCLUSIONES FINALES.....		112

BIBLIOGRAFÍA.....	114
PUBLICACIONES Y REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.....	114
ANEXOS.....	116
1 Tabla de Equivalencias nº de Malla de Abrasivos.....	117
2 Máquina Corte “Chorro de Agua-Abrasivo”	118
3 Máquina “Corte por Plasma”	121
4 Máquina hidrolavado.....	122

RESUMEN

Los métodos de corte denominados térmicos, como lo son el Oxicorte y el Plasma, son los que comúnmente se utilizan en el corte de planchas de acero. Sin embargo, estos métodos presentan una serie de inconvenientes como: la existencia de una zona afectada térmicamente, formación de escoria, formación de humos peligrosos, radiaciones UV, entre otras. Siendo en materiales sensibles y de poco espesor donde se manifiestan con mayor intensidad, como es el caso del acero inoxidable de espesores $e < 3\text{mm}$.

Un sistema que no presenta muchos de estos problemas es el corte mediante “Chorro de Agua-Abrasivo”. Este método, muy poco conocido en Chile, consiste en hacer pasar una cierta cantidad de agua altamente presurizada por un orificio muy pequeño para elevar su velocidad y lograr también que el abrasivo logre integrarse al chorro, luego de esto el chorro es conducido por un tubo hasta el material. El impacto a altísima velocidad del agua y del abrasivo produce una micro-erosión en el material y de esta forma logra ser cortado. Para lograr generar esta presión existen actualmente dos tipos de bombas; una es el intensificador de presión que funciona por el impulso alterativo de un fluido hidráulico y otra de émbolos impulsados por un motor eléctrico. Sin embargo, no tan solo la presión es el único parámetro que determina el corte, sino también la cantidad de abrasivo y agua, y diámetros de piezas internas del inyector. Afectando también la velocidad de avance de corte, la que debe ser controlada para lograr un corte de buena calidad.

Este método de corte si bien puede tener un costo inicial alto, a largo plazo puede resultar más conveniente, que por ejemplo el Plasma. A pesar de que sobre algunos materiales no pueden alcanzarse altas velocidades de corte como en el Plasma, éste puede cortar mayores espesores y más materiales, por lo que se presenta como una alternativa bastante conveniente.

ABSTRACT

The denominated thermal methods of cutting, like are it the Oxy-fuel cutting and Plasma, is those that commonly are used in the steel plate cut. Nevertheless, these methods present a series of disadvantages like: the existence of an affected zone thermally, dreg formation, formation of dangerous smoke, radiations UV, among others. Being in sensible materials and of little thickness where they pronounce with greater intensity, as it is the case of the stainless steel of thicknesses $e < 3\text{mm}$.

A system that does not display many of these problems is the "Abrasive Water jet cutting". This method, unknown in Chile, consists of making pass a certain amount of water highly pressurized by a very small orifice to elevate its speed and to also obtain that the abrasive manages to integrate itself in water jet, after this the jet is lead by a tube until the material. The impact at highest speed of the water and the abrasive produces a micro-erosion in the material and of this form it manages to be cut. In order to manage to generate this pressure two types of pumps exist at the moment; one is the intensifier of pressure that works by one piston impulse of a hydraulic fluid and another crankshaft pump impelled by an electrical motor. Nevertheless not so single the pressure is the only parameter that determines the cut, but also the amount of abrasive and water, and diameters of internal pieces of the injector. The speed of cut advance must be controlled to obtain a good finish cut quality.

This method of cut although can have high an initial cost, in the long run it can be more advisable, than for example Plasma. Although on some materials high speeds of cut as in the plasma cannot be reached, this cut can greater more material thicknesses, reason why it appears like a quite advisable alternative.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Investigar, estudiar, analizar y presentar el sistema de corte mediante “Chorro de Agua-Abrasivo”, reuniendo un antecedente para futuros trabajos o proyectos sobre el tema, despejando dudas y mitos al respecto.

Objetivos específicos:

- Identificar ventajas y desventajas de este método respecto a los métodos tradicionales.
- Definir y establecer parámetros que caracterizan el corte mediante “Chorro de Agua-Abrasivo”, de una plancha de acero inoxidable de reducido espesor ($e < 3\text{mm}$).
- Analizar las posibilidades o alternativas existentes de: abrasivos, bombas generadoras de presión, inyectoras, mesas de corte, sistemas de alimentación de abrasivo, etc.
- Establecer costos de adquisición y utilización de un equipo de estas características en la región.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El denominado *Abrasive Waterjet Cutting* que en español significa corte mediante “Chorro de Agua y abrasivo”, es un método de corte que se emplea actualmente y principalmente en industrias de países desarrollados, tanto europeos como norteamericanos. Este método ha presentado un desarrollo importante sólo en las últimas décadas del siglo XX, sin embargo sus orígenes se remontan mucho más atrás.

1.1.- Historia:

Los orígenes de este corte, se atribuyen al gran auge que tuvo la minería del carbón en la Unión Soviética y en Nueva Zelanda. El agua era recogida de caídas o torrentes de agua y dirigida para lavar el excedente de la cara explotada de la roca que llevaba el carbón y restos de roca. Este método de explotación minera fue imitado en minas de oro sudafricanas para quitar la roca no deseada del área de trabajo hacia una deriva o un túnel colector.

En California, “la ciudad del oro” entre 1853 y 1886, el agua que era previamente presurizada, fue utilizada para excavar las superficies de roca que contenían el oro. El agua presurizada permitió que el minero estuviera parado a una distancia considerable de la cara que era lavada. Esto era más seguro porque había menos peligro de ser cubierto por una pared que se derrumbara de la roca explotada.

Hacia el 1900, este método de explotación minera tenía en Prusia y Rusia, empresas empleando el mismo método antes descrito. En estos dos países el agua presurizada fue utilizada para lavar el carbón explotado desde una distancia menos peligrosa.

En el año 1930, en Rusia se hizo la primera tentativa de realmente cortar la roca con el agua presurizada. Un equipo de agua logró generar una presión de 70MPa.

En los años 70s esta tecnología, que fue desarrollada en Estados Unidos, logró ser capaz de crear una presión cercana a los 275Mpa. La mayor parte del crecimiento que experimentó, se debió a la combinación del chorro de agua presurizado, con el taladro en faenas explotación minera.

Sin embargo, en 1968 el Dr. Norman Franz, Profesor de la Universidad de Columbia Británica (Canadá), patentó la primera "Máquina para Corte por Chorro de Agua". La presión de agua que alcanzaba este primer equipo era de 70Mpa. La subsidiaria de INGERSOLL-RAND perteneciente a la Mc. Cartney Manufacturing Company (USA), desarrolló sobre esta patente el primer intensificador que alcanzaba ya los 400Mpa. En 1971 se instaló este intensificador en la empresa Alton Box Board Co., en la división de papeles. A pesar de esto, y debido a la falta de poder de corte, los metales no podían aún ser incluidos entre los materiales susceptibles de ser cortados con agua.

Para ese entonces se formaba, también en Estados Unidos, la compañía FLOW (Flow International Corporation). Su misión era desarrollar nuevos negocios basados en tecnologías avanzadas. Se interesaron en la tecnología ya existente del "Corte por Chorro de Agua", desarrollando también un prototipo de intensificador de presión, por parte del ingeniero Sr. John Olsen. Por lo que hasta hoy se discute su verdadero creador.

Luego comenzó la experimentación con la introducción de un abrasivo en el sistema de corte, logrando en un comienzo utilizarlo para limpiar superficies metálicas y para posteriormente crear el primer cortador utilizando agua y abrasivo.

Después de esto y de que fuera demostrado que estos sistemas podían cortar el metal y la cerámica, la industria del Corte "Chorro de Agua-Abrasivo", comenzó a investigarse y desarrollarse.

Estas investigaciones condujeron a la presentación del primer cortador en el año 1980, y en 1983 el primer sistema comercial llegó a estar disponible por parte de la compañía FLOW.

Los abrasivos aumentaron la gama de materiales que lograron ser cortados. Velocidades más altas, materiales más gruesos y una mejor calidad de corte, fueron paulatinamente logrados. [15]

Hoy en día existen mega-compañías a nivel mundial de fabricación y comercialización de esta tecnología, como también centros de investigación y de experimentación por parte de prestigiosas Universidades. Compañías como por ejemplo: IGEROLL-RAND, OMAX, WOMA, FLOW, RICHEL INC., entre otras, que poseen representaciones en todo el mundo.

1.2.- Teoría:

La mayoría de las teorías del corte por este método, explican el Corte por Chorro de Agua como una forma de micro-erosión.

Éste trabaja forzando un caudal de agua previamente presurizado, por un pequeño orificio ubicado en el inyector, formando un potente pero delgado chorro, que viaja a una altísima velocidad. Esta corriente acelerada que sale del inyector impacta con gran potencia el material a cortar. La presión extrema de partículas de agua aceleradas, entran en contacto con una pequeña área del material de trabajo, formando pequeñas grietas producto del impacto y expulsando lejos el material que "erosiona" de la superficie de trabajo.

Las grietas causadas por el primer impacto del chorro, se exponen a la persistencia de éste. La presión y el impacto extremo, causa que estas grietas pequeñas, aumenten en tamaño y se propaguen a través del material hasta que finalmente se corta.

En el caso de la combinación agua-abrasivo, éste opera bajo el mismo principio. Sólo difiere en la inyección en el chorro de agua presurizado de un abrasivo, producto del llamado efecto "Venturi" causado por la brusca reducción del diámetro del chorro, con el fin de maximizar las fuerzas erosivas. [17]

1.3.- Tipos de cortadores:

1.3.1.- Chorro de agua:

Es el sistema que utiliza solamente una corriente o chorro de agua presurizado, de entre 137Mpa a 379Mpa normalmente, el cual es conducido a través de una tobera (Fig.1) con pequeño orificio recubierto de un material altamente resistente como es el caso del zafiro, rubí o diamante, y por esta razón conocido también como “joya”, para luego impactar el material a altísima velocidad.

Este tipo de corte se limita a materiales con grietas pequeñas formadas naturalmente o que ocurren en materiales blandos como: alimentos, cuero, plásticos, madera, etc. [19]

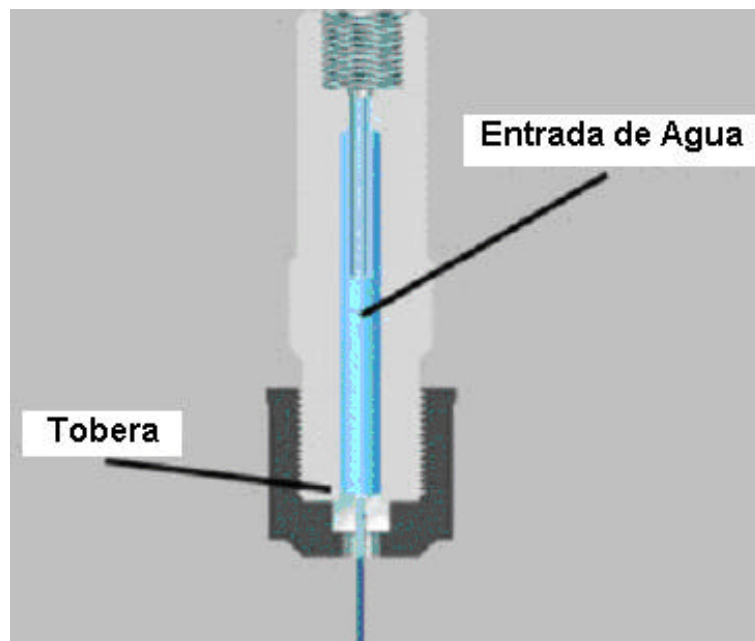


Fig.1 Inyector máquina corte sólo con agua

1.3.2.- Chorro de agua-abrasivo:

Este sistema, se puede describir resumidamente, como un proceso acelerado de erosión bajo control. En el que el agua que es presurizada hasta 413Mpa, y más en algunos casos, es forzada a través de un orificio pequeño en la tobera, normalmente entre 0,17mm a 0.4mm de diámetro, alcanzando velocidades de aproximadamente 3.218Km/h. Después de lo cual el abrasivo se agrega a la corriente. Esta mezcla agua-abrasivo, ingresa al tubo colector o de salida (Fig. 2) y viaja a altísima velocidad permitiendo el corte de materiales duros como: aceros, mármol, titanio, aleaciones metálicas y compuestas, etc. [17]

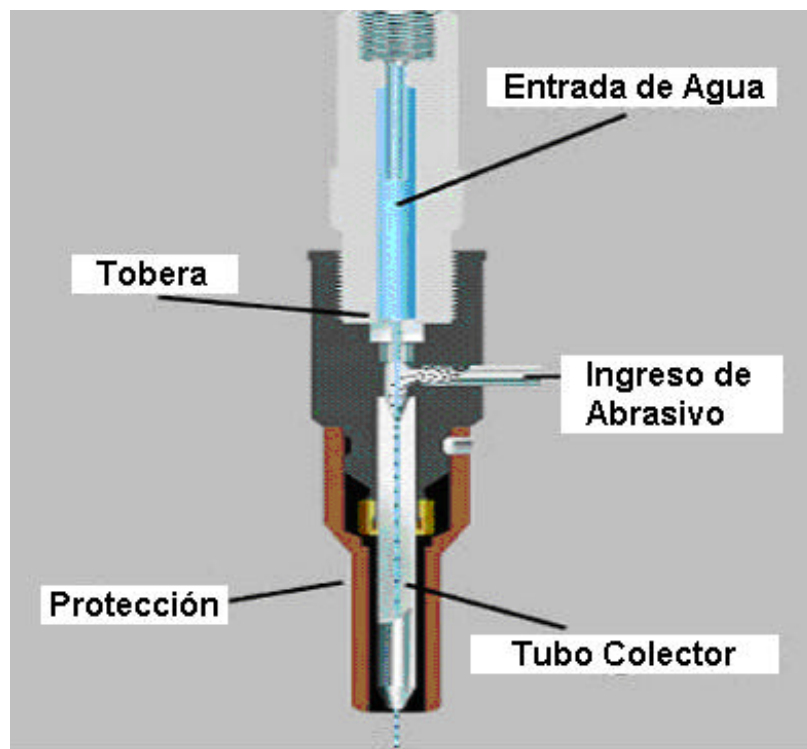


Fig.2 Inyector máquina de corte agua-abrasivo

1.3.3.- Sistema tipo:

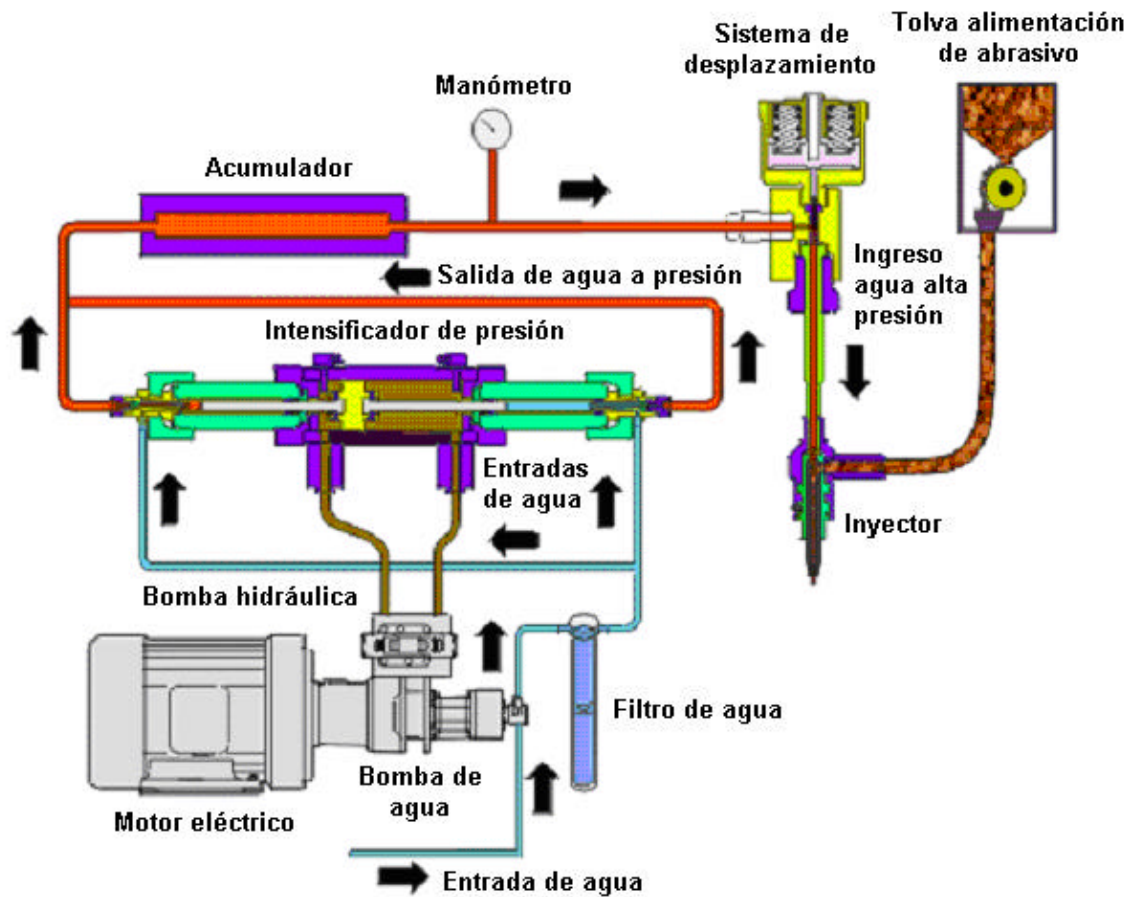


Fig.3 Sistema actual de corte mediante “Chorro de Agua-Abrasivo” [13]

La figura 3 muestra, a grandes rasgos, el funcionamiento de un sistema actualmente empleado por una gran cantidad de máquinas cortadoras. En principio, el agua es conducida por una bomba pequeña hasta un filtro de agua para retener impurezas. Este procedimiento de filtrado es muy importante, ya que el agua debe estar limpia antes de presurizarla hasta niveles de ultra presión (413Mpa y más), esto con el fin de proteger las piezas del intensificador de presión o bomba de ultra alta presión y proporcionar una corriente constante para el corte. Muchas veces incluso, es necesario instalar un tratamiento de agua previo, para eliminar minerales que pueden resultar peligrosos.

Después de ser filtrada, el agua entra en el cilindro del intensificador de presión, el cual es accionado hidráulicamente y en donde se presuriza hasta el nivel deseado. Luego el agua ingresa a un acumulador para reducir las variaciones de presión y finalmente es conducida hasta el inyector o cabezal, ya sea el inyector de corte con abrasivo o el de corte sólo con agua, dependiendo del uso. Básicamente ambos sistemas operan de igual forma, diferenciándose sólo por la tolva de abrasivo y por el tipo de inyector.

Más adelante se explicará detalladamente las partes principales de los sistemas que conforman estos equipos, así como también su funcionamiento y distintos diseños que se pueden encontrar.

1.4.- Ventajas del corte “Chorro de Agua-Abrasivo”:

Este corte ofrece un excedente de muchas ventajas sobre métodos convencionales, entre ellas están:

- Corte frío; no existe calor que afecte las zonas de corte, ni existe peligro de endurecimiento (micro-temple).
- Corte multi-direccional; capacidad de cortar en cualquier dirección.
- Perfora la mayoría de los materiales, sin la necesidad de perforarlos previamente para el corte.
- El fisuramiento o agrietamiento es prácticamente nulo o mínimo.
- Ambientalmente amistoso.
- Reduce el polvo y los gases peligrosos.
- No carga el material de trabajo; material libre de tensiones.
- Ahorro de materias primas; ancho de corte pequeño y nula formación de escoria.
- Más rápido que muchas herramientas de corte convencionales.

Una de las ventajas más importante es la calidad de corte frío de los cortadores agua-abrasivo. Esto permite que los materiales que son cortados no sean quemados, derretidos, o agrietados, como ocurre con otros métodos de corte.

Algunos procesos térmicos principalmente: Oxicorte, corte Plasma y Láser, causan endurecimiento superficial, deformación y la emisión de peligrosos gases. En contraste, el corte de materiales con este sistema no experimenta ninguna tensión térmica, eliminando tales resultados indeseables.

Otra ventaja importante es la capacidad de cortar materiales fibro-reforzados, materiales reflexibles, superficies desiguales y capas apiladas de diversos materiales. Puesto que los procesos mecánicos ocurren en un nivel microscópico, el interior y el contorno de la zona de corte no presentan alteraciones.

A pesar de la alta energía cinética en el corte, no se presentan deformaciones y se logra una buena precisión de corte sin que se presenten rebabas ni estrías en el borde cortado, por lo que la calidad final de corte es muy buena, eliminando prácticamente la necesidad de procesos secundarios de terminación.

También es particularmente "amistoso" desde el punto de vista del medio ambiente. Normalmente, el proceso es limpio y no genera material particulado en suspensión, o gases peligrosos. Los aceites o las emulsiones de corte no son necesarios, por lo que no interviene ningún otro elemento, aparte del agua y el material abrasivo.

Otra ventaja apreciable es el hecho que puede llegar a cortar materiales de grandes espesores; sobre 120mm en aceros hasta 200mm en algunos materiales. A diferencia, por ejemplo, del plasma, que puede cortar sólo hasta ciertos espesores (un poco más de 50mm en aceros).

Usando el agua pura, es posible cortar textiles, elastómeros, plásticos finos, productos alimenticios y muchos otros productos. Estos materiales se pueden cortar a velocidades altas y precisas, sin contaminar ni destruir parte de éste. Y con la adición de un material abrasivo al agua, se pueden llegar a

cortar materiales de gran dureza como: titanio, todo tipo de aceros, aleaciones, concreto, etc.

En el mundo de hoy con materia prima costosa y de recursos limitados, el corte de ancho reducido y preciso de estos cortadores, además de la variedad de formas que pueden lograr, optimizan el uso del material, aumentando la rentabilidad. [13]

Tabla 1 Comparación con otros sistemas de corte

“El corte Chorro de Agua-Abrasivo”, supera a:

Método	Porque permite
Bandsaws (sierras):	Mayor velocidad y exactitud, menor mano de obra, corte de materiales más resistentes, diseños detallados, cortes de interiores.
Láser:	Materiales de mayor espesor, más variedad de materiales, ausencia de calor.
Alambre EDM:	Mayor velocidad, menos costoso, más variedad de materiales, no necesita agujeros previos.
Corte de Plasma:	Ausencia de calor, ninguna limpieza en general posterior, materiales de mayor espesor, ausencia de gases y humos peligrosos, ausencia de radiaciones UV.
Oxicorte:	Ausencia de calor, ninguna limpieza en general posterior.

1.5.- Desventajas del corte “Chorro de Agua-Abrasivo”:

Una de las desventajas principales de este sistema, es el número limitado de materiales que se puede cortar económicamente. Es posible cortar aceros de gran dureza y de grandes espesores, pero sin embargo, el tiempo de corte de una pieza de estas características puede ser muy largo. Debido a esto, el costo puede resultar muy elevado y compensar en gran medida las ventajas.

Otra de las desventajas es que las piezas muy gruesas no pueden ser cortadas logrando una precisión adecuada. Si la pieza es demasiado gruesa, el chorro puede disiparse en cierta medida, transformándose el corte en una diagonal, o tener un corte más ancho en el fondo de la pieza que en la superficie, fenómeno llamado “ahusamiento” (Fig. 4). Este se produce cuando el chorro que sale hacia la pieza tiende a aumentar su diámetro, y puede causar inexactitud dimensional y problemas de acabado en la zona del corte. Disminuir la velocidad logra reducirlo en gran medida, aunque todavía puede seguir generando problemas.

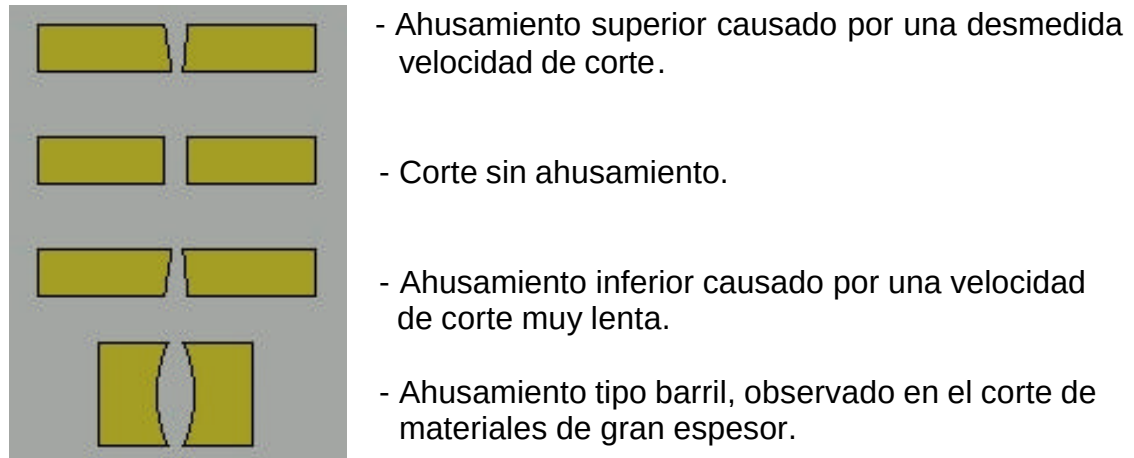


Fig.4 Tipos de “ahusamiento” [19]

1.6.- Limitaciones de los inyectores de agua pura:

Los únicos problemas que se pueden presentar en un inyector de agua pura, son en la tobera. Esta pieza puede agrietarse, taparse, o formar depósitos. Esto sucede como resultado del ingreso de agua impura en el sistema, sin embargo esto se evita fácilmente con una apropiada filtración.

Los depósitos se acumulan gradualmente como resultado de los minerales que contiene el agua. Para evitarlos se debe instalar un tratamiento de agua previo, para disminuir su dureza. Sin embargo, las toberas pueden substituirse fácilmente en cerca de 2 a 10 min., y no tienen un precio elevado (toberas con recubrimiento de zafiro o rubí). Existen también toberas de diamante, pero su costo se eleva significativamente. Además, estas toberas no son necesariamente tan buenas como el zafiro, debido a dificultades que se presentan en su fabricación, ya que la geometría de la “joya” es crítica en su funcionamiento y esta geometría es difícil de lograr sobre el diamante. [19]

1.7.- Limitaciones de los inyectores de agua-abrasivo:

A pesar de su diseño simple, los inyectores de agua-abrasivos pueden ocasionar problemas complicados ocasionalmente. Hay que considerar, primero que nada, los problemas antes mencionados para inyectores de agua pura, ya que en la primera parte del recorrido del chorro ambos son idénticos.

Se han hecho muchos diseños de este tipo de inyectores, pero todos comparten los mismos problemas en general. Algunos de ellos son:

- La corta vida útil de una pieza debido al desgaste; el tubo colector, que es por donde sale la mezcla agua-abrasivo (Fig.2), hacia la pieza de trabajo, se desgasta debido a la alta presión, a la presencia del abrasivo que es capaz de cortar inclusive asimismo, y a factores de alineamiento entre la tobera y el tubo colector. Por lo que se debe reemplazar periódicamente.
- La obstrucción del tubo colector; causado generalmente por la suciedad o por partículas de abrasivo de mayor tamaño que el adecuado. [19]

CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DEL MÉTODO DE CORTE

2.1.- Problemas con métodos convencionales:

El proceso convencional de corte de placas o planchas de acero inoxidable utilizado mayormente en Chile, es el “Corte por Plasma”, el que presenta una serie de inconvenientes:

Se produce una zona afectada térmicamente (ZAT) en torno a la línea de corte, entre 3-6mm en casos de muy buen trabajo, lo que provoca distorsiones térmicas, endurecimientos, agrietamientos, deformaciones y manchas. Además de una gran formación de escoria, la que junto con los demás inconvenientes, deben ser retirados necesariamente con un mecanizado posterior. Aumentando el tiempo de corte y elevando los costos de éste.

A lo anterior debe sumársele la generación de gases tóxicos, humos y radiación UV de alta intensidad. Gases peligrosos como: óxido de nitrógeno, ozono, monóxido de carbono, óxido de hierro y óxido de cromo, los cuales obligan al operario a utilizar las protecciones correspondientes. [1]

A continuación, se estudiará el método de corte “Chorro de Agua-Abrasivo” apuntado a evitar los problemas mencionados anteriormente. Para lo cual, se establecerá el supuesto caso de querer cortar una placa o plancha de acero inoxidable austenítico de espesor $e = 3mm$, con el propósito de lograr profundizar en el tema y de dirigir el desarrollo del presente trabajo.

2.2.- Aceros inoxidables:

Existe una gran variedad de aceros inoxidables, pero todos tienen como característica común el tener no menos de un 11,5% de Cromo, (Cr).

Los aceros inoxidables se usan por su resistencia a la corrosión, su resistencia a la oxidación y su aspecto agradable.

Hay 5 grupos de aceros inoxidable:

- **Ferríticos** : 12 a 30 % Cr y bajo C.
- **Martensíticos**: 12 a 17 % Cr, 0,1 a 1 % C.
- **Austeníticos** : 16 a 25 % Cr y 7 a 20 % Ni.
- **Aleaciones Duplex** : 23 a 30 % Cr, 2,5 a 7 % Ni, adiciones de Ti y Mo.
- **Aleaciones endurecibles por precipitación**, pueden tener base austenita o martensita, con adiciones de Cu, Ti, Al, Mo, Nb ó N.

Los aceros *inoxidables austeníticos* son esencialmente aleaciones ternarias de Hierro, Cromo y Níquel, que contienen de un 16 hasta un 25% de Cromo y de un 7 a un 20% de Níquel, estas aleaciones son llamadas austeníticas debido a que su estructura permanece en fase austenita a temperatura ambiente. La austenita es una forma de cristalización del hierro con elevada densidad atómica y por ello se endurece considerablemente cuando se somete a deformación en frío. La mayor parte de estos aceros contienen de un 0,06 a 0,1 % de Carbono. Cabe señalar que algo del Níquel de esta aleación puede ser reemplazado por Manganeso sin alterar la estructura austenítica del acero. Los tipos más comunes son el: AISI 304, 304L, 316, 316L, 310.

Tabla 2 Típicos Aceros Inoxidables Austeníticos y su composición Química. [24]

Tipo	% Cr	% Ni	% C	% Mn	% Mo
304	18-20	8-10	0.08	2.0	
310	24-26	19-22	0.25	2.0	
316	16-18	10-14	0.08	2.0	2.3
304L	18-20	8-10	0.03	2.0	
316L	16-18	10-14	0.03	2.0	2-3

Como se puede apreciar en la tabla 2, la diferencia entre un acero 304 y 304L o 316 y 316L radica en el porcentaje de carbono, para evitar que los de tipo de calidad L deban ser tratados térmicamente luego de la soldadura.

2.2.1.- Características principales de aceros inoxidables típicos:

- Acero AISI 304L. Soldable

Descripción: Color: Plomo

Acero Inoxidable Austenítico, con muy bajo contenido de carbono, soldable. La soldadura puede efectuarse por cualquiera de sus métodos (arco, gas inerte, resistencia, etc.) sin requerir tratamiento térmico posterior. Admite terminación espejo. Norma(s): AISI/SAE 304L – WST 430L

Tabla 3 Propiedades mecánicas acero AISI 304L

Dureza (HB)	130 -150 (Recocido) 180 - 330 (Laminado en frío)
Resistencia a la Tracción (Kg/mm ²)	51 - 69 (Recocido)
Alargamiento (% en 50mm)	65- 50 (Recocido)
Reducción de Área (%)	75-60
Estado de suministro	Tratamiento de solución.

Tabla 4 Tratamiento térmico acero AISI 304L:

Temperaturas (°C)	
Forja	Recocido
1150-750	1050-1000

Usos: En la industria alimenticia, textil, en construcciones de instalaciones químicas y sobretodo farmacéuticas que requieran chapas gruesas y susceptibles de pulir hasta alcanzar pulido espejo.

- Acero Refractario AISI 310 (atmósferas oxidantes)

Descripción: Color: Negro

Este acero inoxidable tiene toda su superficie recubierta de óxido de cromo que conserva el color que éste posee (blanco metálico). Además es un óxido muy compacto, protector, que defiende al acero de las agresiones extremas (corrosión). Pero a partir de los 400 °C este óxido de cromo comienza a oscurecerse y a perder sus propiedades protectoras. Si se quiere que un acero dure más trabajando a altas temperaturas (Acero Refractario) se debe reforzar la capa de óxido de cromo añadiendo más cromo a la aleación. En este acero inoxidable austenítico, el cromo se incrementa hasta un 24-26 % y el níquel hasta un 19-22 %. Norma(s): AISI/SAE310S – WST 4841

Tabla 5 Propiedades mecánicas acero AISI 310 [2]

Dureza (HB)	140-185
Resistencia a la Tracción (Kg/mm ²)	55-68
Alargamiento (% en 50mm)	60-40
Reducción de Área (%)	75-55

Tabla 6 Tratamiento térmico acero AISI 310

Temperaturas (°C)	
Forja	Recocido
1150-800	1050-1100

Usos: Piezas sometidas a altas temperaturas (1200°C) como: tubos de calderas, hornos y aplicaciones similares. Pisos de hornos, cajas, parrillas, ganchos, moldes de vidrio. Su duración depende de la atmósfera.

- Acero AISI 316L. Soldable.

Descripción: Color: Anaranjado

Acero inoxidable austenítico, soldable, aleado con Cromo, Níquel y Molibdeno. Este acero después de la soldadura y sin tratamiento térmico posterior, resisten la corrosión ínter granular y ofrecen una mayor estabilidad frente a severos ataques químicos (ácidos). También presentan excelentes cualidades de mecanizado en frío. Es susceptible de pulido espejo y su temperatura de trabajo no debería sobrepasar los 300°C. Es sustituto de la calidad AISI 316. Normas(s): AISI/SAE316L – WST 4404

Tabla 7 Propiedades mecánicas acero AISI 316L en estado de recocido

Dureza (HB)	130-180
Resistencia a la Tracción (kg/mm ²)	53-68
Alargamiento (% en 50mm)	60-40
Reducción de Área (%)	75-65
Estado de suministro	Tratamiento de solución.

Tabla 8 Tratamiento térmico acero AISI 316L

Temperaturas (°C)	
Forja	Recocido
1150-750	1050-1000

Usos: Se utiliza en la fabricación de aparatos de resistentes a los ácidos en la industria química, de la celulosa, goma, carburantes, tintes, ácidos sebáceos. En la industria textil y de la seda artificial. Piezas de uso clínico-ortopédico. [2]

A continuación se pretende obtener la fuerza y presión que se debiera generar para perforar un plancha de acero inoxidable austenítico de espesor igual a $3mm$, a partir de las características técnicas del material y empleando el cálculo del caso más parecido, que es el proceso de punzonado o perforar la plancha utilizando un punzón delgado. Para demostrar su susceptibilidad a ser cortado únicamente con agua o bien con la introducción de un elemento que eleve su densidad.

2.3.- Fuerza y presión a generar para realizar el corte:

La resistencia a la tracción en los aceros inoxidables típicos varía generalmente entre: $68 \frac{Kgf}{mm^2}$ a $69 \frac{Kgf}{mm^2}$, como se vio en la sección 2.2. Se considerará el caso más desfavorable para el análisis siguiente, por lo que se adoptará la resistencia última a la tracción de $69 \frac{Kgf}{mm^2}$, para efectos de cálculo. [2]

2.3.1.- Energía necesaria para el corte:

La energía necesaria para penetrar un material se puede expresar como:

$$\text{Energía de deformación} = F_{\text{corte}} \times e \quad (1)$$

En donde F_{corte} corresponde a la fuerza para perforar la plancha y e es el espesor de la misma. Para el caso del acero que es un material isótropo:

(admite deformaciones iguales en todas direcciones), el esfuerzo cortante varía entre [4]:

$$t_{corte} \cong 0,75 \times s_t \text{ a } 0,8 \times s_t$$

Para chapas de acero, en proceso de punzonado, caso más cercano al en cuestión. Siendo los valores más cercanos a 0,8 para aceros dúctiles con alto porcentaje de carbono [4]. Como se trata de acero inoxidable, se asumirá 0,75:

$$t_{corte} \cong 0,75 \times s_t \quad (2)$$

Donde: s_t es la Resistencia última a la tracción del material = $(69 \frac{Kgf}{mm^2})$.

Por lo que reemplazando en Ec.2 el esfuerzo cortante es:

$$t_{corte} = 0,75 \times 69 = 51,75 \frac{Kgf}{mm^2}$$

El esfuerzo cortante para una fuerza F es:

$$t_{corte} = \frac{F_{corte}}{A_s} \quad (3)$$

Donde F_{corte} es la fuerza necesaria para producir el corte y A_s es el área de la superficie de material a ser removida por el chorro. Vale decir la superficie cilíndrica de material que se debe perforar.

Por lo que es igual a:

$$A_s = p \times f \times e \quad (4)$$

Donde f = diámetro del chorro de agua, y e = espesor de la plancha.

Asumiendo un diámetro de salida del chorro hacia el material de $0,4mm$, por ejemplo, correspondiente al diámetro de una tobera, de posible utilización, y además suponiendo que este se mantiene constante hasta impactar el material, entonces:

$$f = 0,4mm$$

Por lo que en Ec.4, el área es: $A_s = 3,8mm^2$

Ahora reemplazando y despejando en Ec.3:

$$F_{corte} = t_{corte} \times A_s$$

$$F_{corte} = 196,65kgf = 1.928 N$$

Por lo que de la Ec.1 resulta:

$$\text{Energía de deformación} = F_{corte} \times e = 1.928 N \times 3mm = 5.785 N \times mm$$

2.3.2- Presión de agua necesaria:

La presión que debe ejercer el agua sobre la plancha se puede calcular como sigue; la fuerza del chorro es:

$$F_{chorro} = Q \times r \times V_{chorro} \quad (5)$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal del chorro} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$r = \text{La densidad del agua} \left(1.000 \frac{Kg}{m^3} \right)$$

$$V_{chorro} = \text{Velocidad del chorro} \left(\frac{m}{s} \right)$$

Como:

$$Q = A \times V_{chorro} \quad (6)$$

Y con:

$$A = p \times \left(\frac{f^2}{4} \right) \text{ (Área de la sección del chorro)} \quad (7)$$

La Ec.5 se puede expresar como:

$$F_{chorro} = A \times r \times V_{chorro}^2 \quad (8)$$

Dado que $F_{chorro} = F_{corte}$, además:

$$F_{corte} = 1.928 N ; A = 0,12 mm^2 \rightarrow 0,12 \times 10^{-6} m^2 \text{ y } r = 1.000 \frac{Kg}{m^3}$$

Reemplazando en la Ec.8 y despejando la velocidad del chorro es:

$$V_{chorro} = 4.008 \frac{m}{s} \text{ (Velocidad de cálculo).}$$

Ahora la velocidad real depende de la eficiencia del orificio de la tobera, esto es entre 0,8 y 0,98. [19]

$$V_{real(chorro)} = 0,8 - 0,98 \times V_{chorro} \quad (9)$$

Asumiendo una eficiencia media de 0,9:

$$V_{real(chorro)} = 0,9 \times 4.008 = 3.607 \frac{m}{s} \quad (\text{Velocidad "real"})$$

Flujo de agua a presión

↓
2

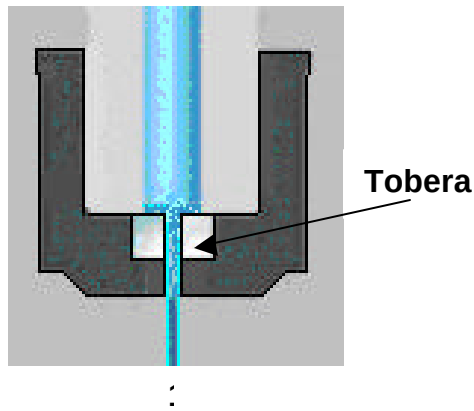


Fig.5 Salida del inyector de agua pura (0,4mm)

La figura 5 representa la salida del chorro del inyector, vale decir luego de su paso por el orificio de la tobera, de 0,4mm (Punto 1). Aplicando la ecuación de conservación de la energía [6] entre 1 y 2 resulta:

$$\frac{P_1}{g_{agua}} + H_1 + \frac{V_1^2}{2 \times g} = \frac{P_2}{g_{agua}} + H_2 + \frac{V_2^2}{2 \times g} \quad (10)$$

Como la presión en la tubería es mucho mayor que la exterior, la velocidad de chorro es mucho mayor en 1 y H_1 es igual H_2 , entonces:

$$P_2 \text{ (presión manométrica que se debe generar)} = g_{agua} \times \frac{V_1^2}{2 \times g} \quad (11)$$

Con $V_1 = 3.607 \frac{m}{s}$ y $g_{agua} = 9.806 \frac{N}{m^3}$, la Ec.11:

P2 (presión manométrica que se debe generar) = 6.505MPa

Como se puede ver la presión es extremadamente alta lo cual se puede interpretar, como que es prácticamente imposible cortar el material sólo con agua, ya que en la actualidad no existe la capacidad para generar una presión tan alta.

2.3.3.- Introducción de un abrasivo:

Ahora, si se agrega un cierto abrasivo o material resistente al chorro, con el fin de aumentar su dureza y densidad, como por ejemplo, agregar pequeñas partículas de acero común:

$$r_{acero} = 7.500 \frac{Kg}{m^3}$$

$$r_{agua} = 1.000 \frac{Kg}{m^3}$$

Suponiendo que se agregue un 25% de este abrasivo, al chorro; la densidad de la mezcla es:

$$r_{mezcla} = 0,25 \times 7.500 + 0,75 \times 1.000 = 2.625 \frac{Kg}{m^3}$$

Repitiendo lo mismo que para el caso de agua pura y sólo variando el diámetro del chorro, a 0,76mm, que corresponde a un tubo colector de posible utilización (agua-abrasivo). La presión necesaria se podría deducir de:

Entonces de la Ec.4: $A_s = 7,2mm^2 \rightarrow 7,2 \times 10^{-6} m^2$

Por lo que la fuerza para el corte Ec.3, es:

$$F_{corte} = 372,6Kgf = 3.653,7N$$

Si se reemplaza en (1):

$$\text{Energía de deformación} = F_{corte} \times e = 3.654N \times 3mm = 10.962N \times mm$$

De igual forma reemplazando en las Ec.7 y Ec.8, y despejando, la velocidad es:

$$V_{chorro} = 1.758 \frac{m}{s} \text{ (Velocidad de cálculo).}$$

Manteniendo la misma eficiencia de la boquilla recomendada y reemplazando en Ec.9:

$$V_{real(chorro)} = 0,9 \times 1.758 = 1.582 \frac{m}{s} \text{ (Velocidad "real")}$$

Aplicando la ecuación de la energía y utilizando nuevamente la Ec.11

$$\text{para, } g_{mezcla} = 25.740 \frac{N}{m^3} \text{ y } V_1 = 1.582 \frac{m}{s} :$$

$$\mathbf{P2 \text{ (presión manométrica que se debe generar) = 3.284Mpa}}$$

Si bien la presión necesaria para realizar el corte disminuyó significativamente, aún sigue siendo muy elevada e imposible de generar.

Esto indica que no sólo es necesario agregar algún material en cierta cantidad, para aumentar la densidad del chorro y de esta forma lograr una menor presión para lograr el corte necesario. Lo anterior sugiere que deben intervenir una serie de otros factores que no se han considerado hasta ahora. Por lo que a continuación se buscará establecerlos.

2.4.- Balance Energético para producir el corte:

Los investigadores de esta tecnología, han creado modelos matemáticos para interpretar los fenómenos que allí ocurren. Basándose, principalmente, en los principios básicos de la física y de la mecánica de fluidos. Algunos de estos modelos se detallan a continuación:

Uno de estos postulados se fundamenta en la “Ley de conservación del Trabajo y Energía”. En el cual, el chorro impacta el material con una cierta energía cinética E_A , para luego abandonar el material con una energía E_{Ex} , la cual no debe ser mayor que E_A , para que se logre el corte.

La diferencia de estas energías, es la energía disipada E_{Dis} , producto de las pérdidas producidas: impacto, la fricción, el corte, etc.:

$$E_{Dis} = E_A - E_{Ex} \quad (12)$$

La energía cinética de chorro agua-abrasivo es:

$$E_A = \frac{1}{2} \times m_A \times V_A^2 \quad (13)$$

En donde V_A es su velocidad y m_A su masa. La que se puede obtener de los flujos másicos totales de sus componentes principales: agua y abrasivo.

$$m_A = \left(\dot{m}_{abrasivo} + \dot{m}_{agua} \right) \times t \quad (14)$$

Siendo t el tiempo requerido por el chorro para atravesar un diámetro f del tubo de salida o tubo colector. Pudiéndose escribir también como $\frac{f}{V}$; por lo que E_A queda:

$$E_A = \frac{f}{2V} \times \left(\dot{m}_{abrasivo} + \dot{m}_{agua} \right) \times V_A^2 \quad (15)$$

Asumiendo el principio de conservación de la energía y con una colisión inelástica de las partículas abrasivas, la velocidad del chorro agua-abrasivo es:

$$V_A = h_t \times \frac{V_w}{1 + \frac{\dot{m}_{abrasivo}}{\dot{m}_{agua}}} \quad (16)$$

Con h_t igual al rendimiento o eficiencia de la mezcla (agua-abrasivo) en el inyector. La velocidad del agua V_w , depende directamente de la presión que entrega la bomba. Por lo que se puede obtener a partir de esta utilizando la ecuación de Bernoulli:

$$V_w = j \times \sqrt{\frac{2 \times g \times P}{g_{agua}}} \quad (17)$$

Donde j es la eficiencia del orificio de la tobera o joya (0.8 a 0.98), P es la presión de la bomba y g_{agua} el peso específico del agua. [14]

Los investigadores, han establecido también, para caracterizar la capacidad de corte de un determinado “chorro”, verificar la profundidad de este (h). Como por ejemplo, si el material no logra ser cortado, la profundidad de corte es simplemente $h = 0$. Si en caso contrario el material logra ser cortado, se establece un $h_{máx}$. Este $h_{máx}$ puede ser determinado experimentalmente, observando las estrías de la superficie de corte, si estas estrías terminan perpendicularmente al final del material (corte ideal), entonces se puede hablar que se ha alcanzado el $h_{máx}$. Por lo que la capacidad de corte se puede definir entonces, como un parámetro sin dimensiones que es igual al cuociente de la

profundidad real del corte y la profundidad máxima posible de este:

$$\Phi = \frac{h}{h_{m\acute{a}x}} \quad (18)$$

La energía disipada puede plantearse en función de la capacidad de corte:

$$E_{Dis}(\Phi) = X(\Phi) \times (E_A - E_{Ex}) \quad (19)$$

Esta ecuación plantea principalmente, que la energía disipada no depende solamente de la energía cinética inicial del chorro y de la energía con que sale del material, sino también de que cantidad de material logra ser cortado, vale decir de la capacidad o eficiencia del corte. En otras palabras si el material no logra ser cortado, $\Phi = 0$ por lo que $X(\Phi) = 0$, la Ec.19 estará indicando que no existe pérdida de energía producto de energía disipada en el corte ($E_{Dis}(\Phi) = 0$). $X(\Phi)$ es definido como un factor de eficiencia que indica la porción de la energía que se disponía y fue utilizada en el corte. Por lo que cuando el material logra ser cortado de forma ideal, o sea a su máxima profundidad, es decir $\Phi = 1$ y $X(\Phi) = 1$, se dice entonces, que toda la energía disipada o perdida por el chorro fue utilizada únicamente en el corte ($E_{Dis}(\Phi) = (E_A - E_{Ex})$). Ahora, si la profundidad del corte es menor que el ideal, pero mayor a cero, entonces parte de la energía disipada fue utilizada en el corte y alguna porción disipada debido a fricción, al impacto, a la temperatura, etc.

La capacidad de corte, depende principalmente de la presión generada por la bomba. Lo que se plantea es que existe una presión límite o presión crítica, que separa el éxito o fracaso del corte. [14]

A través de trabajos experimentales se han establecido presiones "críticas" o de referencia para los distintos tipos de materiales. El gráfico siguiente, por ejemplo, realizado a partir de trabajos experimentales realizados

por el investigador alemán Dr. Andreas W. Momber, muestra las presiones correspondientes a espesores de chapa de acero inoxidable, que están sobre el límite o “Presión Crítica” del corte efectivo y el no corte, para ciertas condiciones iniciales. Como son:

- Tipo de abrasivo = Granate (garnet); mesh (malla) # 80.
- Diámetro; tobera / tubo colector= 0,254mm / 0,762mm
- Caudal de abrasivo = 0,0034 Kg/s
- Separación de corte inyector-pieza = 7mm

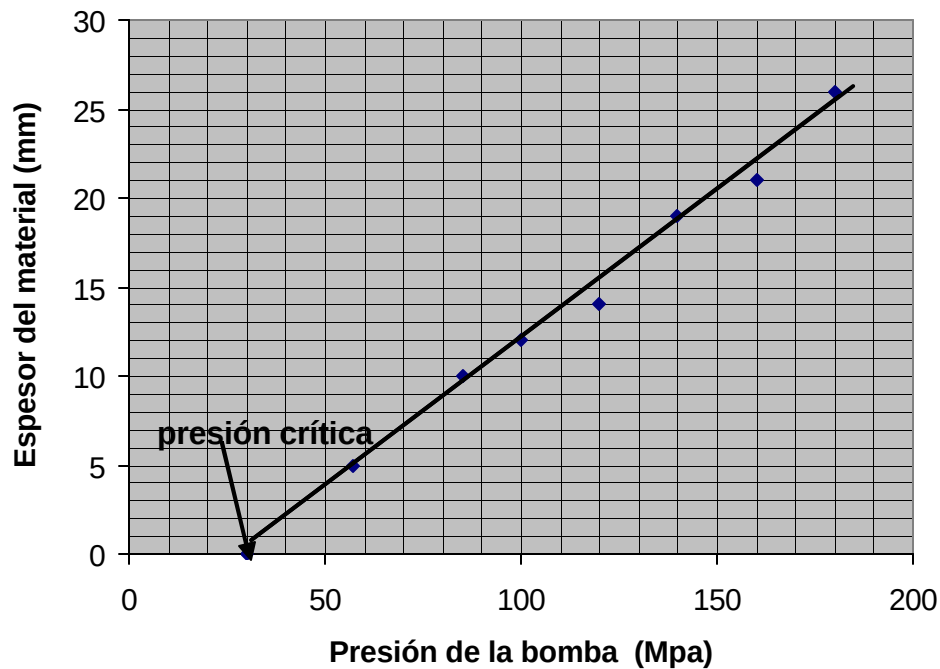


Gráfico 1 Efecto de la presión de la bomba sobre el corte de material (acero inoxidable) [13.1]

Como se puede ver en el gráfico, si la presión es menor que la presión “crítica” entonces no hay ningún efecto sobre la superficie del material. Esta presión se puede relacionar también con la cantidad de energía que se está disipando a una presión determinada (P), en relación con la presión “crítica” ($P_{crítica}$), por lo que se han establecido que:

- Si $P \leq P_{crítica}$; entonces $E_{Dis} = 0$.
- Si $P > P_{crítica}$; entonces $E_{Dis} > 0$.

La primera condición, asociada al caso de una presión por debajo o igual a la “crítica”, se asume que la P de salida = P de llegada al material del chorro, además $E_{Dis} = 0$, ya que al no existir corte, no existen pérdidas de ningún tipo, por lo que $E_{Ex} = E_A$. Luego si se reemplazan las ecuaciones 17 en 16 y luego en 15, se obtiene:

$$E_{Ex} = \frac{h_t^2 \times j^2 \times f \times \left(\dot{m}_{abrasivo} + \dot{m}_{agua} \right) \times P_{crítica}}{V \times \left(1 + \frac{\dot{m}_{abrasivo}}{\dot{m}_{agua}} \right)^2 \times g_{agua}} \quad (20)$$

La segunda condición, plantea que para una presión superior a la presión “crítica”, la energía cinética disipada (E_{Dis}) por el chorro interviene en el corte, vale decir que tiene una cierta magnitud, y la energía de salida (E_{Ex}) se puede obtener de igual forma que en la ecuación anterior.

La energía disipada para este segundo caso es:

$$E_{Dis} = X(\Phi) \times K \times (P - P_{crítica}) \quad (21)$$

En donde:

$$K = \frac{h_t^2 \times j^2 \times f \times \left(\dot{m}_{abrasivo} + \dot{m}_{agua} \right)}{V \times \left(1 + \frac{\dot{m}_{abrasivo}}{\dot{m}_{agua}} \right)^2 \times g_{agua}} \quad (22)$$

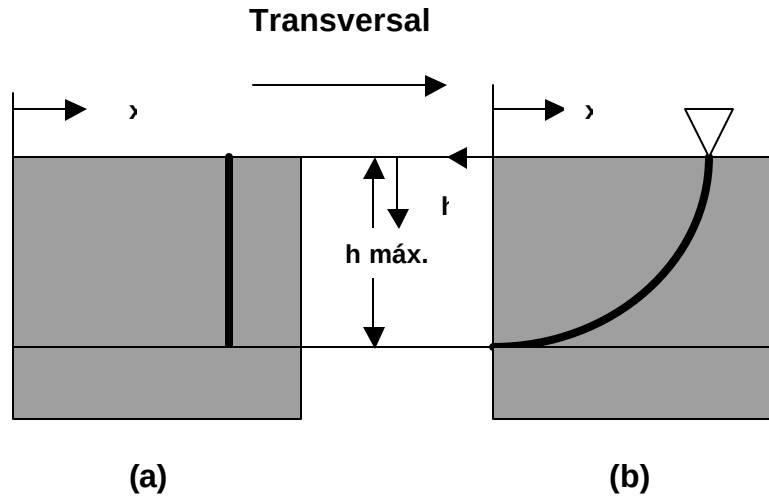


Fig.6 Corte del chorro de agua-abrasivo para una profundidad $h_{máx}$

En la figura 6(a) se muestra un corte de profundidad $h_{máx}$ ideal o que termina en forma perpendicular en la parte inferior. Sin embargo, ensayos realizados, han demostrado que realmente esto no siempre sucede y que el chorro tiende, muchas veces, a curvarse mientras penetra en el material (figura 6(b)), provocando estrías curvas en la parte inferior de la sección del material cortado (figura 7).

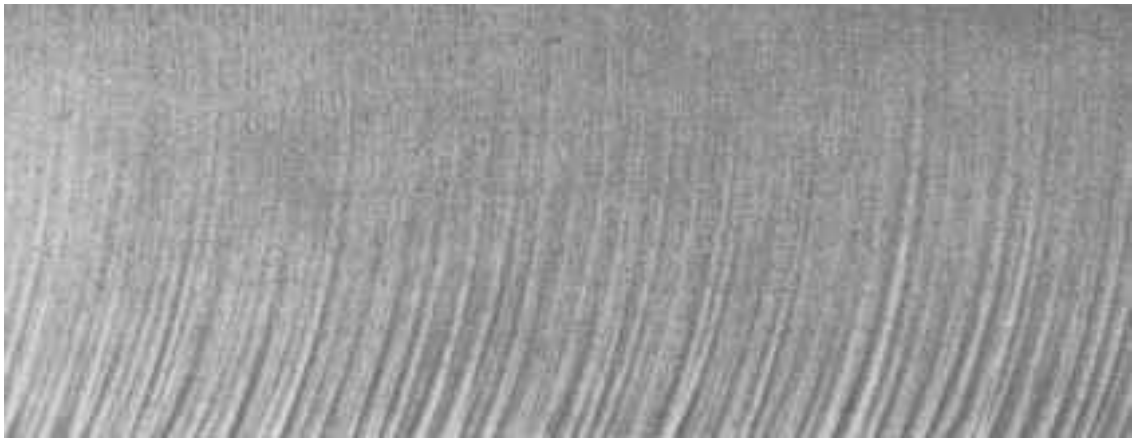


Fig.7 Estrías formadas en la sección del corte. [14]

2.5.- Determinación de la presión ideal:

Como se señaló en la sección anterior, la presión que se debe emplear para tener éxito en el corte de un determinado material, debe superar a la presión límite o presión “crítica”. Se podría suponer entonces, que empleando cualquier presión sobre la “crítica”, se logrará obtener un corte adecuado. Sin embargo, se deben tener en cuenta otros factores que inciden en el corte como: la cantidad de abrasivo que se integra al chorro, el diámetro de la tobera y el diámetro del tubo colector.

Materiales como el Acero Inoxidable, Aceros en general, Aluminio, pueden cortarse casi a cualquier presión por sobre la crítica con una combinación adecuada de los factores antes mencionados. En otras palabras se pueden obtener prácticamente las mismas velocidades de corte a 40Mpa que a 340Mpa. A presiones bajas es necesario más caudal de agua y más cantidad de abrasivo, lo que es totalmente opuesto a la alta presión, lo que representa una de las principales ventajas de cortar con altas presiones. Además al aumentar la presión, son necesarios menores diámetros de tobera y de tubo colector, por lo que se remueve menos material de la pieza que se está cortando, lo que representa otra ventaja. [13.1]

Pero el cortar con altas presiones también trae consigo consecuencias negativas como: el mayor desgaste de algunas piezas de la máquina, fatiga de algunos materiales (tuberías, empaquetaduras y sellos de la bomba, entre otros). Lo que eleva los costos de funcionamiento, debido a que hay que hacer detenciones más seguidas para realizar mantenciones.

Por lo que es importante elegir una correcta presión de funcionamiento, para no sufrir los problemas antes planteados.

Determinar la configuración adecuada de: presión de agua, cantidad de abrasivo, diámetro de tobera y tubo colector; puede ser una tarea complicada, para lograr tener un buen corte a un costo adecuado.

Sin embargo existen softwares que permiten simular esta configuración:

WJWR Linear feed rate calculator V2.2

Waterjet Web Reference Calculator

Material Setup

Material:

Thickness: inches

Pump and Nozzle Setup

Pressure: PSI

Abrasive Flow Rate: Lb/min

Orifice (Jewel) Diameter: inches

Mixing Tube Diameter: inches

Cutting Speeds

Typical LINEAR cutting speed for a smooth surface finish (in/min)

5.86

Linear cutting speed to just barely cut through material (in/min)

15.54

Power

Actual Cutting Power

6.30 HP

[? Help & Pump Info](#) [Close](#) www.waterjets.org

Fig.8 Software de simulación para la obtención de la velocidad lineal de corte

Este programa que es muy simple y sencillo de obtener, (se encuentra disponible en la dirección indicada en la figura anterior), permite simular una configuración determinada, entregando inmediatamente cual sería el resultado de ella. A pesar de que los valores entregados son muy aproximados, permite tener una idea de la velocidad de avance en el corte que se podrá obtener con ciertos parámetros iniciales. En el lado izquierdo (figura 8), deben ingresarse: el tipo de material a cortar y el espesor, más abajo, la presión de agua, el caudal de abrasivo, el diámetro de la tobera (Jewel) y el diámetro del tubo colector o mezclador (Mixing tube). En el lado derecho entrega automáticamente, primero en color violeta la velocidad de corte lineal en pulg. / min., para poder obtener una calidad de corte alta. Más abajo y con color rojo, se señala la velocidad lineal de corte en pulg./min., para obtener un acabado sólo satisfactorio o

regular. Otro software más avanzado, que permite tener una idea del: caudal de agua necesario, la velocidad de avance lineal, el tiempo de corte y el costo aproximado del corte, es el de la figura 9:

Fig.9 Software de simulación del corte

El cual fue gentilmente enviado, por Sr.Tony Ryd; técnico de soporte WATER JET SWEDEN-AB, Ronneby-Suecia.

En la primera parte del menú de configuración (figura 9), deben ingresarse: primeramente el tramo a cortar en mm, el tiempo de perforación aproximado inicial del material en segundos, el número de arranques o partidas de la máquina durante el corte, el número de detalles a realizar. Se debe seleccionar también: el tipo de material, el espesor, y la calidad de que se quiere obtener.

En la segunda parte (figura 10), deben ingresarse datos como: seleccionar la potencia de la bomba, el tipo de abrasivo, la cantidad de abrasivo en gramos, la presión de corte a utilizar, el diámetro de la tobera y del tubo colector, y el número de boquillas o inyectores que se van a emplear.

WJS-Calculator ver 1.6

File Help

Input Ajustes Costs

Ajustes

Pump capacity
30 HP / 19 Kw

Abrasivo Calidad
Garnet

Abrasivo - g (oz)
1000 35,27

Presión de corte
2200 (32331) bar (psi)

Diámetro del zafiro
0.254 (10) mm (in)

Diámetro del tubo
0.762 (30) mm (in)

Número de herramientas
1

Estimated results

Porcentaje utilizado
61 %

Caudal de agua
1,41 l/min

Avance
272 mm/min

Tiempo de corte
1 min, 55 s

Cost
3.088,07

Fig.10 Software de simulación del corte

WJS-Calculator ver 1.6

File Help

Input Ajustes Costs

Costs

Water cost per litre
200

Orifice wear cost per hour
2500

Nozzle wear cost per hour
1500

Abrasivo cost per Kg
1000

Power cost per KWh
300

Machine cost per hour
6000

Estimated results

Porcentaje utilizado
61 %

Caudal de agua
1,41 l/min

Avance
272 mm/min

Tiempo de corte
1 min, 55 s

Cost
3.088,07

Fig.11 Software de simulación del corte

Y finalmente en tercera parte (figura11); el costo por litro de agua, el promedio del costo por hora de tobera o toberas a utilizar, lo mismo para el tubo colector, el costo por kilo de abrasivo, el costo de electricidad (Kwh.), y los costos hora-máquina.

Finalmente el software entrega una estimación del porcentaje de la capacidad de la máquina que se está utilizando, determinando así si se está empleando una bomba adecuada y no se está forzando el sistema. Luego entrega, automáticamente, el caudal de agua necesario, la velocidad de avance en mm / min, el tiempo de corte en segundos y el costo del corte simulado.

2.6.- Valores característicos de la mezcla agua-abrasivo:

El chorro de agua una vez que pasa por la tobera, permanece sólo un tramo muy corto en forma uniforme y su diámetro no se altera, aumentando paulatinamente a medida que se aleja. El ingreso del abrasivo se realiza en esta zona, en donde el chorro a altísima velocidad arrastra las partículas de abrasivo, figura 12.

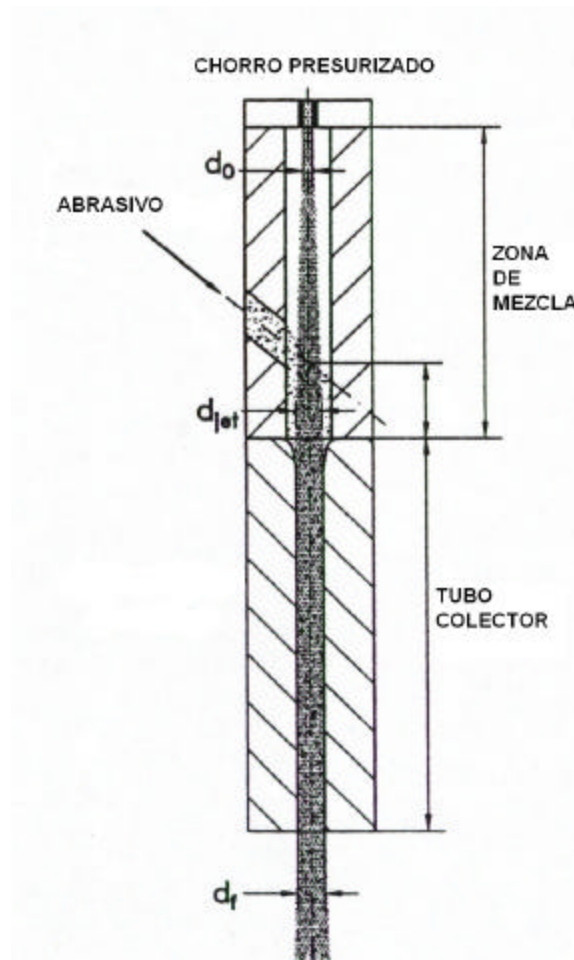


Fig.12 Ingreso del abrasivo al chorro [3]

La zona de mezcla tiene dos puntos de entrada: uno en la parte superior en que entrada del chorro de agua y la otra para la introducción de las partículas abrasivas. Como se puede ver en la figura 12, estas son introducidas desde un costado. El extremo posterior es el tubo colector, el cual enfoca finalmente la mezcla hacia el material a cortar.

Dada la alta velocidad del chorro, mientras transita por la zona de mezcla, se genera una depresión o vacío llamado efecto “Venturi”, el que succiona las partículas abrasivas hacia chorro. Esto ha logrado interpretarse matemáticamente por los investigadores, de la siguiente forma: Si se asume que al incorporarse las partículas abrasivas al chorro, éstas son arrastradas con una cierta cantidad de aire; la presión en la zona de mezcla según la ecuación de Bernoulli es:

$$P_{zm} = -g_{arrastre} \times \frac{V_{arrastre}^2}{2 \times g} \quad (23)$$

Donde $g_{arrastre}$ es el peso específico del material arrastrado, vale decir partículas abrasivas más aire y $V_{arrastre}$ es su velocidad. Esta ecuación también puede expresarse como un diferencial de presión con respecto a la presión atmosférica:

$$\Delta P_{zm} = g_{arrastre} \times \frac{V_{arrastre}^2}{2 \times g} \quad (24)$$

Las ecuaciones antes presentadas buscan demostrar que el aire y las partículas abrasivas están siendo aspiradas en la corriente del chorro y no inyectadas en el. El flujo volumétrico aproximado de aire que se está integrando al chorro, se puede escribir:

$$f_a = (1-x) \times V_{aire} \times A \quad (25)$$

En la ecuación anterior A es el área de la sección transversal de la manguera de alimentación de abrasivo, x es la fracción del volumen total de partículas abrasivas que ingresan, compuesto por aire y V_{aire} es la velocidad del aire con que se incorpora a la mezcla.

Si se soluciona la Ec.24 para la velocidad del aire y se reemplaza en la Ec.25, el flujo volumétrico se puede expresar también:

$$f_a = (1-x) \times A \times \sqrt{\frac{2 \times g \times \Delta P}{g_{aire}}} \quad (26)$$

El flujo másico total de las partículas en la corriente del chorro se puede determinar de una manera similar:

$$\dot{M} = r_{abrasivo} \times x \times V_{abrasivo} \times A \quad (27)$$

De la misma forma solucionado la Ec.24, para $V_{abrasivo}$ y reemplazando en la Ec.27, el flujo másico total se puede escribir como:

$$\dot{M} = A \times x \times \sqrt{2 \times r_{abrasivo} \times \Delta P} \quad (28)$$

Se puede ver que debido a que x es inversamente proporcional al flujo másico de partículas abrasivas, si este último aumenta, la cantidad volumétrica de aire disminuye. Con lo que se demuestra que la cantidad de abrasivo que ingresa debe ser controlado, para asegurar un correcto arrastre e incorporación de estas partículas al chorro.

Luego que sucede el arrastre de las partículas abrasivas y de que cierta cantidad de aire en el compartimiento que se mezcla, el chorro entonces pasa a estar constituido por tres componentes: líquido, gas, y sólido. Si se asume que la colisión de las partículas con el chorro de agua es inelástica, vale decir que al incorporarse las partículas abrasivas al chorro ninguna es expulsada fuera de

él, y si se asume que la velocidad de arrastre del aire y de las partículas abrasivas es mucho menor que la velocidad del chorro, entonces la velocidad de la mezcla agua-abrasivo se puede determinar a partir de la Ec.16:

$$V_A = h_t \times \frac{V_w}{1 + \frac{m_{abrasivo}}{m_{agua}}}$$

V_A es la velocidad de la mezcla, la que será menor que la velocidad del chorro que aquí es dada por V_w , ya que esta última considera sólo la eficiencia de la tobera. h_t es la eficiencia o rendimiento del inyector, producto de las pérdida por fricción en la tobera, en zona de mezcla y en el tubo colector. Este valor ha sido determinado experimentalmente, comparando la fuerza de un chorro que contenía partículas abrasivas y un chorro que no contenía partículas abrasivas, en iguales condiciones. Los investigadores que han usado esta técnica, han encontrado que su valor fluctúa normalmente entre: 0,73 y 0,94. [14]

Teniendo como referencia el Grafico 1, vale decir, para las condiciones de trabajo de: caudal de abrasivo 0,0034Kg/s del tipo granate malla #80 y diámetro tobera / tubo colector 0,254 / 0,762, y asumiendo además, una presión de agua intermedia de 138Mpa con ayuda del software de la figura 8 y teniendo presente lo dicho en la sección 2.5, la velocidad de chorro se puede calcular a partir de la Ec.17:

$$V_w = j \times \sqrt{\frac{2 \times g \times P}{g_{agua}}}$$

Con: $g_{agua} = 9.806 \frac{N}{m^3}$; j (0,8 a 0,98), asumiendo 0,9

Por lo que: $V_w = 473 \frac{m}{s}$ (Velocidad con que sale el agua luego de su paso por la tobera).

El caudal de agua necesario o que debe entregar la bomba será entonces:

$$Q = V_w \times A \quad (29)$$

Utilizando una tobera de orificio 0,254mm de diámetro, el área A de la sección del chorro es: $0,05 \text{ mm}^2 = 0,05 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, el caudal es:

$$Q = 2,365 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Reemplazando en la Ec.16, asumiendo un caudal de abrasivo de $0,0034 \frac{Kg}{s}$, de agua $Q = 2,365 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$ y un rendimiento h_t de 0,85 (0,7-0,95), la velocidad de la mezcla es:

$$V_A = 351,51 \frac{m}{s}$$

La velocidad V_A , como se puede ver, es menor que la velocidad del agua V_w . Esta velocidad es con la cual la mezcla finalmente impactaría al material, para el corte de la plancha de acero inoxidable de $e = 3mm$, supuesto al comienzo del capítulo 2, para las condiciones de operación antes mencionadas.

El caudal total de la mezcla agua-abrasivo es de aproximadamente $0,027 \text{ Kg/s}$, de los cuales el agua representa cerca del 87% del total y el abrasivo 13% restante.

2.7.- Sistemas generadores de presión:

Necesariamente estos equipos, requieren de sistemas generadores de presión que entreguen flujos continuos a presiones constantes, para que puedan operar de forma óptima.

Equipos que requieren presiones bajas e intermedias, el uso de bombas de desplazamiento positivo, también conocidas como bombas de potencia o de émbolos, pueden generar presiones máximas de alrededor de los 344MPa (bombas de últimas generación).

Una bomba de potencia o de émbolos, es una máquina alternativa de velocidad constante, par motor constante y caudal casi constante, cuyos émbolos o pistones se mueven por medio de un cigüeñal, a través de una fuente motriz externa.

El caudal de la bomba varía con el número de émbolos o pistones. En general, mientras mayor sea el número, menor es la variación en el caudal, a un número dado de rpm. La bomba se diseña para una velocidad, presión, caudal y potencia específicas. Sin embargo, puede aplicarse a condiciones de potencia menores que las del punto específico de diseño, pero con sacrificio de la condición más económica de operación.

Estas bombas se construyen en versiones tanto verticales como horizontales. Las horizontales llegan hasta los 1.500Kw y normalmente tienen dos o tres pistones, que son de acción simple o doble. La construcción vertical se usa en bombas de émbolo hasta 1.120Kw, con el extremo de fluido sobre el extremo motriz. Esta construcción elimina el peso del émbolo sobre los bujes, empaques y cruceta, y tiene un dispositivo de alineamiento del émbolo con el empaque, pero que requiere de un arreglo especial de sellado para evitar que el líquido del extremo del fluido se mezcle con el aceite del extremo motriz. Y poseen comúnmente de tres a nueve émbolos.

Los émbolos son aplicables a bombas con presiones desde 6Mpa hasta 344Mpa aproximadamente. La presión desarrollada por la bomba es proporcional a la potencia disponible en el cigüeñal, y puede ser mayor que el

rango del sistema de descarga o bomba. Cuando la presión desarrollada es mayor que estos rangos se puede originar una falla mecánica. Para evitar esto debe instalarse un dispositivo de alivio de presión entre la brida de descarga de la bomba y la primera válvula en el sistema de descarga. [9]



Fig.13 Bomba de émbolo horizontal de alta presión, modelo 180 M-3000 (WOMA; Alemania) [22].

En la figura 13 se muestra una bomba de tres émbolos, horizontal, que puede llegar a generar 300MPa. Esta bomba es comercializada por la empresa WOMA (Alemania), la cual fabrica productos para la generación de agua a alta presión.

Actualmente existen variadas empresas que ofrecen equipos para el corte con agua y agua-abrasivo, que utilizan bombas de émbolos para la generación de alta presión.

A continuación, la figura siguiente, muestra un esquema de un sistema para el corte sólo con agua, que emplea este tipo de bomba:

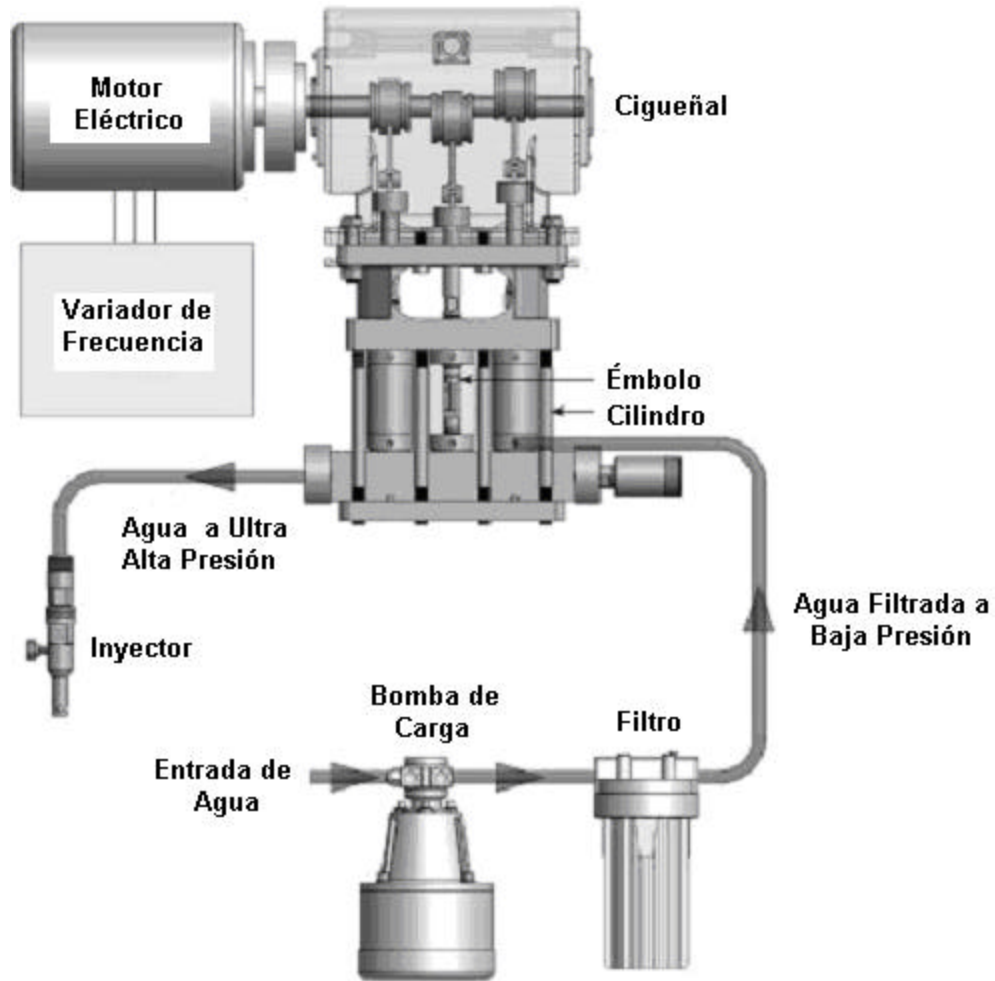


Fig.14 Sistema para el corte con chorro de agua que emplea una bomba de émbolo de alta presión. (OMAX Corporation-USA). [16]

La principal desventaja de estas bombas radica en que no pueden ser empleadas para generar grandes presiones, ya que se tornan poco confiables y el caudal aumenta su variabilidad.

Otra alternativa es el uso de un “intensificador de presión” o “multiplicador de presión”. Un intensificador de presión consiste generalmente en dos cilindros con distintos diámetros internos, y un pistón con igual diferencia de diámetros. La sección del pistón con mayor diámetro es impulsado por un sistema hidráulico de baja presión (normalmente 5 a 35MPa), el cual a su vez hace que el pistón menor genere una presión mucho mayor sobre el agua debido a la diferencia de diámetros.

La relación de incremento de presión, es directamente proporcional a la relación de áreas de ambas secciones del cilindro, y generalmente varía entre: 1:10 a 1:25.

Estos intensificadores entregan presiones de 400Mpa fácilmente, llegando incluso a por sobre los 690Mpa en equipos de última generación.

La figura siguiente muestra el funcionamiento de un intensificador del tipo simple.

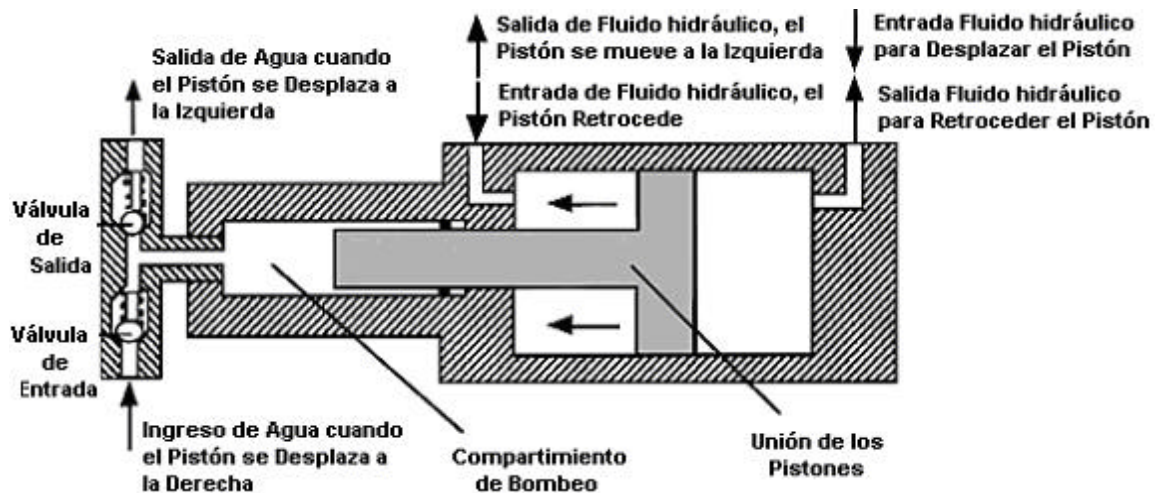


Fig.15 Intensificador simple [14]

Se han realizado también, otros diseños de intensificador, como por ejemplo el “intensificador doble”. El que consiste simplemente en dos intensificadores simples unidos formando una sola unidad. Sin embargo, esto presenta algunos inconvenientes, ya que debido a que el agua se comprime en cierta medida, como lo explican algunos expertos, el primer 15% del movimiento del pistón se utiliza para presurizar y para comprimir el agua sin ninguna entrega de volumen. Esto produce variaciones en la presión de entrega e inexactitudes en la operación de la máquina de “Chorro Agua-Abrasivo”.

Para reducir este problema, se utiliza un “acumulador de presión”, también conocido como “atenuador de presión”, ya que reduce o atenúa ésta variación.

La figura siguiente muestra un intensificador de presión doble, con acumulador:

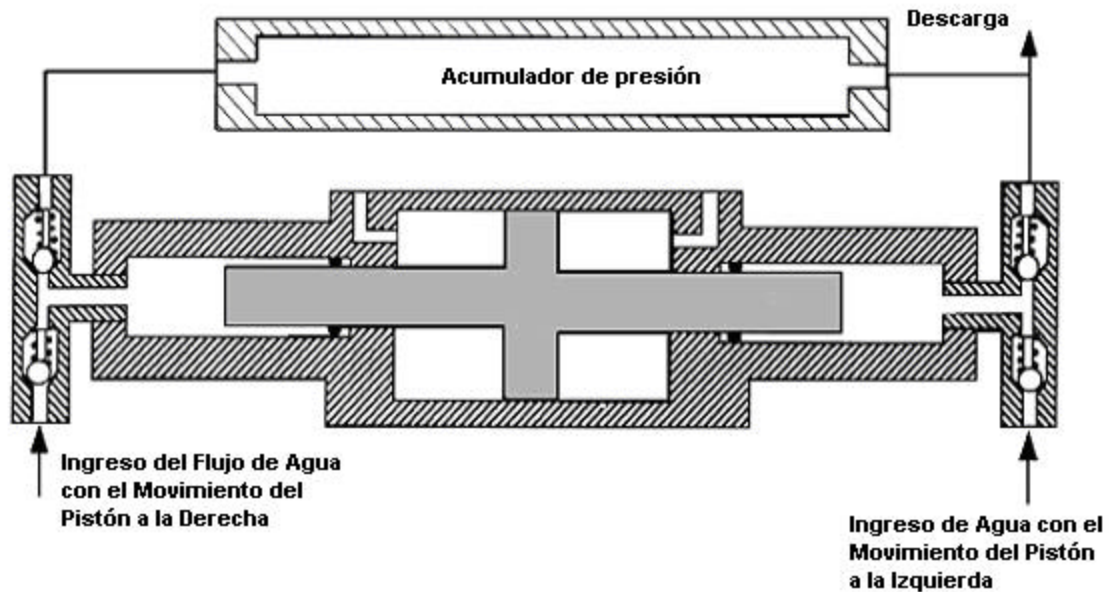


Fig.16 Intensificador de presión doble con acumulador. [14]

Cuando el acumulador almacena el volumen de agua que va entregando el intensificador a alta presión, y luego lo entrega al sistema, se percibe como una disminución en la presión de la bomba. Sin embargo, esto es lo que hace más pareja la presión de salida. A raíz de esto también, el tamaño del dispositivo acumulador debe ser proporcional al intensificador, para asegurar su correcta operación.

Otra forma de minimizar la variación de presión, es utilizar dos intensificadores simples conectados entre si, de tal forma de que cuando el primero comience su desplazamiento de compresión, el segundo ya haya finalizado su entrega. De modo de que cuando uno de ellos finalice su carrera, el otro este listo para seguir entregando presión al sistema, y así alternadamente. Tal como se muestra en la secuencia, siguiente: Figura 17; 18 y 19.

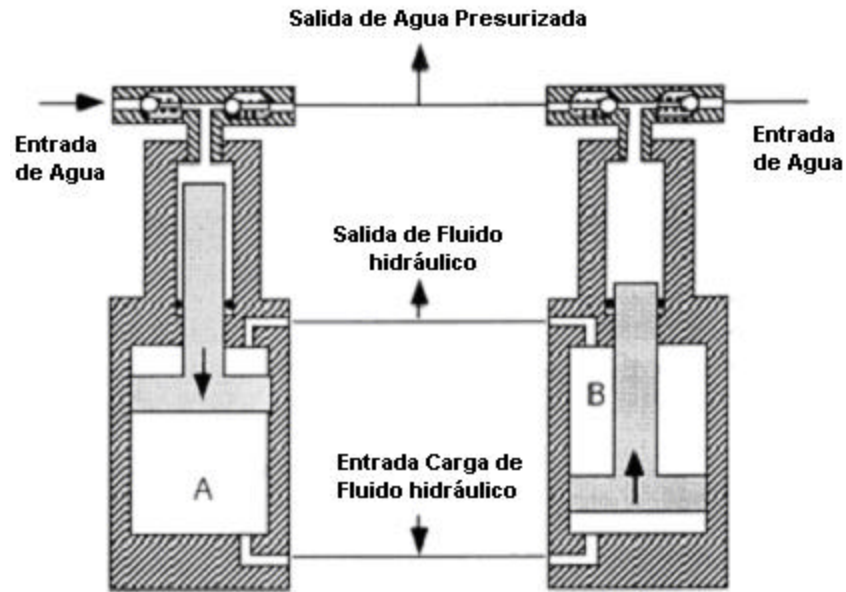


Fig.17 En el pistón A ha comenzado a ingresar agua y B ya está descargando. [14]

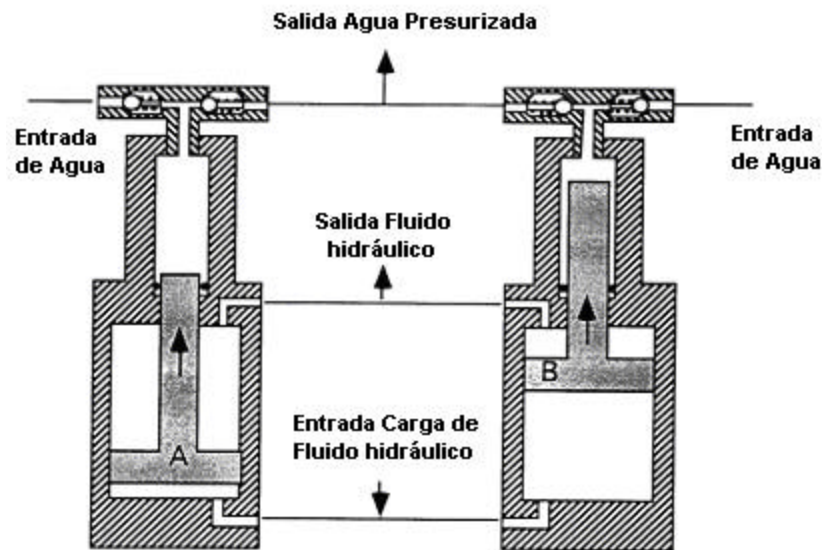


Fig.18 El pistón A ha comenzado a levantarse, comprimiendo el agua sin descargar, mientras que B continúa descargando el agua presurizada. [14]

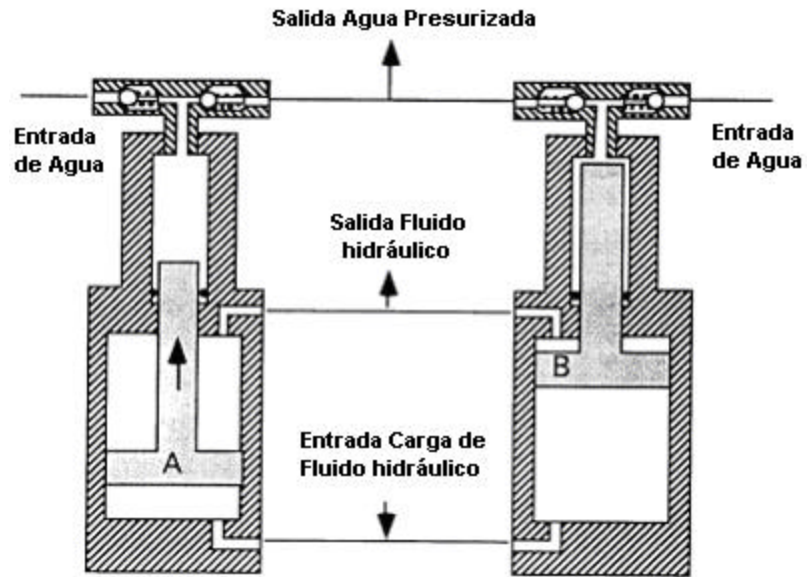


Fig.19 El pistón A ha comenzado a descargar, mientras que B se ha detenido y está comenzando el retroceso. [14]

2.7.1.- Bomba de émbolo v/s Intensificador de presión:

Este es un tema algo polémico con muchas y diversas opiniones, tanto a favor de la bomba de émbolo como en contra, lo mismo para el intensificador. Pero imparcialmente se pueden establecer algunas diferencias importantes.

La diferencia básica entre las dos bombas, es que las bombas de émbolo utilizan un cigüeñal para mover los émbolos que presurizan el agua, y los intensificadores utilizan un fluido hidráulico. Las bombas de émbolo, tienden a ser mucho más eficientes, debido a que entregan un porcentaje más alto de potencia al inyector de la máquina de corte. Esto permite que una bomba pequeña de émbolo compita en velocidad de corte con un intensificador, que necesita más energía, y que domina en términos de gastos de operación. Por ejemplo, el caso de una bomba de impulsión directa de 22Kw, la velocidad de corte que se puede lograr es casi igual a la de un intensificador de 37Kw, ya que el intensificador pierde cerca de 15Kw debido al calor que se genera en el circuito hidráulico y que debe ser extraído por un intercambiador de calor, lo que se traduce en una baja en la eficiencia.

Esta es la razón por la cual una bomba émbolo de 22Kw puede competir con un intensificador de 37Kw. El intensificador de 37Kw es probable que solamente entregue 22Kw al inyector, mientras que la bomba de 15Kw esté entregando 14Kw al inyector, los cuales significan ahorro de electricidad, a velocidades de corte similares.

Las bombas de impulsión son lejos menos ruidosas que los intensificadores, debido al sistema hidráulico que poseen estas últimas.

Debido a su baja velocidad, el intensificador entrega una o dos descargas grandes por segundo, mientras que la bomba entrega 30 descargas pequeñas por segundo. Por lo que la presión de salida de la bomba es muy pareja y segura, ya que no produce defectos de ondulación de presión, ni requiere un gran recipiente como acumulador que pueda causar una preocupación de seguridad.

Mientras que las dos bombas son comparables en el área del control de presión, cada una funciona de manera diferente. La presión de la salida del intensificador se controla variando el movimiento de la bomba hidráulica (por lo tanto variando el flujo hidráulico). La presión en la bomba de émbolos, en cambio, es controlada variando las rpm del motor eléctrico, por lo que el intensificador tiene la ventaja de tener una respuesta más rápida a los cambios de carga.

La ventaja principal del intensificador es la capacidad de hacer funcionar máquinas múltiples con una sola bomba. Los intensificadores son capaces de mantener una salida de presión constante en una máquina cuando un inyector en otra máquina es cambiado de posición.

La ventaja principal de la bomba de impulsión directa con cigüeñal, es que proporciona más energía de corte por unidad de costo, y es por lo tanto más barata de adquirir y de mantener.

En ambos sistemas, la vida de sus componentes es una función inversa de la presión de funcionamiento, cuanto más baja es la presión, más larga es la vida de estos.

A través de los años 70 y los años 80, las bombas de émbolo dominaron el mercado para presiones desde 137Mpa hacia abajo, debido a su bajo costo y confiabilidad de operación. Los intensificadores fueron utilizados para presiones de sobre 207Mpa, porque en aquella época, todos los diseños de bombas presentaban problemas a altas presiones, lo que favoreció el uso de los intensificadores. Problemas principalmente por fatiga de materiales.

Sin embargo, usando los materiales y las técnicas modernas de control de tensión, ambos tipos de bomba se pueden diseñar para una vida larga sin problemas de la fatiga, en presiones no superiores a los 380Mpa. Por lo que por esto tiempos la bomba de émbolos a cobrado un papel fundamental, principalmente debido a sus bajos costos de operación. [17]

Tabla 9 Comparación entre bomba de émbolo y intensificador de presión. [19]

Característica	Bomba	Intensificador
Eficiencia	80 a el 95%	60-70%
Uso del agua	Buena	Pobre (se requiere agua adicional para enfriar). Sobre 3 veces la cantidad de las bombas de émbolo.
Nivel de ruido (sin blindaje de ruido)	Medio	Ruidoso
Presión de Funcionamiento	240Mpa-380Mpa (en últimos diseños)	275Mpa a sobre 413Mpa
Facilidad del mantenimiento	Fácil a medio	Medio
Costo de mantenimiento	\$\$	\$\$\$
Corte velocidad	Similar al reforzador (más rápido para motores a igual potencia)	Similar a la bomba
Consistencia de Presión	Excelente	Pobres a bueno
Costo de adquisición	\$\$	\$\$\$
Costo de Piezas	Bajo	Alto
Costo en energía eléctrica.	Bajo	Mucho más alto

Considerando el caso que se ha venido analizando, y teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, sin duda convendría utilizar una bomba de émbolo para generar la presión establecida. Ya que no es muy elevada, ni tampoco es prioritario elevarla en grandes cantidades durante el corte.

2.8.- Abrasivo adecuado:

Se utilizan diversos tipos de materiales abrasivos en este sistema de corte. Dependiendo principalmente del material a cortar y de los costos del mismo. Estudios realizados en Europa y Estados Unidos, han demostrado que la mayoría de las empresas que emplean esta tecnología, utilizan mayoritariamente el granate (90 %), seguido por el olivino (15 %), escoria o esmeril (15 %), aluminio-óxido (corindón) (11 %), y arena silica (11 %). [3]

Se distinguen dos grupos importantes de materiales abrasivos: óxidos y silicatos.

Tabla 10 Clasificación de materiales abrasivos [3]

Óxidos	Silicatos	
	Granates	Otros silicatos
Magnetita	Almandino	Zirconio
Ilmenidina	Espessartita	Topas
Corindón	Piropo	Grupo Olivino
Rutilo	Glossularita	Staurolite
Cuarzo	Andradita	Olivino

Un material adecuado para el proceso de corte “Chorro de Agua-Abrasivo” debe poseer una serie de características, como son:

- Estructura del material
- Dureza del material
- Comportamiento mecánico
- Forma, tamaño y distribución del grano

Dependiendo de estas características, se determina la capacidad de abrasión del material. Existen materiales que son muy duros y frágiles a la vez, como es el caso del Coridón o Oxido de aluminio, por ejemplo. Esta fragilidad puede controlarse dependiendo de la aplicación. Como se rompen con facilidad, presentan bordes afilados, lo cual hace que sea necesaria una menor fuerza para penetrar en el material.

El tamaño de los granos de abrasivo se indica a través de un número, designado según: “Tyler-Standard-Screen” sieve-series (series de tamiz), el cual indica el número de hilos por pulgada de la malla del tamiz, con que fue cernido. La clasificación va desde mesh (malla) 2,5 a 400 (anexo1). Por ejemplo un abrasivo de malla (mesh) 100, significa que pasó por un tamiz o cedazo que tiene $101^2 = 10201$ agujeros por pulgada cuadrada, pero es retenido por un tamiz del número 120. Lo anterior esta establecido en la norma ISO 8486 -1. [3]

Estudios de regresión realizados por “Tyler-sieve-series” concluyeron en una formula representativa del diámetro de partícula según el número de malla:

$$d_p = 17,479 \times n^0 Mesh^{-1,0315} \quad (30)$$

En cuanto a las durezas de los materiales abrasivos más usados, éstas son:

Tabla 11 Durezas de los materiales Abrasivos [3]

Material	Dureza Mohs	Dureza Knoop
Oxido de aluminio	8-9	2100
Granate	7,5	1350
Olivino	5,5	1100
Arena silica	-	700

La escala Mohs es una escala cualitativa y la Knoop es obtenida experimentalmente.

En general dependiendo de la aplicación se pueden utilizar diferentes tipos de abrasivos. Por ejemplo, si se trata de cortar aluminio, no tiene sentido utilizar uno extremadamente duro ya que se trata de un material blando y que puede ser cortado correctamente con abrasivos de poca dureza y que tienen también un costo bajo. En cambio si se requiere cortar materiales de mayor dureza o en el caso de materiales frágiles, es conveniente utilizar un abrasivo mucho más duro y por ende de bordes extremadamente afilados para lograr un buen corte. Es el caso del Oxido de Aluminio y el Granate; mientras el Granate es muy utilizado en materiales dúctiles, el Oxido de Aluminio tiene un mayor efectividad sobre materiales quebradizos, como fundiciones por ejemplo. [19]

El Granate es un abrasivo que permite cortar una amplia gama de materiales. Granate, como se le conoce comúnmente, se divide según su composición química, formándose el Grupo de Granates. (Tabla 11)

La fórmula general es: $(\text{SiO}_4)_3\text{A}_2\text{B}_3$, son silicatos que tienen como base la fórmula química anterior, donde A puede ser: calcio, magnesio, hierro ferroso o manganeso y B: puede ser aluminio, hierro férrico, titanio o cromo, formándose así el grupo antes descrito.

Este mineral se forma en muchas rocas metamórficas de origen pelítico (esquistos en sentido amplio, neises), aunque también aparece en algunas rocas ígneas, y, debido a su escasa alterabilidad, suele concentrarse en sedimentos aluvionares. En las rocas metamórficas sólo llega a ser aprovechable cuando es muy abundante, o cuando la roca está afectada por un proceso de alteración que haya destruido al resto de minerales.

Un factor importante que afecta a su explotabilidad es el contraste de densidad entre el granate y el resto de minerales que componen la roca, que suele permitir una separación mineralúrgica de bajo costo.

Las aplicaciones del granate están relacionadas con sus propiedades de: dureza y densidad relativamente altas, resistencia química y no toxicidad, que permiten que tenga cinco campos principales de aplicación: abrasivo para

eliminación de óxidos sobre superficies metálicas (decapar), revestimientos abrasivos (piedras de esmeriles), filtrado de aguas, corte por chorro de agua, y pulido.

A nivel mundial, el mayor productor es Estados Unidos, a gran distancia de otros como: España, Australia, India y China. En Argentina existen datos de yacimientos pero no registran explotación actual.

En Chile existen yacimientos como: Cerro Granate, III región, esta dentro de las instalaciones de la Minera Candelaria, no se explota en la actualidad (tipo Glossularita). En la IV región en Paihuano y Parralcillo, no registra explotación actual. En el sector el Tabo e Isla Negra V región, el granate aparece en concentraciones de hasta 20% en neises granodiorítico del batolito de la costa, no se explota. En el sector costero de la VI región, emplazado en esquistos micáceos del basamento metamórfico, no se explota. Yacimiento Flor de los Andes, emplazado en una aureola de metamorfismo de contacto (80-120 m de ancho) tipo granate Andradita-Glossularita, no se explota. Mina “El Cristo” yacimiento de mármol y presenta concentraciones de granate de tipo Glossularita, se explotó en tiempos pasados.

La única explotación actual de granate (almandino) en Chile esta ubicada en VIII región, localizada aproximadamente 6,4 Km. al Sur de Santa Juana, Provincia de Concepción, propiedad de la Minera ISESA, para la fabricación de lijas. [18] Es un yacimiento aluvial en el río “Lía”, compuesto principalmente por minerales de cuarzo, granates y micas. Se estima que existen unas 1000 toneladas de concentrado de Granate, pero hay reservas potenciales aún mayores debido a la extensión de lugar. La dureza del material extraído fluctúa entre los 5,5 a 7,0 Mohs, siendo bueno para los usos antes mencionados y sólo aceptable a regular para el caso del corte por chorro agua-abrasivo. [7]

El costo de este mineral en este yacimiento, no supera los \$300.000 la tonelada (Abril 2003), en bruto, esto es sin molienda ni cernido.

El del tipo Almandino $(\text{SiO}_4)_3\text{Al}_2\text{Fe}_3$ es el que presenta las mejores características y es el más utilizado, es de color rojo figura 20:



Fig.20 Granate tipo Almandino

Usualmente se lo puede encontrar clasificados por malla (mesh), que van del nº 30 a 100 (30, 40, 50, 60, 80,100), generalmente. Con un diámetro de partícula que va de los 0,600mm para la malla nº 30 a los 0.150mm para la nº 100. El nº 60 y el nº 80, son los más populares empleados en el corte de metales en general, los cuales tienen diámetros de grano que van desde los 0.250mm a los 0.180mm aproximadamente. [3]

Según lo antes descrito y por ser el granate un material abrasivo que es ideal para el corte de metales, además existen posibilidades de explotarlo en Chile, se puede afirmar; que convendría utilizarlo en el caso antes planteado.

2.9.- Sistemas de alimentación de abrasivo:

2.9.1.- Sistema de alimentación convencional:

Si se hacen funcionamientos largos, probablemente una tolva de gran capacidad es lógica. Una de 136kg hasta de 272kg son bastante comunes. Sin embargo, muchas veces si suceden problemas de atascamiento de la tubería de salida del abrasivo o bien en el inyector, mover o vaciar una tolva muy grande puede ser muy complicado.

Además si se requiere cambiar el tipo de abrasivo en una cierta aplicación para lograr acabados muy precisos en otra, en una tolva muy grande, puede demorar bastante tiempo en reemplazar por el nuevo abrasivo.

Por lo anterior y otros factores, muchos usuarios de este método de corte han llegado a la conclusión; de que es mejor tener una tolva de alimentación por gravedad pequeña cerca del inyector. Muchos de los sistemas vienen equipados con tolvas abrasivas pequeñas cerca del inyector figura 21. Estas tolvas más pequeñas pueden entonces (opcionalmente) ser alimentadas por una tolva más grande. Hay muchas razones de esto:

- Una tolva pequeña alimentada por gravedad proporciona un caudal abrasivo uniforme y exacto.
- Proporciona una respuesta más rápida de la entrega abrasiva, que es esencial para la perforación de materiales de poco espesor y frágiles.
- Proporciona la detención más rápida, si una tolva abrasiva más grande la alimenta desde el exterior.
- Dependiendo del diseño de la tolva, puede hacer más fácil cambiar los tipos abrasivos para propósitos especiales. [19]



Fig.21 Tolva abrasiva pequeña con dosificador de abrasivo [17]

El sistema más común y generalmente usado es neumático y por gravedad. El abrasivo es transportado neumáticamente al equipo medidor o dosificador, figura 21. El dosificador abrasivo puede ser: vibratorio fijo, vibratorio variable, orificios fijos, y orificios variables. Los variables son los más comunes debido a la variedad de condiciones y flexibilidad necesaria en esta tecnología.

Básicamente, el abrasivo es transportado neumáticamente desde un tanque de almacenamiento a través de tubería a una pequeña tolva o reservorio localizado sobre el medidor de abrasivo y que se encuentra ubicada a cercana al inyector. El abrasivo cae por gravedad en el medidor; y del medidor pasa a la zona de mezcla en el inyector. [13.1]



Fig.22 Sistema de alimentación de abrasivo automatizado, tipo “Abraline”. [13]

Los fabricantes de este tipo de equipos y máquinas, ofrecen alimentadores de abrasivo automatizados. Como el que se muestra en la figura 22, que es el que ofrece la empresa INGERSOLL-RAND, y ha denominado “Abraline”.

El sistema monitorea el aporte constante de abrasivo durante todo el proceso de corte. Un corte económico y efectivo depende en gran parte de un aporte constante de abrasivo.

El sistema consiste en dos tanques, el superior no está presurizado y tiene una gran capacidad de abrasivo, es de fácil acceso y el abrasivo se carga con tan sólo retirar la tapa del mismo. El tamiz integrado garantiza que sólo se alimenta con el abrasivo del tamaño deseado.

El estanque inferior está presurizado con aire comprimido. Un transductor de presión permite ajustar la presión del aire, un parámetro directamente relacionado con la longitud de la manguera de abrasivo. Ambos estanques contienen sensores de nivel a la salida del abrasivo. Sus señales están continuamente monitoreadas en la estación de control en el tablero eléctrico.

Una lámpara de control montada sobre el tablero eléctrico muestra en todo momento el estado del sistema. Una vez que el nivel del abrasivo está por debajo del sensor del estanque presurizado, este abre automáticamente la entrada de abrasivo del estanque superior. Si el nivel de abrasivo de este, está también por debajo del nivel del sensor, la lámpara de control empieza a parpadear. Esta luz indica al operario que debe rellenar el abrasivo en el estanque superior. [13]

2.9.2.- Sistema tipo “Bypass”:

Este sistema el que fue creado experimentalmente el año 1985 e industrializado en 1986, hoy no es muy usado en sistemas de corte con “Chorro de Agua-Abrasivo”.

El sistema consiste principalmente, en desviar parte del agua que es presurizada previamente en la bomba o intensificador, hacia el recipiente que contiene el abrasivo. Esto es generalmente un 10% aproximadamente del caudal total de agua. Y luego de mezclarse con el abrasivo en el recipiente, volver a ingresar a la tubería principal, para finalmente salir por el tubo colector hacia la pieza a cortar.

En la figura siguiente se ilustra básicamente el funcionamiento de este sistema:

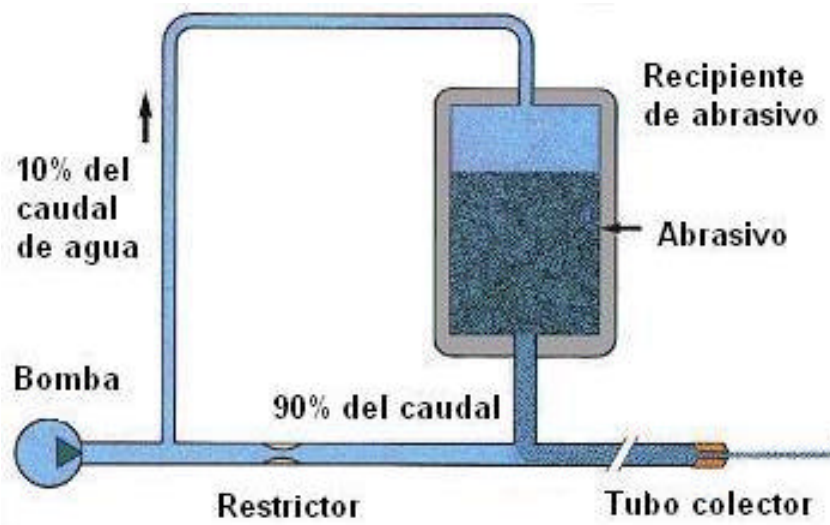


Fig.23 Sistema de alimentación tipo "Bypass" [19]

La principal desventaja de este sistema es que no puede funcionar a elevadas presiones, llegando a su límite por los 200Mpa.

Su principal ventaja, según sus creadores es, la capacidad de un buen arrastre del abrasivo hacia el chorro presurizado impidiendo la inclusión de aire en el proceso de mezclado agua-abrasivo, lo que provoca una distorsión y posterior imprecisión del chorro, como en el caso del sistema convencional. Además de que la mezcla agua-abrasivo presurizada, es conducida por una sola tubería hasta el tubo colector, lo cual da más espacio en la zona de trabajo. [3]

En la figura siguiente, se ilustra un ejemplo de una máquina que emplea el sistema tipo "Bypass". Como se ve, consta de un estanque en el cual se mezcla el abrasivo con el agua. Este estanque está cerrado al ambiente y consta de dos entradas una por un costado que es la por donde ingresa el agua y una superior que es por donde se carga el abrasivo. Además de una válvula de seguridad acompañada de un manómetro. (Figura 24)

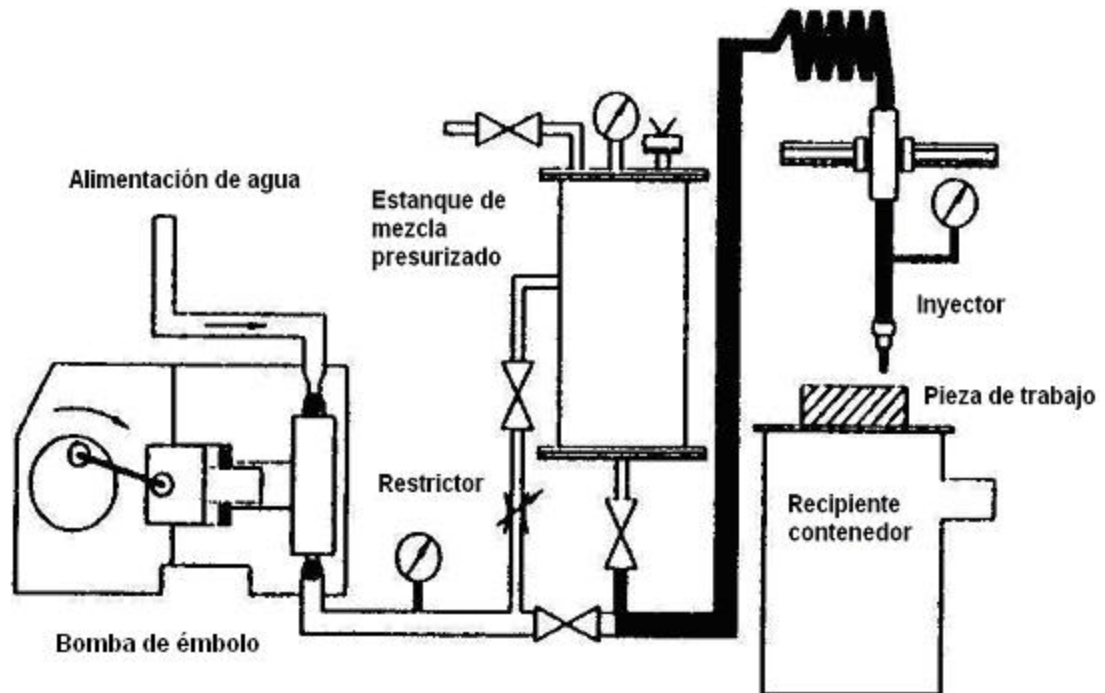


Fig.24 Máquina de corte con sistema "Bypass" [3]

2.9.3.- Sistema de bombeo directo:

Este sistema es menos popular aún que el anterior, y es aplicable sólo a un sistema que emplea un intensificador de presión. Consiste, principalmente, en que una mezcla de agua-abrasivo es impulsada por medio del líquido hidráulico proveniente de la misma bomba hidráulica que mueve al intensificador de presión y separada por una membrana que impide que el líquido hidráulico se mezcle con el agua y el abrasivo. La mezcla agua-abrasivo se realiza en un recipiente de recarga, simplemente desviando una porción de agua de la tubería principal. Luego al ser impulsada por el líquido hidráulico pasa al recipiente de descarga, el que de igual forma expulsa la mezcla hacia la tubería principal para la descarga a través del tubo colector. [3]

Basado en esto se desarrolló una técnica de la llamada “Suspension Abrasive WaterJet”, que consiste en agregar un aditivo de alta viscosidad al chorro de agua con el fin de evitar que el chorro se disperse y que la velocidad del chorro disminuya. Aditivos químicos como por ejemplo: celulosa metilica o metil celulosa, que tienen capacidades estabilizantes y espesantes en concentraciones sólidas de alrededor del 3%. Además se viene experimentando hace tiempo, con un polímero, desarrollado primeramente por la empresa petrolera CHEVRON USA, para el lavado de sus instalaciones (estanques, tuberías, intercambiadores de calor, etc.) con agua presurizada, y posteriormente un derivado de este producto fue introducido en el corte con chorro de agua. El cual, denominado en inglés “Super Water”, es desarrollado actualmente por la empresa de investigación química BERKELEY CHEMICAL INC. USA. Mejora, según sus fabricantes, las capacidades de los cortadores agua-abrasivo, específicamente: la calidad del corte, la penetración, evitando que el chorro aumente su diámetro luego de su salida del tubo colector, mayor velocidad del chorro y por sobre todo disminuyen gran cantidad los costos de mantenimiento de las máquinas, sirviendo de barrera protectora de las partes internas del intensificador de presión, de toberas y tubos colectores, además de las tuberías que la componen. Este producto se inyecta al agua precalentada en un recipiente especial, luego pasando por mezcladores y enviado a un estanque de hidratación donde se acumula y se mezcla completamente, antes de ser bombeado al intensificador de presión e ingresar al sistema de la máquina cortadora. [19]

Sin embargo, existe una gran discusión entre fabricantes y gente que denuncia que el empleo de productos químicos, como es el caso el “Super Water”, aleja al corte por chorro de agua del corte limpio sin contaminación con que fue pensado originalmente y que sus ventajas no son tales. Prueba de ello es que hoy en día productos como aquellos no son muy populares en países industrializados como USA o Europa y sólo están en fase de experimentación o en pequeñas industrias que sean atrevido a emplearlos.

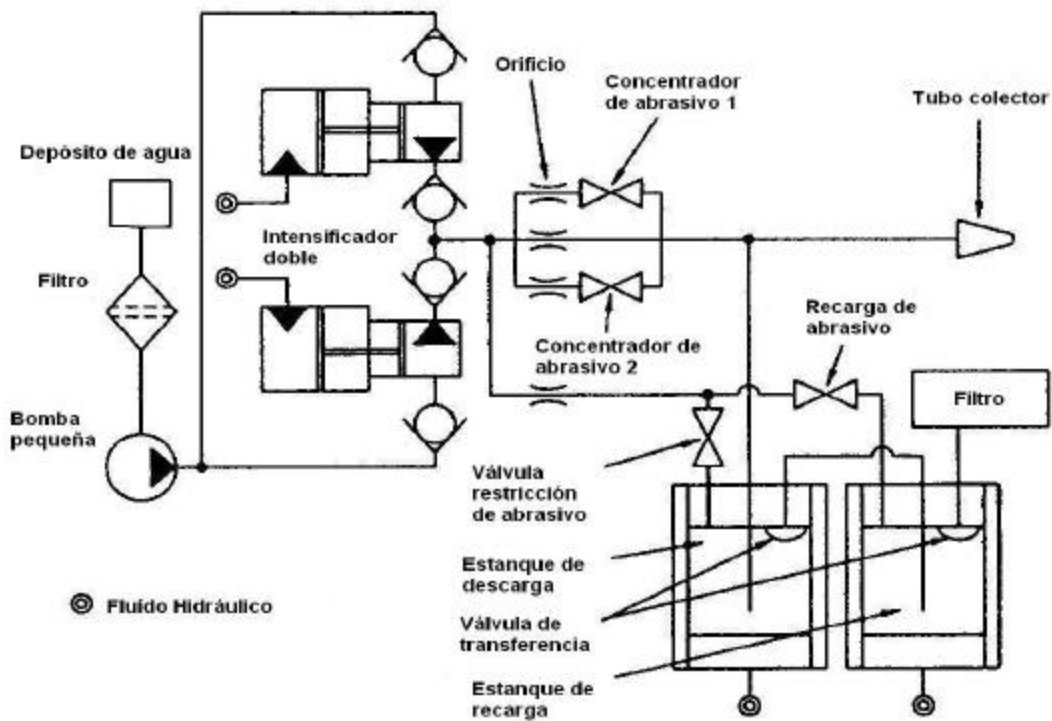


Fig.25 Máquina de corte basada en bombeo directo [3]

En la figura anterior, se muestra un sistema “Suspension Abrasive Waterjet” que se basa en el sistema de bombeo directo. Se puede ver que el aditivo “concentrador” de abrasivo se agrega al chorro por medio de dos válvulas, ubicadas a los costados de la tubería principal.

La principal desventaja de los sistemas basados en bombeo directo, es que no es posible variar independientemente el caudal de abrasivo sin alterar otros parámetros como: la presión de la bomba, el diámetro del tubo colector, y las características de la concentración de abrasivo, si es el caso. [3]

A continuación se muestra un ejemplo de sistema de inclusión del “Super Water”, en la red de agua de un cortador de agua-abrasivo, figura 26:

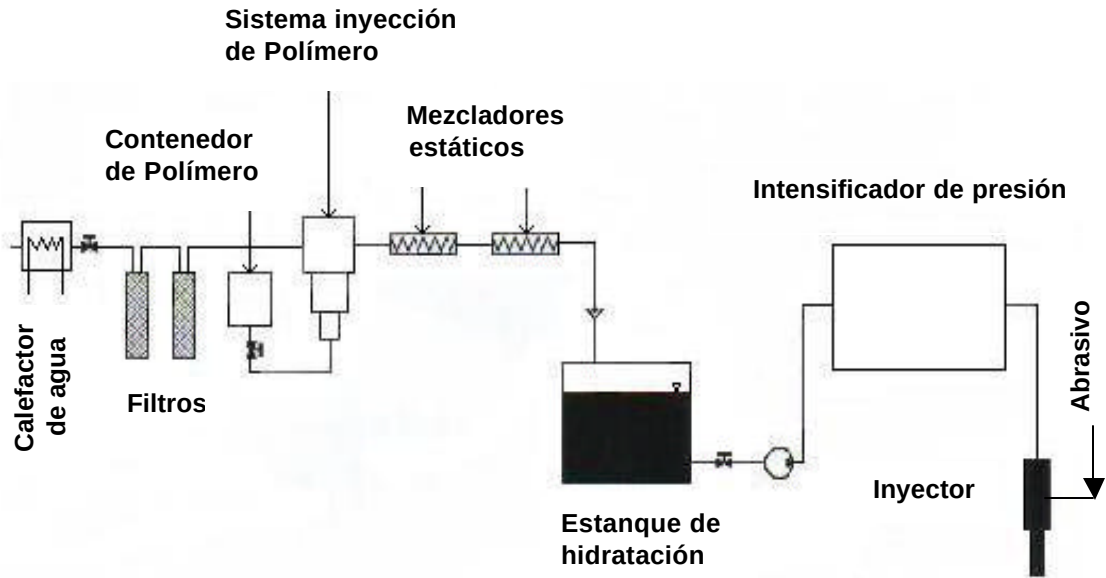


Fig.26 Sistema de inclusión de Polímero “Super Water” [19]

2.10.- Inyectores de agua-abrasivo:

Esta es la parte por la cual debe pasar el chorro agua presurizado, más crucial o más importante. Ya que es donde, primeramente el chorro es acelerado y posteriormente mezclado con el abrasivo. Las partículas abrasivas se añaden al chorro por un costado de éste, y son aceleradas por el chorro, hasta que finalmente hacen contacto con la pieza de trabajo.

En las figuras siguientes se muestran algunos diseños que se han experimentado. Puntualmente que han sido estudiados extensivamente por el señor: Dr. Mohamed Hashish; investigador y dentífico; vice-presidente FLOW Company-Kent, Washington-USA.

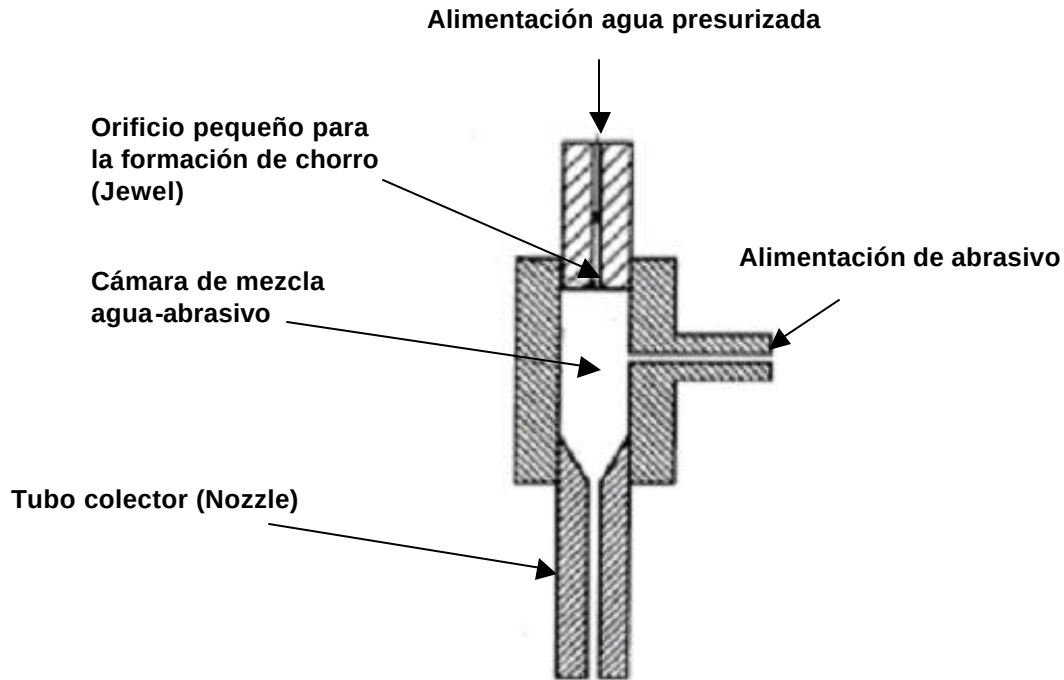


Fig.27 Diseño más común del inyector agua-abrasivo [14]

Este diseño presenta algunas características que pueden cuestionarlo en cierta medida. Como por ejemplo, el hecho de que el chorro luego de su paso por la tobera no mantiene un diámetro constante, como ya se mencionó en la sección 2.6, lo que produce que se formen dos zonas de velocidad, una interior de mayor velocidad y una exterior de menor velocidad, que corresponde a la parte exterior del chorro que tiende a separarse. Se cree que esto provoca que debido a que el abrasivo ingresa por un costado del inyector, este lo hace en la zona de baja velocidad, produciéndose turbulencias en su interior, que ocasionan cargas por fricción en esta zona y en el tubo colector. [14] Lo anterior ha generado debates por parte de los investigadores, sin embargo, este diseño sigue siendo aún el más popular, figura 27.

Se han realizado también otros diseños, dos de los cuales intentan dar a las partículas la velocidad debido a la fuerza gravitacional y a la presión de aire, y otro que incorpora una premezcla del agua y de las partículas antes de la formación del chorro. Como se muestra a continuación Figuras 28; 29 y 30.

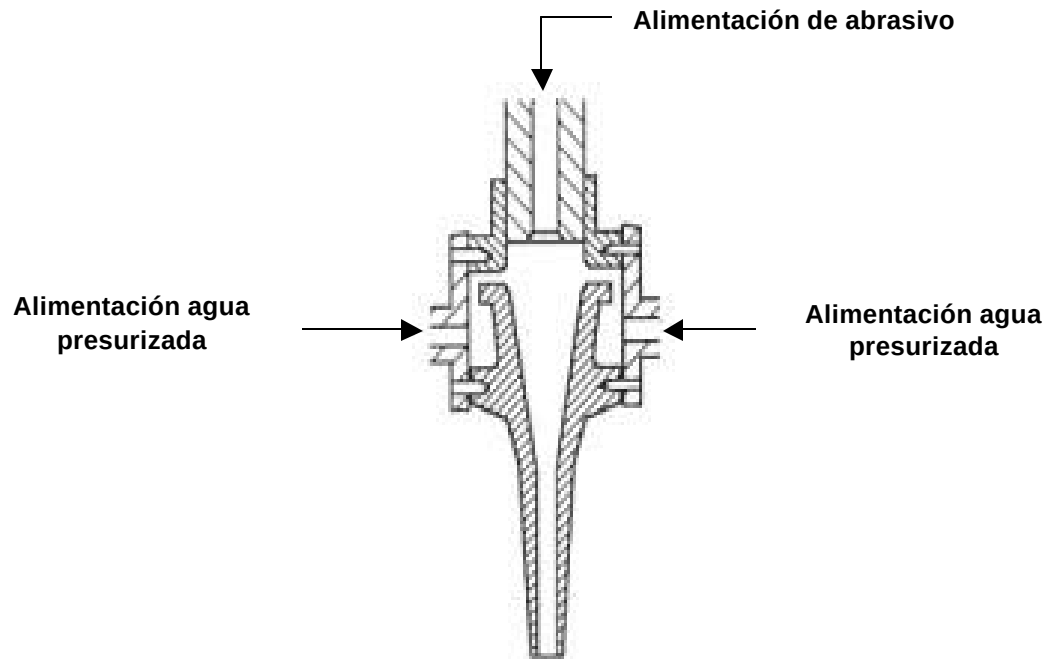


Fig.28 Diseño con pre-mezcla agua-abrasivo [14]

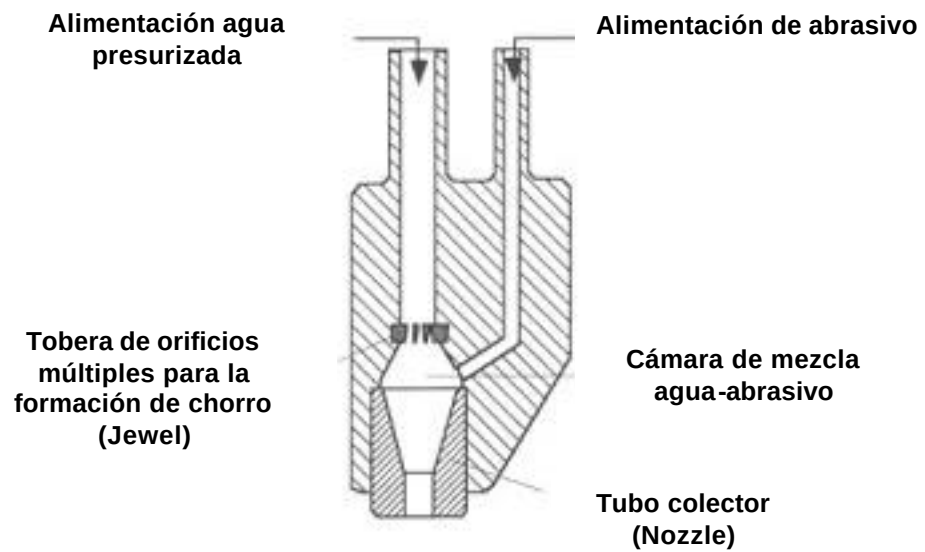


Fig.29 Diseño con alimentación por gravedad de partículas [14]

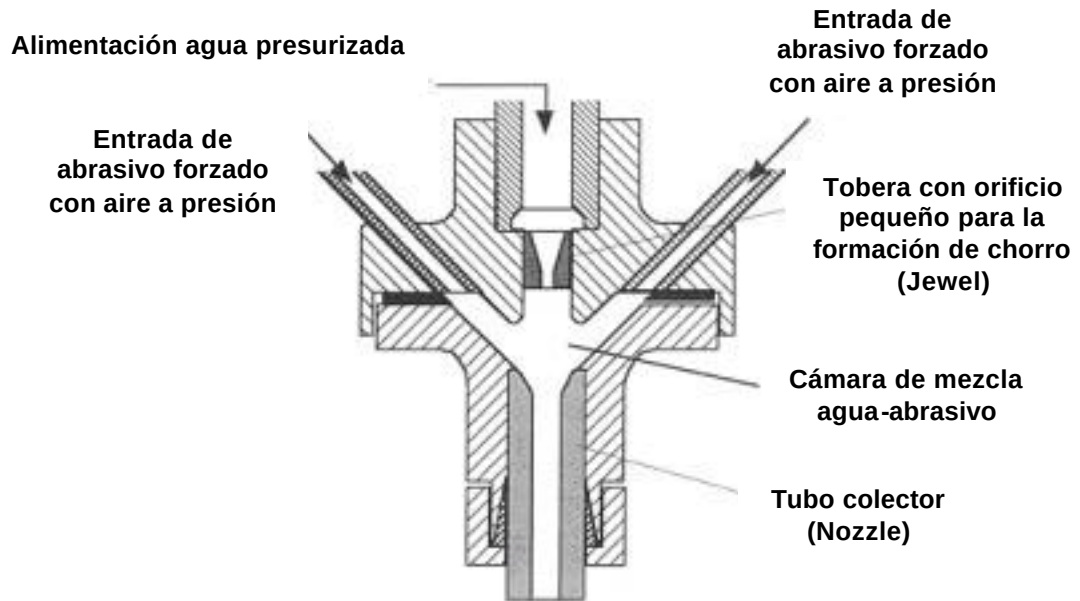


Fig.30 Diseño con alimentación de abrasivo forzado con presión de aire [14]

Dentro de los inyectores, en términos básicos, existen 3 dimensiones críticas. Estas son: el diámetro del pequeño orificio de la tobera, diámetro del tubo colector, y longitud de este último.

- **Diámetro del orificio de la Tobera:** Esta pieza del inyector, llamada también joya (por los materiales de que se construye o recubre el orificio; zafiro, rubí o diamante), es donde el agua presurizada sale del sistema de cañerías que viene de la bomba e ingresa a la zona de mezcla con el abrasivo en el inyector. Esta pieza debe ser diseñada de tal forma de que sea capaz de mantener la presión que se está generando, además de provocar que el agua fluya una velocidad extremadamente alta en el compartimiento o zona de mezcla del inyector. Cuanto más grande es el diámetro del agujero en la joya, más el agua fluye, y más grande es la bomba que se necesita para mantener una presión determinada.

En las figuras siguientes se muestran algunos diseños de toberas, para distintas aplicaciones y capacidades. Figuras 31; 32; 33. [19]

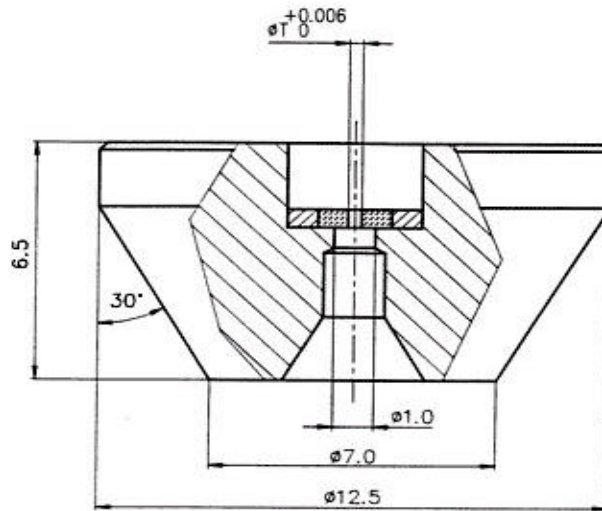


Fig.31 Diseño de tobera “tipo23” fabricada por la empresa AMC jets [8]



Fig.32 Diseño de tobera “tipo23” [8]

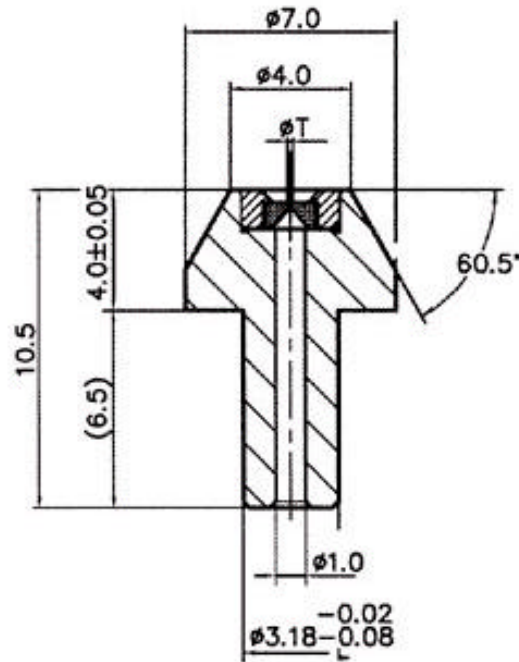


Fig.33 Diseño de tobera “tipo20” fabricada por la empresa AMC jets [8]

- **Diámetro del tubo colector:** El diámetro interior de este tubo, determina, la velocidad con que finalmente saldrá la mezcla hacia el material a cortar y cuan exacto será el corte . Figura 34 [19]



Fig.34 Diseño típico de tubo colector [8]

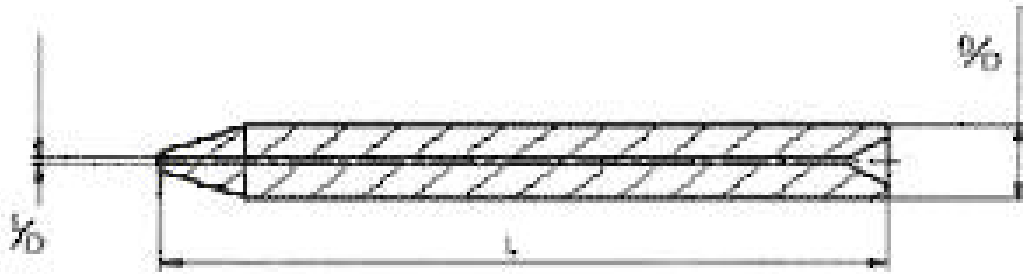


Fig.35 Muestra en corte de tubo colector [8]

- **Longitud del tubo colector:** La longitud L , figura 35, del tubo determina la capacidad del inyector de enfocar la zona del corte. Por ejemplo, uno con una longitud mayor, enfocará mejor que uno más corto, esto le dará levemente más precisión debido a que la formación de estriado (formación de estrías en la zona de corte debido a la dispersión del chorro), en este caso es reducido.[19]

2.11.- Micro-erosión del material:

Los investigadores de esta materia han desarrollado modelos del micro-corte para describir la erosión material debido las partículas abrasivas. La figura 36 muestra los parámetros geométricos y cinemáticos para establecer el modelo. Se asumió una zona de deformación plástica como respuesta del material al impacto de la partícula:

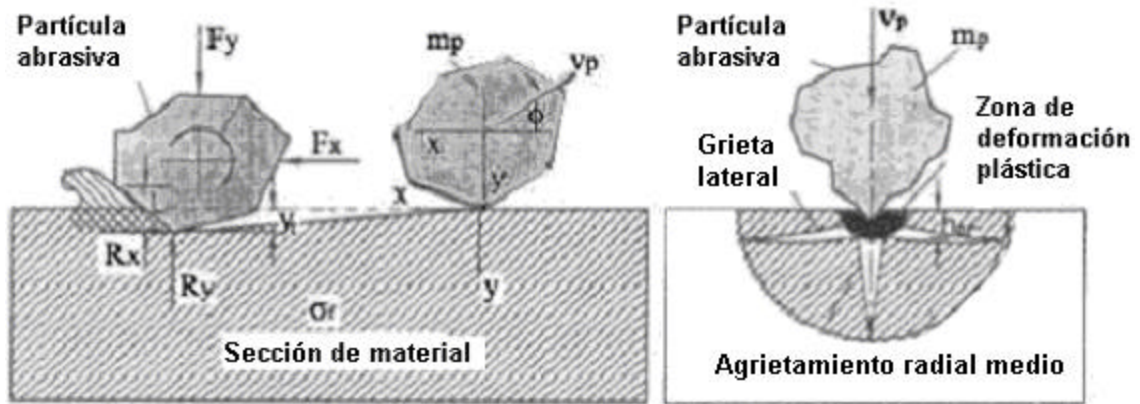


Fig.36 Impacto de una partícula de abrasivo en el material [14]

Basado en la trayectoria calculada de una sola partícula abrasiva, la cantidad o volumen de material removido, se ha logrado expresar como:

$$V_M = \frac{m_p \times V_p^2}{s_f \times K \times y} \times f(j) \quad (31)$$

Donde m_p es la masa de la partícula, V_p su velocidad, s_f es el límite de fluencia del material, K es el cuociente entre la fuerza vertical F_y y la fuerza horizontal de la partícula F_x ($K = F_y / F_x$) y y es un coeficiente de penetración el cual se asume generalmente como constante e igual a 2. Y finalmente $f(j)$ es la función del ángulo con que la partícula impacta el material y puede ser igual a:

$$f(j) = \sin(2 \times j) - \frac{6}{K} \times \sin^2 j ; \text{ para } K/6 > \tan j \text{ o}$$

$$f(j) = \frac{K \times \cos^2 j}{6} ; \text{ para } K/6 < \tan j .$$

La Ecuación 31, representa básicamente el trabajo realizado al remover un volumen de material debido a la erosión producto de la energía cinética de la partícula. Como se puede ver, esto se obtiene dividiendo la energía cinética de la partícula abrasiva por la tensión de fluencia del material.

Esta ecuación además, ha sido empleada por varios investigadores para modelar el corte con agua-abrasivo en distintos materiales. Sin embargo, hay otros que no están de acuerdo con este modelo y estiman que el uso de la ecuación 31 genera problemas. Por lo que se han propuesto otros modelos representativos. Uno de los cuales se divide en dos partes, una se denomina “desgaste del corte” y se crea a partir del resultado del impacto de una partícula de abrasivo en un ángulo pequeño y la segunda llamada “desgaste de la deformación”, a partir del impacto de una partícula en ángulos mayores (en torno a 90°). Representándose de la siguiente forma para el primer caso:

$$V_{Mcorte} = \frac{m_p \times \left[V_p^2 \times \cos^2 j - C_2 \times (V_p \times \sin j - V_{el})^{\frac{3}{2}} \right]}{2 \times e_{corte}} \quad (32)$$

$$C_2 = f(E_m, E_p, r_m, v_m, v_p)$$

Donde C_2 es función de: la densidad del material, de los módulos de Young del material que se está cortando y del abrasivo y de los coeficientes de Poisson respectivos. V_{el} es la velocidad de colisión antes de alcanzar el límite elástico del material.

Para el segundo caso:

$$V_{Mdef} = \frac{m_p \times (V_p \times \text{sen } j - V_{el})^2}{2 \times e_{def}} \quad (33)$$

En ambas ecuaciones e representa la energía necesaria para remover un cierto volumen por unidad de superficie de material.

Otros modelos de representación se basan en observaciones hechas a través de fotografías obtenidas a alta velocidad, logrando determinar de esta manera que las partículas de abrasivo de bordes más agudos y pronunciados, son las que producen una mayor deformación del tipo cortante, que una que tiene los bordes mas redondeados.

Sin embargo, estudios comparativos entre los distintos modelos que se han creado hasta el momento, han concluido que los más representativos y usados son los que se describieron anteriormente.[14]

2.12.- Generación de calor:

La generación del calor durante el corte chorro de agua-abrasivo ocurre debido a la fricción entre las partículas abrasivas al impactar con el material en la zona de corte y también debido a la deformación plástica durante el proceso de remoción de material. Actualmente, hay un conocimiento limitado sobre el calor generado y la distribución térmica de energía a través del material durante el corte.

Se ha logrado determinar que al aumentar la presión generada por la bomba, la temperatura en torno a la zona del corte aumenta, debido al incremento de las fuerzas friccionales y a una mayor deformación plástica en el material. Sin embargo, esto es sólo en una zona muy próxima a la zona del corte y no se extiende por el resto del material.

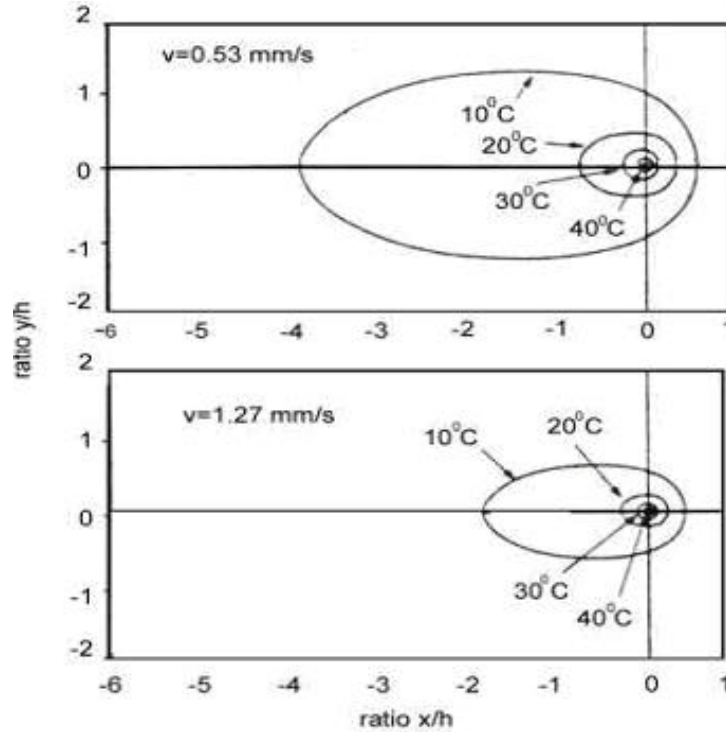


Fig.37 Distribución de temperatura con la velocidad de corte [14]

La figura 37 muestra la influencia de la velocidad de corte en el aumento de temperatura en la zona afectada para materiales en general. Una velocidad reducida produce una mayor distribución de calor, que si se aplica una velocidad más elevada. Esta variación se atribuye a que hay un mayor tiempo de contacto entre el material y las partículas abrasivas por longitud de desplazamiento. Otra característica que se aprecia en ésta figura es que la distribución de temperatura muy próxima a la zona donde impacta el chorro, forma una familia de círculos, los que a medida que se aleja de ésta se convierten en una familia de elipses. Como se puede apreciar además, las temperaturas generadas son muy bajas en relación a que puedan afectar al material de manera negativa, por lo que no representa un problema y es una de las principales ventajas de este tipo de corte. [14]

2.13.- La velocidad de avance en el corte:

Esta velocidad está regida por una serie de parámetros que deben ser combinados adecuadamente para lograr una buena terminación en el corte, dependiendo obviamente de la finalidad o propósito que se quiere alcanzar, vale decir de la aplicación.

2.13.1.- Parámetros críticos:

Regular la presión, la combinación de diámetros: tobera v/s tubo colector, la potencia de la bomba y la cantidad de abrasivo que ingresa; tienen un efecto significativo en la velocidad de avance y en la calidad del corte.

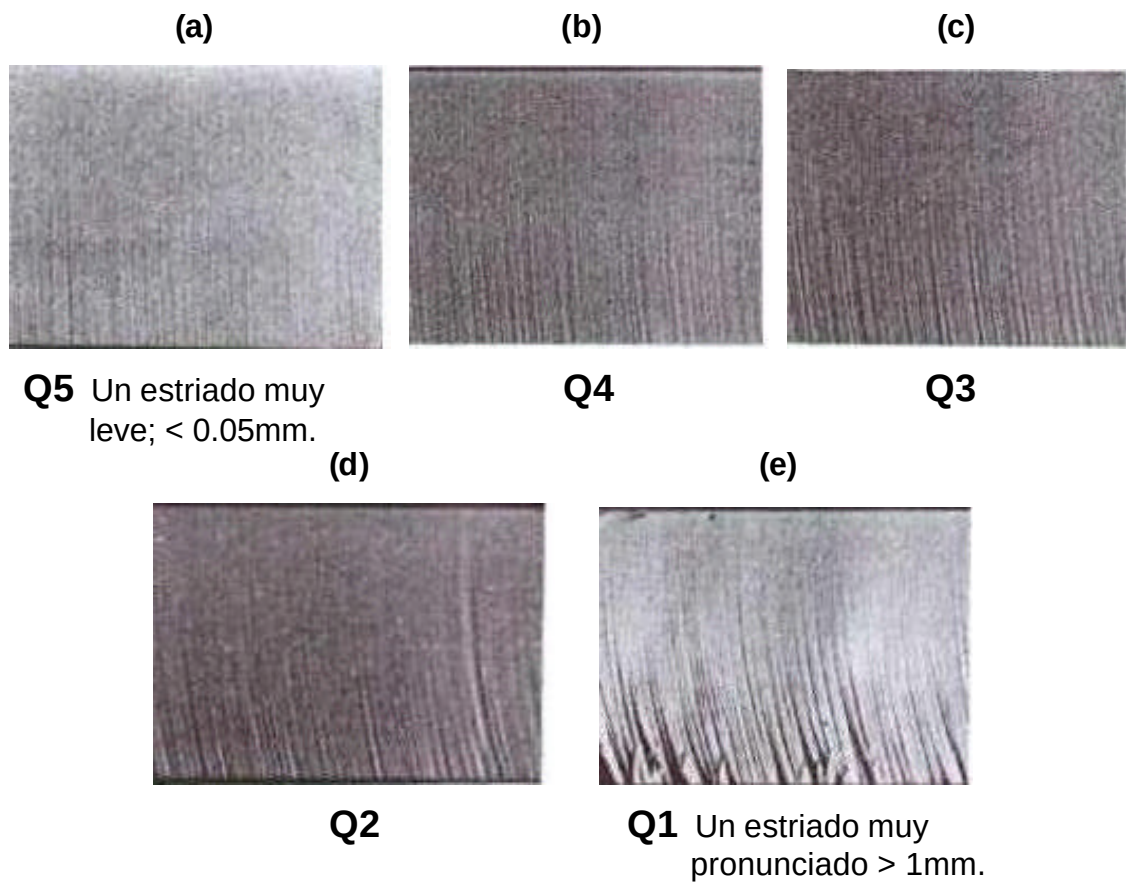


Fig.38 Calidades de corte posibles[17]

Se puede clasificar las distintas calidades que se pueden lograr. Por ejemplo; de acuerdo al estriado que presentan. Que varían entre Q1 y Q5. Una calidad Q1, figura 38(e), presenta un estriado muy pronunciado, donde las estrías pueden llegar a tener una profundidad de alrededor de 1mm. Así esto va disminuyendo hasta la calidad Q5 en la cual el estriado no llega a más 0,05mm, figura 38(a).

Esta variación, en la calidad de terminación puede ser incluso más significativa en materiales de gran espesor y depende en gran parte de la velocidad del corte. En general, con la velocidad que se obtiene un Q2 se puede cortar dos veces, que si fuera la para lograr un Q5, y a un Q1 dos veces a la velocidad de un Q2. Según lo ha podido comprobar la empresa RICHEL INC. [17]

Tabla 12 Velocidad de corte para calidades Q1 a Q5 (m/s) [17]

Calidad		Q1		Q2		Q3		Q4		Q5	
Relación diámetro tobera / tubo colector		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Material	Espesor mm										
Aluminio	3,175	46	77	30	51	23	39	18	30,5	15	25
	12,7	9	16	5,5	9	4	6,3	3	4,7	2,5	4
	25,4	4	7	2	4	1,3	2,5	1	1,7	0,8	1,7
	50,8	1,7	3	0,8	1,5	0,6	0,8	0,4	0,7	0,3	0,6
Titanio	3,175	23	39	15	26	11,4	19	8,9	15,2	7,6	13
	12,7	4,7	7,6	2,5	4,7	1,7	3	1,3	2,5	1	2
	25,4	2	3,4	1,2	1,7	0,8	1,2	0,5	0,8	0,4	0,8
	50,8	0,8	1,6	0,4	0,7	0,3	0,5	0,2	0,4	0,2	0,3
Acero Inoxidable SAE304	3,175	15	25	10	16,5	7,2	12	6	10	4,7	8
	12,7	3	5	1,7	3	1,2	2	0,8	1,7	0,7	1,3
	25,4	1,3	2	0,7	1,3	0,4	0,8	0,3	0,6	0,3	0,5
	50,8	0,6	1	0,3	0,5	0,2	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2
Acrílico	3,175	197	333	130	220	97	164,7	78	131	65	109
	12,7	39	66,5	23	38,5	16	27	12,3	20,7	10	17
	25,4	18	30	10	15,6	6	10,5	4,7	8	3,8	6,4
	50,8	8	13,5	6	2,5	2,5	4	1,7	3,4	1,7	2,5

La tabla 12 muestra las velocidades de corte para distintos materiales, con condiciones de operación iniciales siguientes:

- Relación diámetros; tobera / tubo colector: $a = 0,254 / 0,762\text{mm}$; $b = 0,406 / 1,143\text{mm}$.
- Presión de agua: 344Mpa.
- Caudal de abrasivo: 0,0053Kg/s (a); 0.011Kg/s (b).

En la tabla 12 se puede apreciar además, las distintas calidades de cortes que se pueden lograr, a las velocidades de corte indicadas. Combinando un determinado diámetro de tobera v/s diámetro de tubo colector, sobre tipos y espesores de materiales distintos, bajo las condiciones constantes de presión de agua y caudal de abrasivo indicadas.

Por lo que se debe tener en cuenta, lo antes dicho, en el momento de evaluar que corte conviene, de acuerdo a la aplicación que se requiera. Ya que un corte extremadamente “perfecto”, se puede traducir en una tarifa de producción mucho más elevada por el tiempo que requiere.

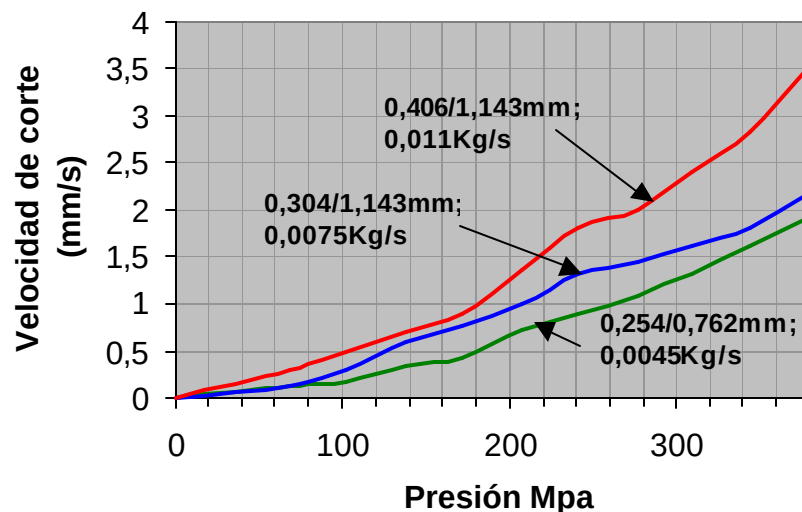


Gráfico 2 Calidad de corte Q2, en acero inoxidable AISI 304 (12,7mm) [17]

El efecto de la presión del agua y de la combinación de diámetros tobera/tubo colector en la velocidad del corte se puede ver en el gráfico 2. Se observa que el aumento de presión desde 275Mpa a 380Mpa puede permitir un aumento del 57% en la velocidad para el corte de acero inoxidable AISI 304 de 12,7mm de espesor, para una calidad Q2. Se observa también que la velocidad de corte aumenta, mientras que la combinación de diámetros tobera/tubo colector y el caudal de abrasivo es incrementado. Por ejemplo, una combinación de diámetros de 0,406/1,143mm, la velocidad es de 3,47mm/s contra 1,86mm/s para la 0,254/0,762mm, a la misma presión. [17]

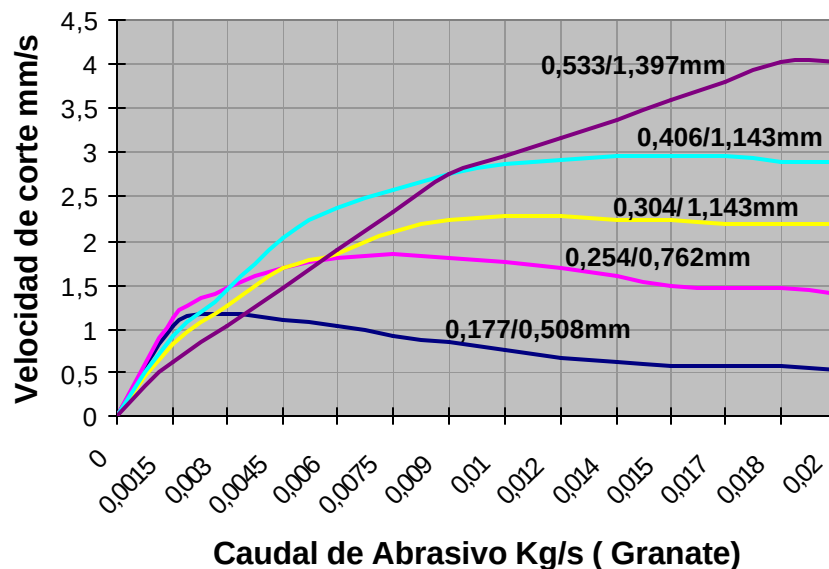


Gráfico 3 Calidad de corte Q2 en acero inoxidable AISI 304 (12,7mm) [17]

La calidad, el tamaño, y la cantidad de abrasivo utilizado también influyen en la velocidad del corte y la calidad que se puede lograr. La gráfica anterior, gráfico 3, muestra que la velocidad, con varias combinaciones de diámetros tobera/tubo colector y manteniendo una misma presión de agua, esta varía considerablemente. Mientras que aumenta el caudal de abrasivo (granate en este caso), la velocidad de corte aumenta, en todos los casos. Sin embargo, cada combinación de tobera/tubo colector tiene un límite de máxima velocidad

de corte. Por ejemplo, cuanto más abrasivo se introduce en el 0,177/0,508mm, el aumento de velocidad es sólo al principio pero después declina. [17]

2.14.- El Diseño del tubo colector:

Es muy importante que exista un buen alineamiento entre el orificio de la tobera o llamado también joya y el tubo colector. Lo cual está directamente relacionado con su vida útil.

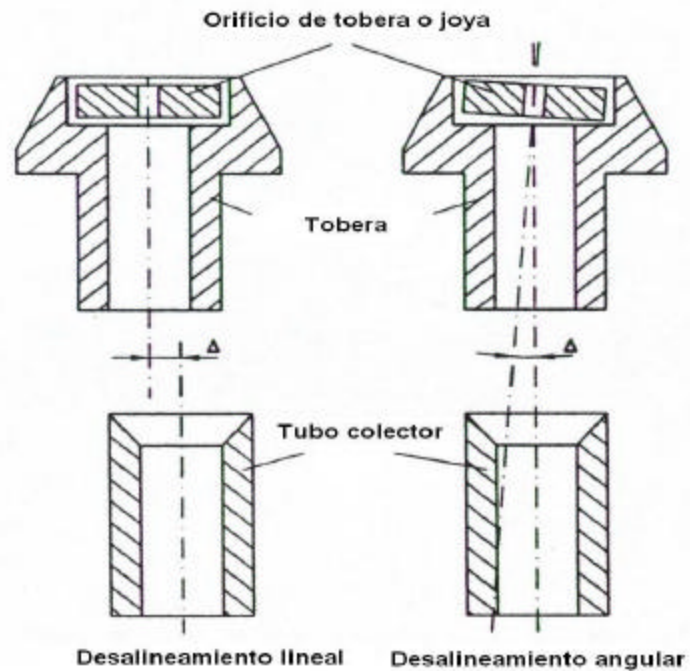


Fig.39 Desalineamiento tobera-tubo colector [3]

Si sucede alguno de los casos, mostrados en la figura 39, se produce un desgaste innecesario en el tubo colector el que hace que esta pieza se desgaste muy rápidamente.

Sin embargo, cuando este desalineamiento no existe, el desgaste del tubo mezclador es inevitable. Sólo se trata de minimizar con diseños adecuados y materiales de alta resistencia.

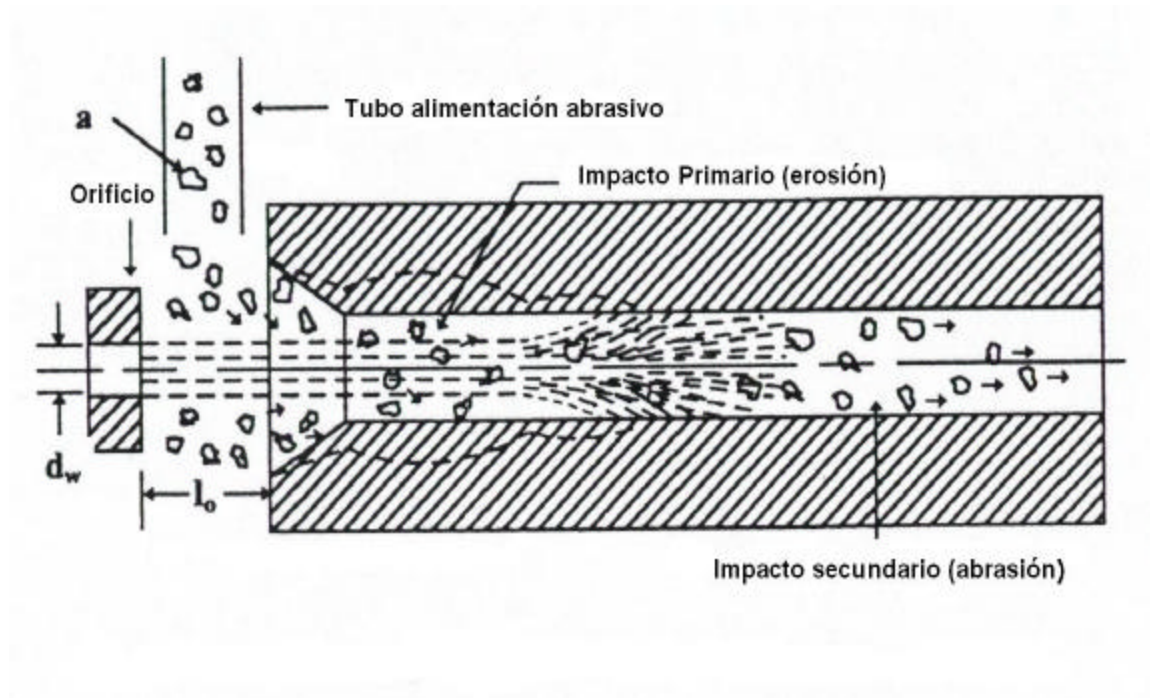


Fig.40 Desgaste del tubo colector [3]

Como se ve en la figura 40, al integrarse las partículas abrasivas al chorro y luego al ingresar la mezcla al tubo colector, se produce una suerte de rebotes de las partículas con las paredes del tubo, el cual es llamado impacto primario. Este impacto provoca una erosión del material producto del choque de las partículas abrasivas.

Más abajo y luego que los rebotes tienden a finalizar, el chorro de mezcla comienza a aumentar su diámetro, el que finalmente impacta nuevamente las paredes del tubo, pero esta vez de una forma de roce. El que provoca una abrasión del material del tubo. [3]

El material más usado para la fabricación de este tubo es el Carburo Tungsteno. Este material es una cerámica dura y quebradiza que combinada con un 6%-10% de Cobalto forma un Cermet duro (Cerámica-Metal). Este material fue desarrollado para ser utilizado en herramientas de corte, debido a su contenido en cristales cerámicos duros de unas micras de tamaño dentro de una matriz metálica. El material resultante puede aguantar las compresiones elevadas impuestas durante el corte y tiene una buena resistencia al desgaste y a la oxidación a temperaturas elevadas. El Carburo de Tungsteno-Cobalto tiene una resistencia elevada al impacto térmico y tiene la capacidad de soportar cambios de temperatura rápidos. Sus propiedades mecánicas son:

Tabla 13 Propiedades mecánicas del Carburo Tungsteno [11]

Dureza - Vickers	1550
Resistencia a la tracción (MPa)	1440
Resistencia a la compresión (MPa)	5.300 - 7.000

Otro material utilizado es el Carburo de Boro. Este material prensado en caliente tiene la más alta dureza conocida después del Diamante, del Nitruro de Boro Cúbico y del Óxido de Boro. Sus aplicaciones principales aprovechan sus excelentes propiedades de resistencia al desgaste así como su tenacidad. Su densidad es baja, pero una resistencia a la compresión junto con un módulo de elasticidad elevada conduce a una utilización como material balístico. Un 20% del boro natural es el isótopo que otorga al Carburo de Boro una sección transversal de captura de neutrones elevada. Por lo tanto, se emplea en aplicaciones de absorción de neutrones (blindajes). El Carburo de Boro resiste a los ácidos pero no a los fundidos de hidróxido de alcalí. Sus propiedades mecánicas son:

Tabla 14 Propiedades mecánicas del Carburo de Boro [11]

Dureza - Vickers	3200
Resistencia a la tracción (Mpa)	350
Resistencia a la compresión (Mpa)	1400 - 3400

2.15.- Estanque contenedor de residuos:

Por razones obvias y de seguridad el corte con este tipo de máquinas se realiza sobre mesas de corte con contenedores o estanques, para acumular los desechos sólidos producidos por el proceso de corte y el agua. Las cuales varían en tamaño dependiendo del tipo de máquina y de las utilizaciones de éstas, pero en general consiste en un recipiente rectangular sellado con una salida para que el agua y los desechos sólidos puedan ser extraídos, figura 41:

**Fig.41** Mesa de corte [17]

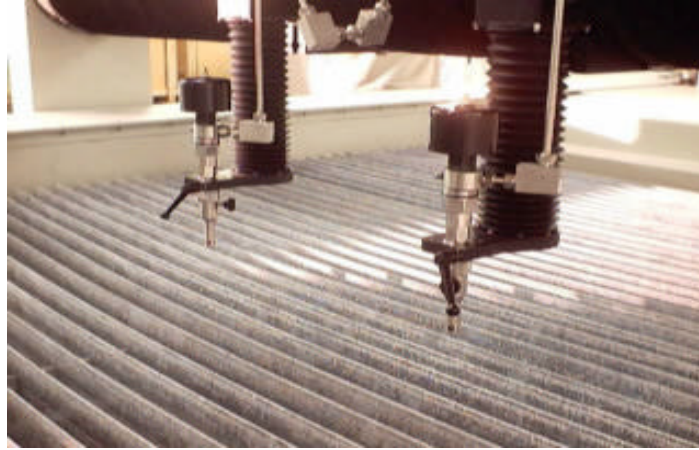


Fig.42 Superficie mesa de corte [17]

Estas mesas en su superficie poseen una serie de pletinas de un cierto ancho y espesor pequeño, distribuidas en forma vertical a corta distancia formando una superficie acanalada, figura 42, las cuales pueden ser removidas independientemente según los requerimientos presentados.

2.16.- Sistema controlador de movimiento del inyector:

Los sistemas controladores de movimiento pueden ser comandados por computadora o bien sistemas CNC. Siendo estos últimos los con menos capacidades. La elección del sistema depende de las aplicaciones y de lo que se pretenda invertir. Actualmente, los equipos de última generación utilizan complejos sistemas computacionales, que emplean softwares del tipo CAD y CAM en sus procesos.

El movimiento del inyector se realiza a través de un pórtico móvil dispuesto de forma vertical (mesas de gran tamaño), figura 43, o bien fijo (mesas de pequeño tamaño), horizontal con relación a la mesa de trabajo y con una sección en voladizo para permitir el movimiento del inyector en el otro sentido, figura 44. Como ocurre en la mayoría de las máquinas convencionales de este sistema.

Otro sistema que se ha desarrollado, es la utilización de un sistema de “brazo robótico” para comandar el movimiento del inyector. Este sistema permite al inyector moverse en distintas direcciones, existiendo actualmente equipos con movimientos en 3 ejes, hasta 6 ejes, como por ejemplo el que se muestra en la figura 45. Estos equipos son de grandes dimensiones y de sistemas bastante más complejos que los sistemas normales, por lo que sus costos son también más elevados.



Fig.43 Pórtico móvil vertical [13]

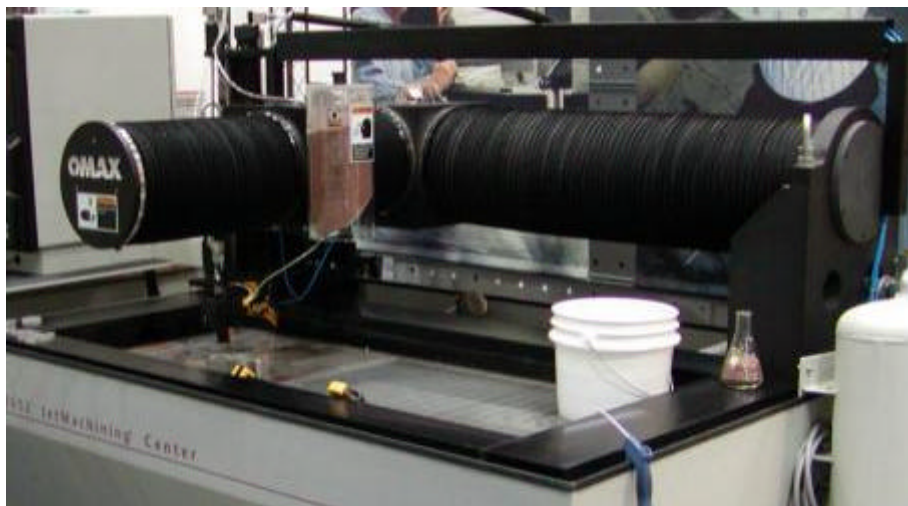


Fig.44 Pórtico fijo horizontal [16]

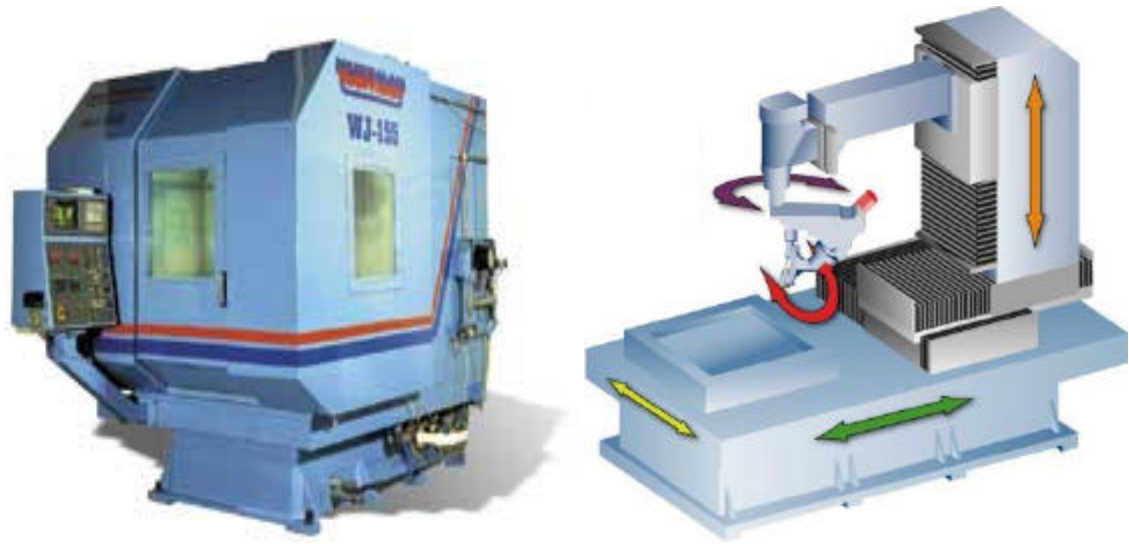


Fig.45 Sistema robótico con movimiento multi-ejes (5 ejes). Producidos por Huffman Corporation, Carolina del Sur; USA.

2.17.- Reciclaje de abrasivo:

Uno de los problemas más importantes de las empresas que emplean tecnología de corte por chorro de agua es qué hacer con los residuos sobrantes tras los trabajos de corte. La recuperación y el reciclaje del abrasivo puede suponer un ahorro de costos fundamental y una alternativa a depositar los lodos sobrantes en vertederos.

La recogida del abrasivo empleado en el corte por chorro de agua representa un problema especialmente importante para los utilizadores de esta tecnología, que están obligados a periódicas intervenciones para vaciar el contenedor y realizar la deshidratación parcial de los fangos a fin de facilitar su manipulación con medios mecánicos, para posteriormente depositarlos de forma provisional o definitiva, en cubetas o diques de contención en las propias instalaciones o bien cargarlos, transportarlos y colocarlos en una zona exterior de acumulación.

Esta práctica todavía generalizada, además de las interferencias en el normal desarrollo de la actividad productiva con la consiguiente caída de la eficiencia técnica de la máquina de corte, comporta un gravamen económico que no puede obviar la empresa.

Por un lado, el abrasivo representa un agente importante en el cálculo del costo de corte y por tanto una recuperación incluso parcial de la fracción útil a reciclar para la máquina, con la consiguiente mezcla con abrasivo fresco, puede aportar una contribución positiva al balance económico. Esto implica la necesidad de someter los fangos a un proceso de tratamiento capaz de permitir la separación de los componentes no deseados (residuos del corte, fracciones granulométricas de abrasivo muy finas, fragmentos de dimensiones excesivas y agua).

Es evidente que estos procesos deben ser simples y de bajo costo, de modo que justifiquen la operación en el plano económico. Además, el producto obtenido en el tratamiento debe tener características sustancialmente similares a las del abrasivo original, a fin de mantener inalterada la capacidad productiva del sistema, sin problemas en la velocidad de corte y sin deterioro de la calidad del mismo.

El proceso de tratamiento óptimo para la recuperación del abrasivo a reciclar depende de una serie de condiciones que afectan a:

- El sistema utilizado para la generación del chorro abrasivo.
- El abrasivo empleado (tipo y granulometría) y el material a cortar.
- Las condiciones de trabajo (presión y alimentación del abrasivo).
- El programa de producción.

El proceso de tratamiento está articulado en distintas fases resumibles en:

- Extracción de los fangos depositados en el recipiente contenedor de recogida en el transcurso de la operación de corte.
- Alimentación al inicio del circuito de tratamiento.

- Separación de los componentes indeseables y producción de la fracción a reciclar.
- Desecación del abrasivo recuperado.
- Recogida de la porción final rechazada (fangos residuales, fragmentos de dimensiones que exceden el tamaño máximo, etc.)

Se ha de observar que el diagrama de flujo del proceso y las máquinas necesarias para realizarlo son sustancialmente distintos para los principales sistemas de alimentación de abrasivo (Sección 2.9).

De hecho, en el caso de los sistemas con abrasivo premezclado o "suspendido" (AWSJ), la fracción sólida puede ser alimentada en húmedo. Esto facilita considerablemente la solución del problema de la recuperación y el reciclaje del abrasivo, que puede realizarse en circuito cerrado con la máquina de corte en continuidad o a intervalos de tiempo programados.

La extracción de la mezcla abrasiva de la cubeta de recogida se realiza por aspiración con una bomba centrifugadora a través de la descarga en el fondo, evitando la sedimentación del abrasivo por medio de agitación mecánica. La bomba alimenta directamente un hidrociclón de diámetro apropiado (unos 100mm), en el cual se produce la clasificación según tamaños en dos fracciones:

- Underflow; formado sobre todo por partículas gruesas parcialmente densificadas (contenido de agua residual en torno al 20-30 %) con pocos finos arrastrados por efecto de la imprecisión típica del aparato.
- Overflow; en el que están contenidos los finos y gran parte del agua.

El costo del tratamiento es muy bajo, limitándose esencialmente a la energía consumida de la bomba (potencia en torno a 1 kW) y a la sustitución de las partes sujetas a desgaste (partes rotatorias y revestimiento de goma del cuerpo de la bomba, ciclón, etc.).

Más complicado es el caso del sistema AWJ, en el que el abrasivo debe ser necesariamente alimentado en seco.

El problema se agrava por otros factores desfavorables como:

- Una degradación granulométrica mayor que en el sistema de abrasivo premezclado y por tanto una menor recuperación del abrasivo reciclable.
- Necesidad de realizar el vaciado del recipiente contenedor a intervalos suficientes por la formación de una capa de sólidos depositada, extraíble por medios mecánicos.
- Sedimentación heterogénea por densidad y tamaños, con la consiguiente inhomogeneidad del fango extraído de la cubeta y dificultad de transporte y alimentación regular del sistema de recuperación.

Por lo indicado, el tratamiento de los fangos no puede ser realizado en circuito cerrado, si no que necesita un sistema separado con incremento de los costos de inversión y de operación.

Teniendo que realimentar en seco el abrasivo recuperado, el uso del hidrociclón no es en principio aconsejable, por cuanto el producto obtenido contiene todavía una excesiva cantidad de agua a eliminar antes del desecado final.

Otros aparatos utilizados en el campo de la preparación de los minerales, como los elutriadores a contracorriente y los clasificadores de rastrillos o de espirales no parecen tampoco apropiados por cuanto, debiendo trabajar con mezclas diluidas, requerirían el movimiento de grandes cantidades de agua para poder obtener un producto bien deshumidificado.

Las mesas vibrantes podrían ser tenidas en cuenta por su capacidad de seleccionar las partículas sólidas por densidad, eliminando al mismo tiempo los finos. Sin embargo, requieren ser alimentadas con materiales densos y están caracterizadas por bajas capacidades de tratamiento, por lo que han caído prácticamente en desuso. En relación al objetivo a conseguir, consistente esencialmente en una selección granulométrica, la operación de tamizado en húmedo con criba parece preferible por los motivos siguientes:

- Simplicidad de las operaciones respecto a las otras técnicas de selección
- Costos limitados de inversión y de uso
- Buena precisión de la separación
- Preparación de un producto bien escurrido

Finalmente se puede concluir que, el tratamiento para la recuperación y el reciclaje resulta conveniente siempre que:

- La instalación sea de capacidad adecuada para poder permitir la concentración de las operaciones en un tiempo limitado sin interferir con la normal actividad.
- La recuperación de abrasivo reciclable sea suficientemente elevada.
- Los fangos sean de composición simple para no complicar el esquema de tratamiento.[23]



Fig.46 Máquina de reciclaje de abrasivo [23]

En la figura 46 se muestra un sistema de reciclaje de abrasivo, para el tipo de corte con alimentación de abrasivo convencional. Desarrollado por la empresa WARDJET INC., perteneciente a RICHEL INC.; USA.

El desecho del corte es bombeado hasta la máquina desde el estanque receptor de la mesa de corte, luego filtrado, para eliminar las impurezas del corte, luego pasa por un serie de cribas para homogeneizar las partículas abrasivas y finalmente son secadas por ventiladores de gran capacidad. Saliendo de la máquina totalmente seco y listo para ser utilizado, figura 47.

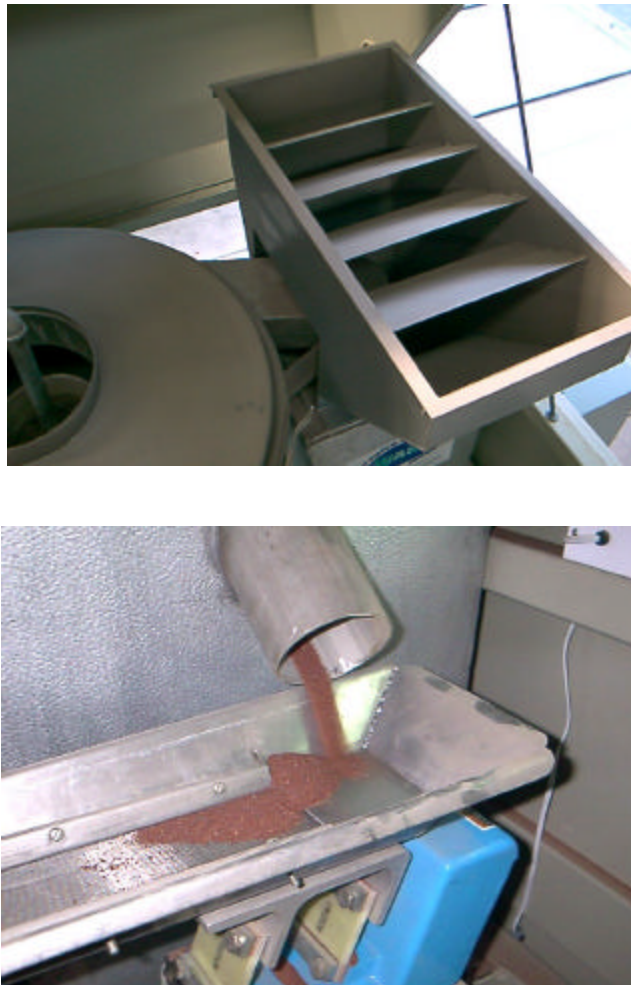


Fig.47 Sistema de secado y salida de abrasivo [23]

2.18.- Equipos actuales:

Actualmente en el mercado mundial existe una gran oferta de este tipo de equipos. Equipos de grandes dimensiones para el corte de variados materiales de grandes dimensiones y espesores, y otros más pequeños diseñados para tareas más específicas. Equipos portátiles para cortes en terreno de: concreto, parte de embarcaciones, aplicaciones artísticas (sobre mármol, granito, etc.). Con sistemas robotizados que permiten cortar en múltiples direcciones. Sistema para trabajos de precisión, mini-inyectores de orificios muy pequeños, logrando cortes de entre 0,5 y 0,7 mm de ancho.

En general los equipos actuales son aplicables en cortes de todo tipo y precisión. Siendo estos cortes cada vez más precisos, gracias a los sistemas computacionales que se encuentran en continuo desarrollo. A continuación se muestran algunos ejemplos de equipos y de piezas o productos maquinados con el sistema “Chorro de Agua-Abrasivo”:

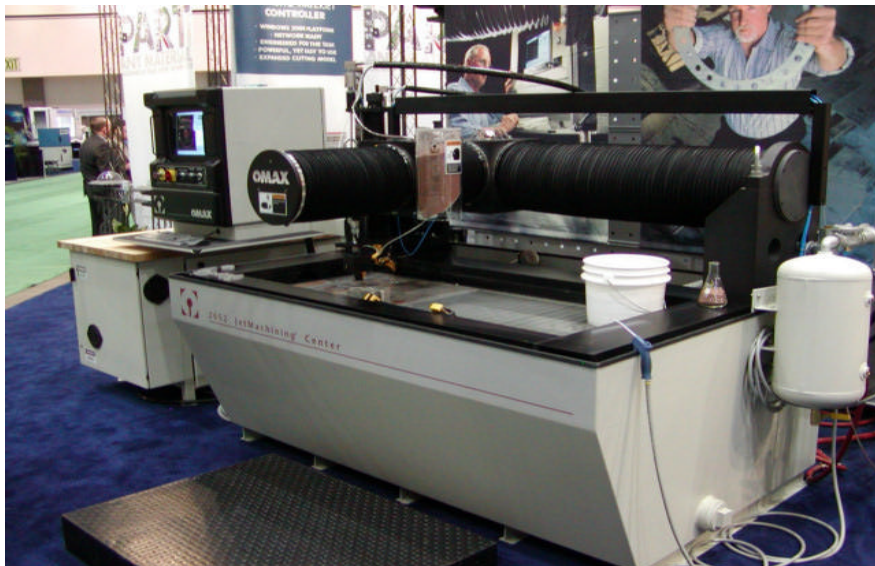


Fig.48 Equipo actual pequeño, fabricado por OMAX (USA); modelo 55100, mesa de corte de 3,2m x 1,6m y sistema computacional tipo PC con CAD/CAM

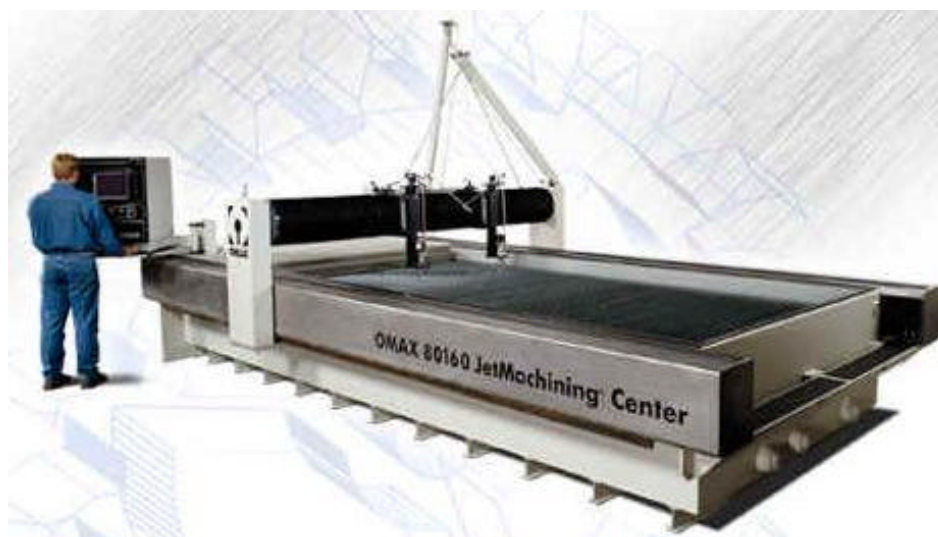


Fig.49 Equipo actual, fabricado por OMAX (USA); modelo 80160, mesa de corte de 7,3m x 3,4m y sistema computacional tipo PC con CAD/CAM



Fig.50 Equipo de última generación, fabricado por FLOW (USA)



Fig.51 Brazo robótico sistema multi-ejes

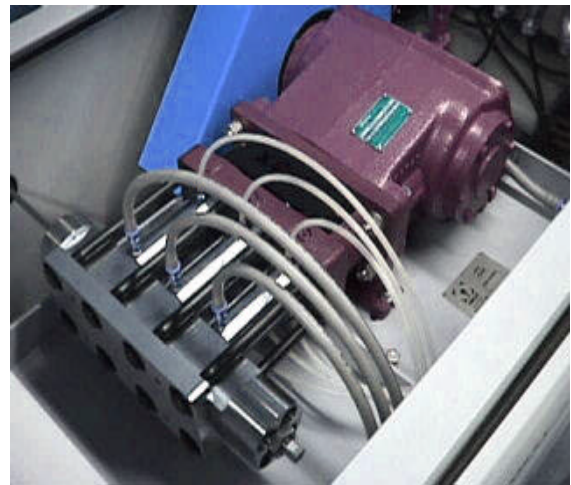


Fig.52 Intensificador de presión doble (Izquierda.) de 380Mpa y 37Kw, bomba de émbolos triple 240Mpa y 15Kw (Derecha) [19]



Fig.53 Piezas fabricadas mediante “Chorro de Agua-Abrasivo” [19]

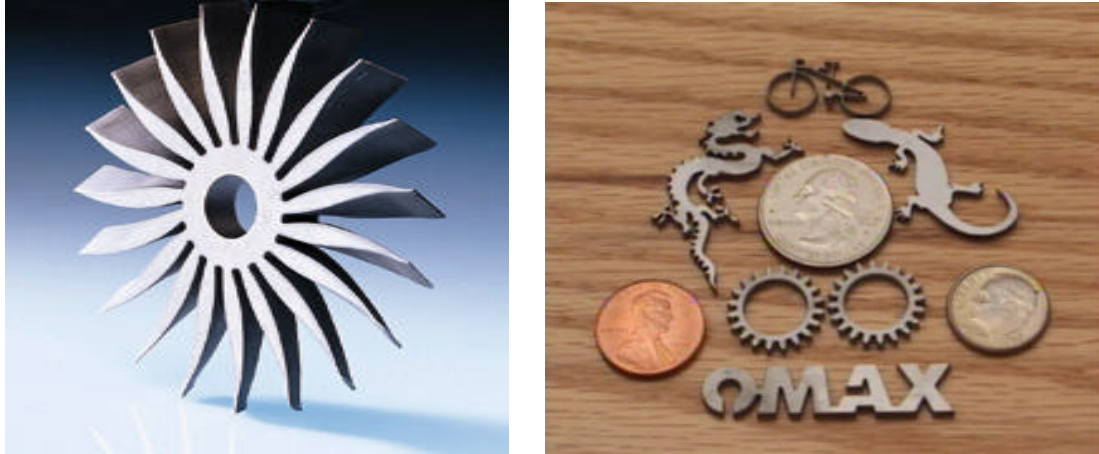


Fig.54 Piezas fabricadas utilizando chorro de agua-abrasivo; con sistema “Robótico” (izquierda) y mini-inyector (derecha) [19]

2.18.1.- Proyecciones futuras:

El futuro de esta tecnología parece ser bastante auspicioso. Mucha gente que comercializa, que emplea en sus procesos productivos ésta tecnología y que trabaja en centros de desarrollo e investigación, concuerda que en los próximos años ésta tendrá un desarrollo aún más importante que el actual. Más empresas se integrarán a la fabricación y comercialización de este tipo de máquinas. Más universidades incorporarán estos equipos en sus centros de investigación de tecnología, de diseño de componentes y materiales. Se lograrán avances en el mantenimiento de las máquinas, haciéndolo menos frecuente. Avances en materiales para la fabricación de tubos colectores, logrando materiales más durables y económicos.

Proyectándose hacia las próximas décadas, se piensa que se lograrán crear máquinas mucho más pequeñas que las actuales, logrando ser utilizadas en talleres y locales comerciales de productos dimensionados. Además de disminuir el número de fabricantes de equipos. Se cree además que sucederá algo similar a lo que sucedió con la industria automotriz de los años 20. En la que muchas compañías que intentaron crear modelos alternativos, basándose

en ideas de sus competidores y creando una atmósfera de duda acerca de los productos emulados, provocaron que se buscara una sola línea de productos. Por lo que se espera, lograr una estandarización de los equipos y compartir lealmente las buenas ideas de la competencia.

Finalmente en un horizonte aún un poco más lejano, muchos concuerdan en que con los avances en los sistemas computacionales, se podrán crear equipos mucho más pequeños y potentes, conectados a través de redes neuronales, logrando increíbles resultados en precisión y tamaño de productos. [19]

CAPITULO 3: ANÁLISIS DE COSTOS

3.1.- Introducción:

Con el inicio en la construcción de grandes proyectos industriales y comerciales en la zona, se ha requerido una serie de trabajos especializados por parte de las empresas constructoras y contratistas que trabajan en ellos. Los que han sido cubiertos en su gran mayoría por empresas foráneas, ya que en Valdivia no han podido ser realizados por la falta de capacidad y de equipos especializados. Un servicio de corte del tipo “Chorro de Agua-Abrasivo”, podría complementar equipos existentes en empresas de la zona, logrando realizar trabajos más especializados y de mayor calidad. Prestar servicio de corte de planchas y fabricación de piezas específicas, por ejemplo, de materiales como: aceros inoxidables, aleaciones, materiales compuestos, gomas, vidrios, cerámicas, teflones, etc.

A nivel nacional sólo existe una empresa que ofrece este servicio, en la ciudad de Santiago, Industrias ECASO S.A. Regionalmente no existen competidores directos de un servicio de estas características. Sólo empresas que poseen cortadores del tipo oxicorte, plasma o otras como guillotinas y sierras.

Además, con la puesta en marcha del tratado de libre comercio con USA, se espera una disminución arancelaria de impuestos progresiva, lo que tendrá un impacto positivo en el precio de importación de estos equipos, de sus repuestos y abrasivos.

Todo esto hace atractiva la posibilidad de implantar esta tecnología en la región, considerando también que el principal elemento que se consume en esta, es el agua, la que se encuentra fácilmente y en grandes cantidades en esta zona. Sin embargo, es necesario un estudio mucho más profundo para decidir una inversión de esta envergadura.

Pensando en la posibilidad de que alguien se interese por instalar una máquina de este tipo, por ejemplo, algún establecimiento comercial, empresa que quiera complementar sus máquinas cortadoras o simplemente que quiera cambiar sus equipos por este sistema, a continuación se dará una idea de los costos de adquisición y de operación de un equipo en esta zona.

3.2.- Costos de los equipos:

El costo de un equipo automatizado nuevo, de corte “Chorro de Agua-Abrasivo” con la última tecnología, según la empresa norteamericana FLOW, con representación en Brasil FLOW LATINO AMERICA y filial en Argentina, que es la única que posee operaciones propias en varios países de Sudamérica y que tiene cobertura de asistencia técnica en Chile, donde ha instalado equipos para preparación de superficies metálicas, cortadores en líneas productivas de placas de fibrocemento, probetas para cubiertas de caucho para maquinaria minera, además del único cortador “Chorro de Agua-Abrasivo” que opera en Chile; fluctúa aproximadamente entre los US\$ 90.000 hasta sobre los US\$ 200.000 (ref. mayo 2003), considerando flete y tarifas aduaneras. Estos valores incluyen además: puesta en marcha, capacitación y servicios técnicos. [10.1]

Un equipo pequeño acorde a lo planteado en la sección 2 (anexo 2), costaría alrededor de US\$ 90.000, y tienen capacidades de generar alrededor de 275Mpa con una bomba de 8Kw. El más comercializado tiene un tamaño intermedio, con una bomba de 22Kw que genera 345Mpa y cuesta alrededor de US\$ 165.000.

Estos equipos incluyen: mesa de corte que van desde los 0.5m x 1m hasta 3m x 4m, sistema de control computacional, sistemas completos de alimentación de abrasivo y generación de presión.

3.3.- Costos de operación:

Los elementos que deben ser remplazados producto del desgaste normal durante el corte son: La tobera y el tubo mezclador.

- La tobera tiene una duración aproximada promedio con buen tratamiento previo del agua de: 200 horas de trabajo, en el caso del rubí y de sobre las 200 horas para las de diamante. Sin embargo, su valor tiene grandes diferencias: US\$ 25 para rubí y US\$ 480 diamante (debido a su complicada fabricación).

Costo utilizando rubí: $0,1\text{US\$/h} = \mathbf{70\$/h}$. (US\$ = \$700).

- El tubo mezclador tiene una vida útil aproximada promedio de 90 horas. Y su precio va de los US\$ 70 a los US\$ 200.

Costo: $0,35\text{US\$/h} = \mathbf{245\$/h}$. (US\$ = \$700).

Además se consumen; tomando como referencia los datos asumidos del caso presentado en la sección 2 (corte plancha inox. $e=3\text{mm}$); Abrasivo, agua y corriente eléctrica.

- El consumo de abrasivo es un parámetro sujeto a variaciones para cambiar las capacidades del corte, tal como se analizó anteriormente. Consumo de abrasivo Granate: $0,0034\text{Kg/s} = 12,24\text{kg/h}$. El abrasivo tipo Granate importado de buena calidad tiene un valor aproximado de: $0,6\text{US\$/kg}$. En Chile se puede adquirir, pero no de muy buena calidad a $0,4\text{US\$/kg}$ sin molienda ni cernido. Otra alternativa de abrasivo, es el óxido de aluminio, que se puede adquirir desde Brasil y tiene un precio de $0,7\text{US\$/kg}$ y un 40% más si es desde USA o Europa, pero su calidad no es buena ni tampoco sus aplicaciones.

Costo utilizando Granate importado: $0,6\text{US\$/kg} \times 12,24\text{kg/h} = \mathbf{7.34\text{US\$/h} = 5.141\$/h}$ (US\$ = \$700).

- El consumo eléctrico de una máquina con bomba de 11hp, es aproximadamente de: 9kwh. La tarifa local es de 66 \$/kwh.

$$\text{Costo: } 9\text{kwh} \times 66 \text{ \$/kwh} = \mathbf{594\$/h}$$

- El consumo de agua en el caso de la sección 2 era: $2,365 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s} = 8.513 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}$ o $0.08513 \text{ m}^3/\text{h}$, y la tarifa local es de 240\$/m³.

$$\text{Costo: } 0.08513 \text{ m}^3 / \text{h} \times 240\$/\text{m}^3 = \mathbf{20,5\$/h}$$

Costo de aproximado de operación: 6.071\$/h

Debido a que en este sistema, en la mayoría de los casos, el material cortado no necesita de trabajos de terminación, por lo que no se considerarán costos relacionados a esto para obtener el costo de corte final.

La velocidad de corte aproximada, según el software de la página 39 (figura 8) para los parámetros asumidos en el caso estudiado en la sección 2 (137Mpa, diámetro tobera 0,254mm y tubo colector 0,762mm, 0,0034Kg/s de abrasivo, $2,365 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ de agua y plancha $e=3\text{mm}$ acero inoxidable):

- Velocidad aproximada de corte lineal es: 71mm/s (4,25m/h) (corte de alta calidad) hasta 188mm/s (11,26m/h) (corte de baja calidad).

Considerando un valor intermedio de 7,5m/h, el costo de corte final:

$$\text{Costo de corte por metro lineal terminado es: } 6.071\$/\text{h} / 7,5\text{m/h} = \mathbf{809\$/m}$$

3.3.1.- Comparación con el “Plasma”:

Si comparamos estos valores con el del “Corte por Plasma” de una máquina de similares capacidades (anexo 3), surgen claras diferencias:

La oferta de estas máquinas es obviamente mucho mayor a las de “Chorro de Agua-Abrasivo” y los valores de estas del tipo automatizadas varían aproximadamente entre (según PROINGAS S.A, importadora de máquinas de corte en Santiago): desde los \$US 50.000 para una máquina pequeña con capacidad para cortar hasta espesores de 25mm y con mesas de corte de 2m x 4m, armada en Argentina; hasta los US\$ 130.000 con el doble de capacidad de corte, hasta 50mm de espesor y con mesa de trabajo de 3m x 12m.

- Producto del desgaste debe remplazarse la tobera y el electrodo, los que tienen una duración aproximada a las 8 horas (dependiendo de la cantidad de arranques). El electrodo cuesta aproximadamente: \$ 2.360 (c/iva) y la tobera o boquilla \$ 1.600 (c/iva), (Valores que pueden elevarse hasta 3 veces más dependiendo del tipo electrodo o tobera y del tipo de máquina).

$$\text{Costo: } \$1.600/8h + \$ 2.360/8h = \mathbf{495\$/h}$$

- La trocha o protección cerámica que debe reemplazarse cada 1000 horas y tiene un valor aproximado de: \$ 15.800 (c/iva).

$$\text{Costo: } \$ 15.800/1.000h = \mathbf{15,7\$/h}$$

- Consumo corriente eléctrica aproximado: 30kwh

$$\text{Costo: } 66\$/kwh \times 30kwh/h = \mathbf{1.980\$/h}$$

Costo aproximado de operación: 2.500\$/h

Podrían sumarse además la inclusión de gases o mezcla de gases para la formación del plasma, como por ejemplo: hidrógeno, argón u oxígeno. Sin embargo, las últimas tecnologías de este corte permiten utilizar aire comprimido como gas de plasma, lo cual es mucho más económico y de fácil acceso que el utilizar los gases antes mencionados. Por lo que no se serán incluidos en los costos a continuación.

Debido a que en el corte por plasma se produce una gran cantidad de escoria, imperfecciones, etc., se debe utilizar un proceso posterior para eliminarlos, lo que implica un “costo extra”:

- Remoción de escoria, tiempo aproximado: 0,16h/m (10min/m).
- Pulido de marcas o manchas, tiempo aproximado: 0,16h/m (10min/m).
- Total tiempo aproximado empleado: 0,32h/m (20min/m).

El costo aproximado de la mano de obra es: 1.500\$/hora hombre. Multiplicando por el tiempo total que se emplearía en realizarlo, el “costo extra” llegaría a: $1500\$/h \times 0,32h/m = 480\$/m$.

La velocidad de corte aproximada promedio de estos equipos es de: 100m/h, por lo que el costo por metro:

Costo de corte por metro lineal terminado es: $2.500\$/h / 100m/h + 480\$/m = 505\$/m$

Resumiendo:

Tabla 15 Resumen costos ambos métodos

Método	Corte “Chorro de Agua-Abrasivo”	Corte “Plasma”
Valor aproximado equipo nuevo equivalente	US\$ 90.000 \$ 63.000.000 (US\$= \$700; Julio 2003)	US\$ 50.000 \$ 35.000.000 (US\$= \$700; Julio 2003)
Costos de operación de la máquina	6.071\$/h	2.500\$/h
Costo corte por metro “terminado”	809\$/m	505\$/m
Velocidad de corte	7,5m/h	100m/h

Suponiendo, que se obtienen ingresos producto del corte utilizando una máquina de corte por “Chorro de Agua-Abrasivo” acorde a los requerimientos y parámetros fijados en las secciones anteriores e igualmente para el “Corte por Plasma”, pueden aplicarse criterios económicos para comparar ambos métodos en un período de tiempo desde el punto de vista de los costos, como por ejemplo el VAN. El VAN (valor actual neto) se define como el valor presente de una inversión a partir de una tasa de descuento o tasa costo-capital, una inversión inicial y una serie de flujos futuros. La idea del VAN es actualizar todos los flujos futuros al período inicial (cero), compararlos para verificar si los beneficios son mayores que los costos. Si este valor es mayor a cero significa que la rentabilidad es mayor que la tasa costo capital y por lo tanto se dice que “conviene invertir”.

Suponiendo, que se aplica una tarifa de corte terminado de: 5.000 \$/m para ambos métodos y que se tiene una necesidad de corte terminado diaria promedio de 20m, sin incluir los fines de semana, en ambos casos se tienen ingresos por:

- Ingresos “Corte Chorro de Agua-Abrasivo” y “Corte por Plasma”:
 - Mensuales =\$2.000.000
 - Anuales = \$24.000.000

Según la tabla de vida útil de bienes físicos del activo fijo o inmovilizado del SII, la vida útil o depreciación normal de maquinaria en general para la industria manufacturera era de 20 años, la que fue actualizada recientemente mediante una resolución y se redujo a 15 años. Por lo que si se aplica una depreciación lineal normal en ambos casos esta sería:

- Valor residual máquina “Chorro de Agua-Abrasivo” = \$ 4.200.000
 - Depreciación normal anual = \$ 3.920.000

- Valor residual máquina de “Plasma” = \$ 2.333.333
 - Depreciación normal anual = \$ 2.177.777

Asumiendo una tasa costo-capital o tasa de corte i de un 5,5%, calculada en base a un factor de riesgo normal igual a 1, según estimaciones por sectores industriales [5] y con una rentabilidad de mercado de 5,5% anual, tomada en relación a una renta fija en fondos mutuos a largo plazo en dólares (ref. Banco Santander Santiago). Y aplicando la convención generalmente usada para proyectos con objetivos de permanencia en el tiempo de 10 años de proyección de flujos [5], con una inversión inicial igual al valor de un equipo nuevo (tabla 15) y con un impuesto a las utilidades del 16%, se pueden obtener primero que nada, los flujos correspondientes a cada período y luego utilizando la planilla de cálculo Excel el VAN.

En la utilización de la planilla Excel puede seleccionarse, en insertar funciones, la función VNA, a la cual debe ingresarse la tasa costo-capital y los flujos correspondientes a partir del período 1 en adelante, para luego sumarle la inversión inicial registrada con signo negativo del período 0 y de esta manera obtener el VAN.

En la página siguiente se muestran los flujos correspondientes a ambos métodos para los períodos señalados y su valor actual neto “VAN” respectivamente:

Tabla 16 Flujos Corte Chorro de Agua-Abrasivo

Período	0	1 - 2	3 - 4	5 - 6	7 - 8	9 - 10
Ingresos Anuales	0	24.000.000	24.000.000	24.000.000	24.000.000	24.000.000
Costos de producción	0	-3.883.200	-3.883.200	-3.883.200	- 3.883.200	-3.883.200
Depreciación del ejercicio	0	-3.920.000	-3.920.000	-3.920.000	-3.920.000	-3.920.000
Utilidad antes de impuesto	0	16.196.800	16.196.800	16.196.800	16.196.800	16.196.800
Impuesto (16%)	0	-2.591.488	-2.591.488	-2.591.488	-2.591.488	-2.591.488
Utilidad neta	0	13.605.312	13.605.312	13.605.312	13.605.312	13.605.312
Depreciación	0	3.920.000	3.920.000	3.920.000	3.920.000	3.920.000
Inversión inicial	-63.000.000	0	0	0	0	0
Flujo de caja	-63.000.000	17.525.312	17.525.312	17.525.312	17.525.312	17.525.312
VAN (i=5,5%)	69.099.244					

Tabla 17 Flujos Corte por plasma

Período	0	1 - 2	3 - 4	5 - 6	7 - 8	9 - 10
Ingresos Anuales	0	24.000.000	24.000.000	24.000.000	24.000.000	24.000.000
Costos de producción	0	-2.424.000	-2.424.000	-2.424.000	-2.424.000	-2.424.000
Depreciación del ejercicio	0	-2.177.777	-2.177.777	-2.177.777	-2.177.777	-2.177.777
Utilidad antes de impuesto	0	19.398.223	19.398.223	19.398.223	19.398.223	19.398.223
Impuesto (16%)	0	-3.103.716	-3.103.716	-3.103.716	-3.103.716	-3.103.716
Utilidad neta	0	16.294.507	16.294.507	16.294.507	16.294.507	16.294.507
Depreciación	0	2.177.777	2.177.777	2.177.777	2.177.777	2.177.777
Inversión inicial	-35.000.000	0	0	0	0	0
Flujo de caja	-35.000.000	18.472.284	18.472.284	18.472.284	18.472.284	18.472.284
VAN (i=5,5%)	104.237.167					

Como se puede ver en la Tabla 16 y 17, el VAN es mayor a cero en ambos casos, lo que indica que existe rentabilidad y que es superior a la tasa costo capital, pero se ve claramente que existen diferencias, ya que el corte “Corte por Plasma” presenta un VAN significativamente mayor al del “Chorro de Agua-Abrasivo”, por lo que rentaría más por sobre lo que se está exigiendo a la inversión, en el plazo establecido. Esto principalmente debido al alto costo de operación del corte “Chorro de Agua-Abrasivo”, por el elevado costo del abrasivo, el cual eso si, está sujeto a las variaciones del dólar.

Claro está que los resultados anteriores fueron obtenidos en base a supuestos de igualdad de condiciones y pueden sufrir claras variaciones, como por ejemplo, si se comparara ambos equipos dentro de una línea de producción de un determinado producto, claramente el de corte por “Chorro de Agua-Abrasivo” estaría en desventaja por su baja velocidad, lo que se traduciría en una demora en el tiempo de producción, disminuyendo así los volúmenes de productos finales. Como también el plasma estaría en desventaja en casos de espesores mayores y tipos de materiales distintos.

3.4.- Posibilidades de adaptar un equipo:

Otra posibilidad que podría analizarse es la de adaptar un equipo de hidrolavado de alta presión, como un cortador agua-abrasivo. Para lo cual sería necesario adquirir o fabricar los elementos complementarios. Como el sistema de alimentación de abrasivo, inyector completo agua-abrasivo y una mesa de trabajo con un sistema CNC o similar, en el caso que se decidiera por cortar en forma automatizada, o bien modificar la pistola manual que poseen este tipo de equipos de lavado.

Un equipo ideal para modificar sería uno similar al que se utiliza en algunas aplicaciones de lavado en industrias petroquímicas, refinerías, industrias aeronáuticas y en astilleros donde se complementa o reemplaza al arenado. Justamente en esta última aplicación donde en Valdivia Astilleros ASENAV S.A, posee una de estas máquinas, figuras 55; 56.

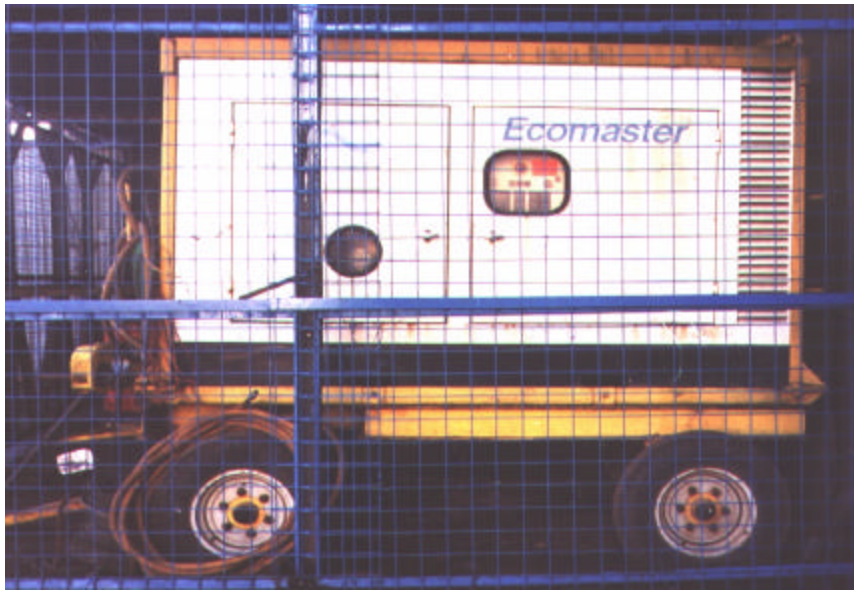


Fig. 55 Máquina de hidrolavado.

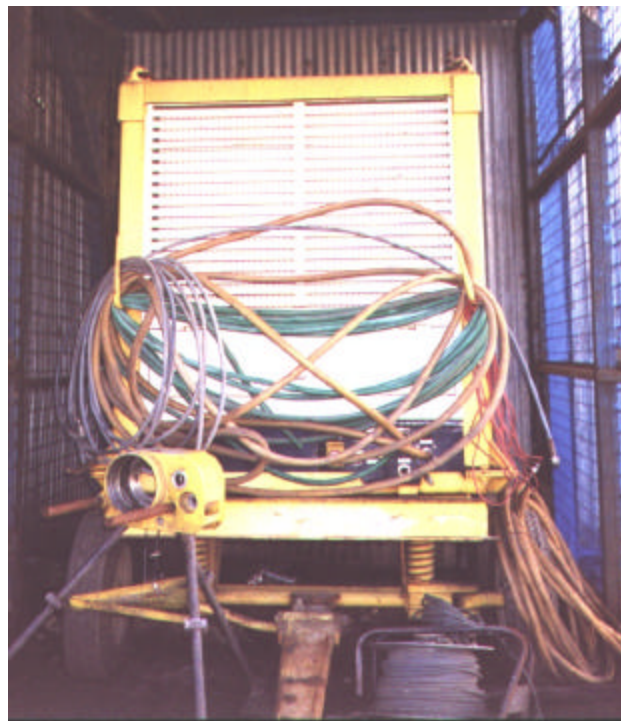


Fig.56 Máquina de hidrolavado.

Este equipo modelo “Ecomaster Typ 150 Z-2.000” (anexo 4), utiliza un motor diesel para mover una bomba de émbolos triple, la que se conecta directamente a la red de agua y puede llegar a generar por sobre los 2.000Bar (unos 30.000psi), figura 57. Para controlar este chorro de gran potencia, posee un pistola especial que permite apoyarla sobre el hombro para tener un mejor y mayor control. Además deben usarse protecciones, para evitar accidentes. Fue adquirido hace aproximadamente 5 años a la empresa alemana WOMA, para utilizarlo en operaciones de limpieza de cascos de embarcaciones mayores. Actualmente se encuentra en desuso a la espera de solucionar un desperfecto, que dada la falta de personal especializado no se ha logrado solucionar.

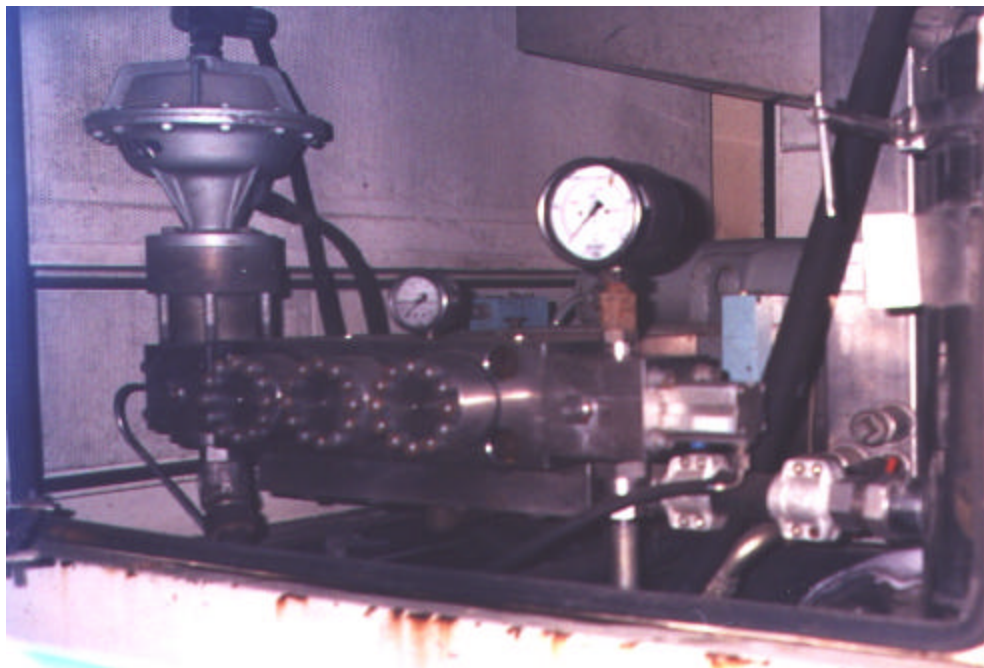


Fig.57 Bomba de émbolos triple de hidrolavadora Typ 150 Z-2.000

Claramente un equipo de estas características podría modificarse y lograr cortar con él, ya que logra generar sin problemas altas presiones. Sería interesante que en una eventualidad de que se tuviera acceso a un equipo como éste por motivos como: fuese dado de baja o se deseché, y que tuviese su bomba generadora de presión intacta, poder extraer la bomba y adaptarle un motor eléctrico. Y adquirir o fabricar los demás elementos que componen una máquina cortadora. Esto puede ser una alternativa económica pensando en que podría considerarse como un proyecto para alumnos de algún instituto o centro de investigación de una Universidad Nacional, que pudiese construir un banco de pruebas para estudiar e investigar esta tecnología, o bien ser considerado como proyecto externo.

CONCLUSIONES FINALES

- Al finalizar se puede afirmar, que se logró analizar y presentar en profundidad el método de corte “Chorro de Agua-Abrasivo”, conformando un interesante compendio de esta materia. Además, se aclaró que este es un método actualmente utilizado a nivel mundial y que posee una gran cantidad de aplicaciones en los más diversos campos.
- El corte mediante “Chorro de Agua-Abrasivo” es un método, que en Chile y principalmente en la zona sur del país, puede funcionar perfectamente ya que emplea un recurso natural que existe en abundancia en esta zona, como es el agua. Además el abrasivo, que tiene un precio elevado al ser importado desde el exterior, podría ser menor si se lograra producirlo en el país.
- La presión de agua si bien es un parámetro importantísimo dentro del corte, no es el único que debe ser controlado. La cantidad de abrasivo que se agrega a la mezcla, los diámetros de tubo colector y tobera, y la cantidad de agua; afectan directamente el corte, desde el punto de vista económico, en la calidad y velocidad de éste.
- Si bien la principal desventaja de este método es la baja velocidad de avance en el corte, comparado con el corte “Plasma”, ésta se ve compensada con la posibilidad de cortar materiales de mayores espesores y porque los equipos de última generación están logrando cortar cada vez a mayor velocidad.
- Las máquinas que poseen bombas de impulsión directa, son más ventajosas en términos de complejidad y de condiciones de operación, que las que poseen intensificadores de presión, en presiones no muy elevadas. Como también son más convenientes las que poseen

recipiente de abrasivo pequeño y cercano al inyector, y que operan bajo el principio convencional de arrastre de partículas.

- La inversión inicial que se debe realizar en esta tecnología, será alta comparado con lo demás métodos. Pero a largo plazo esto se ve recompensado con las buenas utilidades, producto del conveniente costo de los insumos y de que no es necesario trabajos de terminación de las piezas cortadas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Guzmán H., tesis Ing. Naval **“El Corte por Plasma”**; UACH 1995.
- [2] Küpfer, **Catálogo División Aceros**, 2000.
- [3] Momber A. and Kovacevic R., **“Principles of Water Jet Machining”**, Springer-Verlag Berlin 1998.
- [4] Rossi M., **“Estampado en Frío de la Chapa”**, 8ª edición, Dossat S.A. Madrid, 1971.
- [5] Sapag Ch., Sapag R. **“Preparación y Evaluación de Proyectos”**, 4ª edición, Mc Graw Hill, 2000.
- [6] Streeter V., **“Mecánica de Fluidos”**, 9ª edición, Mc Graw Hill, 2000.
- [7] Sernageomin, **“Oportunidades de Yacimientos no Metálicos en Chile”**, 1995.

PUBLICACIONES Y REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- [8] www.amcjets.com : Supplier of Waterjets & Spare Parts, UK.
- [9] www.elprisma.com : Directorio temático Universitario.
- [10] www.flow.com-www.flowlatino.com : Flow International Corporation, USA.
- [10.1] Hector Pilot, Sales Representative Argentina-Chile Branch.
- [11] www.goodfellow.com/csp/active/gfwelcome.csp : Información Técnica de materiales.

- [12] www.jetedge.com : Ultra High Pressure Waterjet Systems, USA.
- [13] www.ingersoll-rand.de/IngersSpan-www.irwj.com : Waterjet Systems, USA.
 [13.1] José Muñoz, Director of Advanced Development Center.
- [14] www.engr.smu.edu/rcam/research/waterjet : Centro de Investigación de manufactura avanzada, Southern Methodist University, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Richardson-Texas, USA.
- [15] www.mfg.mtu.edu/cyberman/machining : John W. Sutherland, Ph.D. CYBERMAN Education Page, Professor of Mechanical Engineering, Michigan Technological University, USA.
- [16] www.omax.com : Precision Waterjet System, USA.
- [17] www.richel.com : Waterjet Consultants & Accessories New/Used, Waterjets, USA.
- [18] www.sernageomin.cl : Rodrigo Carrasco O. Geólogo, Departamento de Geología Económica, Subdirección Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería, Providencia, Santiago.
- [19] www.waterjets.org : Carl Olsen, Waterjet Web Reference, USA
- [20] www.wjta.org/Conference%20Proceedings.htm : Waterjet Technology Association, USA.
- [21] www.waterjet.se : Water jet Sweden AB-Technology, Ronneby, Suecia.
- [22] www.woma.de : Water as a tool for a clean environment, Alemania.
- [23] www.wardjet.com : Waterjet Abrasive Recycling; USA. Artículo: R. Ciccu y A. Serici; Departamento de Geingeniería y Tecnología Ambiental Universidad de Estudios de Cagliari (Italia).
- [24] www2.ing.puc.cl/icmcursos/metalurgia/apuntes/cap6; Apuntes PUC - Chile.

ANEXOS

ANEXO 1: Tabla de Equivalencias nº de Malla de Abrasivos:

Tyler Standard Screen Scale			
Mesh (malla)	Micrones (μ)	Milímetro (mm)	Pulgadas (inch)
400	33	0.033	0.0012992
325	43	0.043	0.0016929
270	53	0.053	0.0020866
250	61	0.061	0.0024016
200	74	0.074	0.0029134
170	88	0.088	0.0034646
150	104	0.104	0.0040945
115	121	0.121	0.0047638
100	147	0.147	0.0057874
80	173	0.173	0.0068110
65	208	0.208	0.0081890
60	246	0.246	0.0096850
48	295	0.295	0.0116142
42	351	0.351	0.0138189
35	417	0.417	0.0164173
32	495	0.495	0.0194882
28	589	0.589	0.0231890
24	701	0.701	0.0275984
20	833	0.833	0.0327953
16	991	0.991	0.0390160
14	1168	1.168	0.0459843
12	1397	1.397	0.0550000
10	1651	1.651	0.0650000
9	1981	1.981	0.0779921
8	2362	2.362	0.0929921
7	2794	2.794	0.1100000
6	3327	3.327	0.1309843
5	3962	3.962	0.1559843
4	4699	4.699	0.1838543
3.5	5613	5.613	0.2209843
3	6680	6.680	0.2629921
2.5	7925	7.925	0.3120079

ANEXO 2: Máquina Corte “Chorro de Agua-Abrasivo”:*Corte - Bengal*

La máquina BENGAL es muy compacta, siendo ideal para pequeños espacios. Es una herramienta que trabaja en ejes X-Y, es ideal para el desenvolvimiento de prototipos y bajos volúmenes de producción. Solo es necesario hacer las ligaciones eléctricas, de agua y de aire y salir cortando piezas, con una relación costo/beneficio muy positiva.



Especificaciones:

Mesa de corte padrón:	40 x 20 pulgadas (1,0 x 0,5 metros) 48 x 48 pulgadas (1,2 x 1,2 metros)
Precisión:	+/- 0,005 pulgadas (0,127mm)
Repetibilidad:	+/- 0,003 pulgadas (0,076mm)
Faja de Velocidad:	de 0 a 300 ipm (0 a 7,620mm)
Contról del Sistema:	<u>FlowMaster ®</u>
Ajuste del eje Z:	4 pulgadas (101mm) ou 8 pulgadas - motorizado (203mm)
Presión de corte:	40.000psi (2.720Bar) ou 50.000psi (3.400Bar)
Cabeza de Corte:	PASER 3
Tamaño de las bombas:	11, 25, 30 ou 50 hp
Sistema operacional Servo:	Totalmente digital

Otras características:

✓	Válvula automática de alívio de presión ultra elevada
✓	Botón de parada de emergencia
✓	Sensores de cerramiento automático para monitorear la baja presión del agua de la entrada, alta temperatura del motor o de la bomba y baja presión del aceite de la bomba o del motor

Corte - FlowMaster®

Independientemente de la complejidad de las piezas a ser cortadas, el **FlowMaster®** es muy fácil y rápido de operar. El **FlowMaster®** es compatible con el sistema PC y controla las operaciones de corte con chorro de agua a ultra alta presión, el corte abrasivo con el PASER 3 y la mesa de corte en ejes X-Y.

Características do FlowMaster®:

- ✓ Configura y optimiza los parámetros de la aceleración, velocidad y perforación automáticamente
- ✓ Es de fácil utilización para cualquier nivel de operador
- ✓ Elimina el tiempo de "setup" de cada tarea, economizando mucho tiempo
- ✓ No es necesario ningún conocimiento de CNC el corte con abrasivo
- ✓ Solo es necesario especificar el material, espesura y calidad de los cortes deseados, que el software configura en la máquina
- ✓ La producción es optimizada, sin desperdicio de materiales, con aumento directo de la rentabilidad

Hacen parte del **FlowMaster®**: FlowPath y FlowCut. Por otra parte tiene los siguientes módulos opcionales que aumentaran la versatilidad de sus trabajos, además de garantizar mayor retorno sobre el capital invertido.

- ✓ **FlowNEST** (maximiza la utilización del material por medio del módulo y completo geométrico de agrupar);
- ✓ **FlowCODE** (convierte los archivos existentes del utilizador para el uso en el **FlowMaster®**);
- ✓ **FlowSHIFT** (convierte los cuadros escaneados por una mayor libertad artística en un período reducido de la programación);

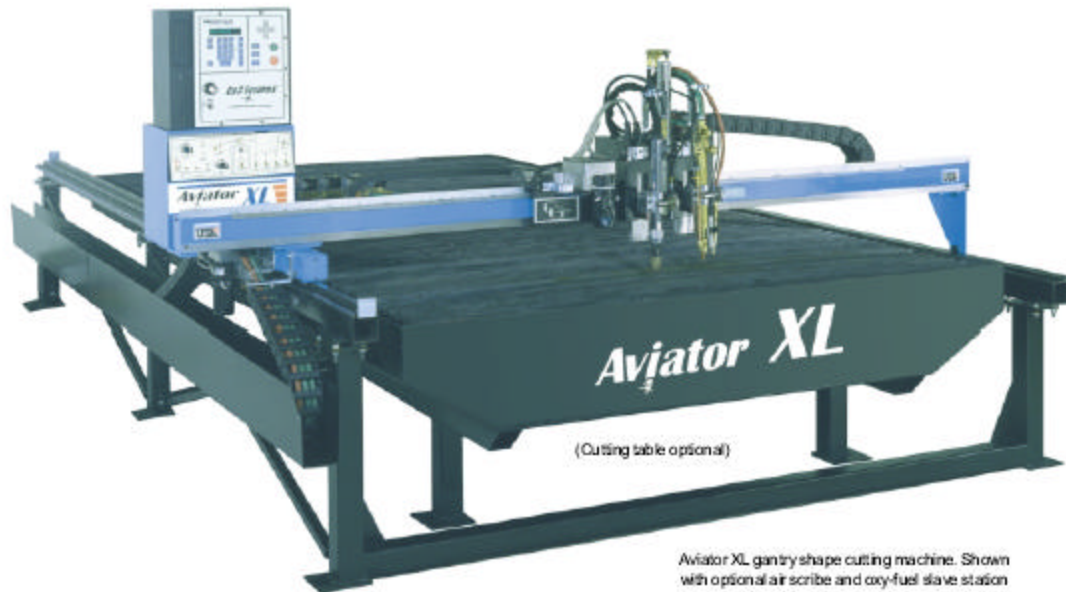
La última novedad es lo sistema MODEM, que por una cadena telefónica simple, puede ser acceso tenido la máquina para solucionar cualquier problema.



ANEXO 3: Máquina “Corte por Plasma”:



CNC gantry cutting machine



(Cutting table optional)

Aviator XL gantry shape cutting machine. Shown with optional air scribe and oxy-fuel slave station

Best Value

The **Aviator[®] XL** from C&G Systems is the perfect profile cutting solution for job shops and manufacturers. **Aviator XL** has the features you need at an affordable price - CNC control, plasma cutting system, plasma auto height control, high speed drives and even CAD/CAM software.

Full sized plates

The Aviator XL handles plates up to 72" x 144". The "Easy Load" rail system permits three-sided plate loading because the outboard rail is dropped 6" below the cutting surface. Drawings are available if you plan to build your cutting table, or we will build one for you.

Multi-process

Base machine systems have been pre-configured with plasma systems from 60 amp to 150 amps. Thin gage sheet metal to 3/4" plate (19mm), **Aviator XL** can handle your plasma cutting jobs. For heavy duty cutting of steel, you may add one or two motorized oxy-fuel stations. A pneumatic air scribe may also be added for engraving bend lines or part numbers on the plate.

Plasma productivity

Aviator XL delivers productivity. The **Burny[™] 1250** microprocessor CNC control provides precision motion control for both high speed plasma and oxy-fuel cutting. Arc-off time between parts is extremely short because rapid traverse speed is always 500 IPM (12.7M/min). C&G's **AVC Plus** plasma torch height control system rapidly sets pierce height and maintains precise torch to plate distance while cutting - no matter what the travel speed.

CAD/CAM software included

C&G Systems includes **FastCAM[®]** CAD/CAM nesting software with every CNC controlled machine so you are ready to create and process CNC files for the Burny 1250 control.

Aviator XL delivers

Gage metal to heavy plate, **Aviator XL** delivers full-featured CNC productivity at an affordable price. **Aviator XL** is the best value in the industry. Call us today at (800) 411 - 0614 for more information or a quotation.

*Your best Value in Precision
Shape Cutting Systems*

C&G SYSTEMS[™]
A THUNDERBOLT Company

ANEXO 4: Máquina hidrolavado:**Offshore-Ecomaster**

WOMA's Offshore-Ecomaster is becoming a standard on oil and gas extraction platforms. Dozens of systems are operating on drilling rigs and offshore construction world wide.

Typical applications include: surface preparation, decoating, rust removal, pipe and tank cleaning ...

The system is suited for the use on oil and gas exploitation platforms. The Offshore-Ecomaster meets the high safety regulations of the NORISK Standard 2-015.

The system can be delivered in two versions. It can be equipped with a safety frame according DNV 271, AISI on request. All water tools are pneumatically driven.



	Typ 150 Z-2000	Typ 180 M-2500
Power rating:	28 / 34 kW	35 / 42 kW
Drive speed:	1000 / 1200 min ⁻¹	1000 / 1200 min ⁻¹
Drive frequency:	50/60 Hz	50/60 Hz
Operating pressure:	max. 2000Bar	max. 2500Bar
Volumetric flow rate:	8 / 9,5 l/min	7,9 / 9,5 l/min
Ex-class:	EExe de CT 4	EExe de CT 4