

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



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA  
SEMIAUTOMÁTICO DE GRANALLADO PARA USO  
DIDÁCTICO**

PRESENTADO POR:

**WILLIAM ALEXANDER BELLOSO BARRIENTOS**

**IMMER ABIMAEEL FLAMENCO MARTÍNEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2014

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR :**

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

**SECRETARIA GENERAL :**

**DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DIRECTOR :**

**ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ**

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título :

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA  
SEMIAUTOMÁTICO DE GRANALLADO PARA USO  
DIDÁCTICO**

Presentado por :

**WILLIAM ALEXANDER BELLOSO BARRIENTOS**

**IMMER ABIMAEFLAMENCO MARTÍNEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

San Salvador, febrero de 2014

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

## **DEDICATORIA**

Este Trabajo de Graduación se lo dedico a mi Dios quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder la paz y tranquilidad.

Para mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles, y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome para poderme realizar. A mi hijo quien ha sido y es mi motivación, inspiración y felicidad. A la madre de mi hijo por regalarme ese valioso regalo que es mi motivación para seguir adelante.

A mi compañero de tesis por el arduo trabajo y por la paciencia en este duro camino hacia el éxito, a mis compañeros Armando, Samuel y Evelin por todos los grandiosos momentos que compartimos y que hicieron de la universidad un grandioso lugar.

*WILLIAM ALEXANDER BELLOSO*

## **DEDICATORIA**

Al momento de culminar una carrera universitaria te encuentras con un sinfín de sentimientos yo los defino como alegría, alegría de dar un paso hacia adelante en mi formación tanto profesional como personal, alegría de haber cumplido una de muchas metas, alegría de haberle cumplido a todas las personas que me han brindado su apoyo por eso quiero dedicar este triunfo a:

Dios todopoderoso por haberme guiado por el camino correcto, por haberme dado la oportunidad de llegar a este momento, por darle fuerzas a todas las personas que me apoyaron y por cuidarme cada día.

A mis 3 familias, familia Flamenco por haberme dado la oportunidad de venir al mundo, familia Pérez por haberme educado y enseñado a luchar por lograr nuestros sueños, familia Martínez por haberme enseñado a vivir en familia y compartir mis alegrías y tristezas.

A mis amigos y amigas por siempre estar en las buenas y en las malas, por darme ánimos en los momentos difíciles, por compartir los momentos felices, por enseñarme que el valor de la amistad es invaluable.

A mis compañeros y profesores por haber formado parte de mi proceso de aprendizaje, por sus regaños que a la larga sólo se convirtieron en enseñanzas, a nuestras noches de estudio que han servido para que este día llegue.

A todos infinitas gracias y que Dios los bendiga siempre.

*IMMER ABIMAEEL FLAMENCO*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a todos los que nos han apoyado en este largo camino, el cual inició hace muchos años, a nuestros profesores de educación básica y media que nos ayudaron a dar nuestros primeros pasos, a nuestros catedráticos por compartirnos un poco de su conocimiento, a cada amigo que colaboro de una u otra manera y en la recta final a nuestro asesor de Trabajo de Graduación por el apoyo y guía en la realización de este trabajo de graduación, muchas gracias.

*Alexander Belloso & Immer Flamenco*

## ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. ANTECEDENTES .....	2
1.1. Generalidades del granallado .....	3
1.2. Control del procedimiento.....	6
1.2.1. Control de la granalla .....	7
1.2.2. Control de intensidad .....	13
1.2.3. Control de cobertura .....	16
1.3. Tipos de máquinas para granallado.....	18
1.3.1. Máquina centrífuga de granallado.....	18
1.3.2. Máquinas neumáticas de granallado.....	19
1.3.3. Clasificación y tipos de boquillas para granallado con aire comprimido.....	22
1.4. Esfuerzos residuales producidos por el granallado.....	27
1.4.1. Superposición de esfuerzos de servicio y residuales .....	28
1.4.2. Profundidad de la capa con esfuerzos residuales de compresión .....	30
2. DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE UN EQUIPO DE GRANALLADO PARA USO DIDÁCTICO .....	31
2.1. Pistola de disparo .....	31
2.2. Diseño de la cámara de disparo.....	45
2.3. Diseño de la tolva recolectora.....	49
2.4. diseño del sistema electroneumático.....	51
3. CONSTRUCCIÓN DE MÁQUINA GRANALLADORA.....	55
3.1. Construcción del sistema semiautomático de granallado .....	55
3.1.1. Construcción y montaje de carcasa.....	55
3.1.2. Construcción y montaje de pistola .....	57
3.1.3. Montaje de sistema electroneumático .....	60
4. PUESTA A PUNTO DE LA MÁQUINA GRANALLADORA .....	64
4.1. Granallados a tres distancias de disparo .....	66
4.2. Granallados a tres ángulo de incidencia de granallado.....	69
4.3. Granallados a tres presiones de inyección .....	71

4.4. Análisis de resultados .....	73
5. GUÍA DE LABORATORIO: PROCESO DE GRANALLADO .....	75
6. GUÍA DE MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA DE GRANALLADO .....	80
CONCLUSIONES .....	84
RECOMENDACIONES.....	85
BIBLIOGRAFÍA .....	86
GLOSARIO .....	88
ANEXOS .....	90

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Consumo de aire por tamaño de granalla	33
Tabla 2.2. Relaciones isentrópicas unidimensionales	36
Tabla 4.1. Deflexiones promedios en mm a tres distancias de granallado	68
Tabla 4.2. Deflexiones promedios en mm a tres ángulos de incidencia	70
Tabla 4.3. Deflexiones promedios en mm a tres presiones de inyección	73
Tabla 5.1. Registro de los parámetros del granallado	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Principio del proceso de granallado	3
Fig. 1.2. Deformación plástica en el punto de impacto	4
Fig. 1.3. La compresión se opone a la fisuración	4
Fig. 1.4. Iniciación de grieta y propagación bajo esfuerzos de Tracción	5
Fig. 1.5. Formas de las granallas	7
Fig. 1.6. Daño de superficies creado por granallas rotas	8
Fig. 1.7. Estado típico de una superficie granalla de buena calidad	8
Fig. 1.8. Granallas: (a) de buena calidad y (b) de forma inaceptable	9
Fig. 1.9. Flecha generada en una placa Almen	14
Fig. 1.10. Utillaje soporte probeta Almen	15
Fig. 1.11. Curva de saturación	16
Fig. 1.12. Superficies granalladas	17
Fig. 1.13. Rueda de granallado centrífugo	19
Fig. 1.14. Cabina de granallado manual de tipo sifón	20
Fig. 1.15. Unidad de granallado por presión directa	21
Fig. 1.16. Tipos de boquillas para granallado	24
Fig. 1.17.. Perfil típico de esfuerzos residuales de granallado	27
Fig. 1.18. Superposición de los esfuerzos residuales	29
Fig. 1.19. Profundidad de la compresión	30
Fig. 2.1. Perfil de boquilla	32
Fig. 2.2. Tobera divergente-convergente	34
Fig. 2.3. Dimensiones de boquilla	42
Fig. 2.4. Dimensiones del cuerpo	44
Fig. 2.5. Diagrama de distancias entre pistola y probeta de prueba	46
Fig. 2.6. Diagrama de distancias del sistema cilindro pistola	47
Fig. 2.7. Vista de perfil de la cámara de granallado	48
Fig. 2.8. Forma de la tolva recolectora	49
Fig. 2.9. Vista de perfil de la tolva recolectora	50
Fig. 2.10. Altura de la tolva recolectora	51
Fig. 2.11. Diagrama electro neumático	53
Fig. 3.1. Corte en la cámara de disparo	56
Fig. 3.2. Montaje de la estructura soporte	57
Fig. 3.3. Proceso de maquinado de boquilla	58
Fig. 3.4. Piezas de la pistola, listas para ser acopladas	58
Fig. 3.5. Montaje del riel base de pistola	59
Fig. 3.6. Montaje final de pistola	60
Fig. 3.7. Montaje de sistema eléctrico	61
Fig. 3.8. Montaje de sistema neumático	62
Fig. 3.9. Sistema electroneumático de granallado	63
Fig. 4.1. Sistema semiautomático de granallado	65
Fig. 4.2. Procedimiento de medición con el tornillo micrométrico	66
Fig. 4.3. Variación de la distancia de granallado	68
Fig. 4.4. Gráfico distancia de granallado vs deflexión promedio obtenida	68
Fig. 4.5. Cuña de variación de ángulo de incidencia	70

Fig. 4.6. Gráfico ángulo de incidencia vs deflexión promedio obtenida	71
Fig. 4.7. Regulador de presión	72
Fig. 4.8. Gráfico presión de trabajo vs deflexión promedio obtenida	73
Fig. 5.1. Procedimiento de medición con el tornillo micrométrico	79
Fig. 5.2. Sistema semiautomático de granallado	81
Fig. 6.1. Check list sistema semiautomático de granallado	83
Fig. 6.2. Elementos a verificar cada 90 horas de trabajo	85

## **RESUMEN**

En este trabajo de graduación se describe el proceso de diseño y construcción de un sistema semiautomático de granallado para uso didáctico. Se inicia con una recopilación bibliográfica sobre granallado, las variables que intervienen en el proceso, el efecto del granallado sobre los materiales metálicos, así como la norma que rige la medición de la deflexión por el efecto del granallado en láminas metálicas.

Subsecuentemente, se diseñó y construyó la máquina semiautomática de granallado en forma óptima, cumpliendo con los requisitos mediante el manejo de 3 variables independientes para este proceso. Además, se tomaron o consideración todas las variables del proceso para que el equipo sea funcional.

Por último, se describen los ensayos realizados al sistema para garantizar su funcionalidad y seleccionar las diferentes variables en las cuales puede funcionar óptimamente. Finalmente, se presentan las guías de mantenimiento y operación con el fin de que la máquina pueda preservarse adecuadamente y operar eficientemente.

## INTRODUCCIÓN

El granallado en general es una técnica de tratamiento superficial por impacto, el cual ofrece diversos resultados favorables como lo son: limpieza de impurezas en la superficie de las piezas, correcta terminación de superficies para posteriores aplicación de recubrimientos o endurecimiento por deformación conocido como Shot peening; este último es el proceso de interés, en este trabajo.

El Shot peening es un proceso de trabajo en frío, el cual consiste en impactar la superficie del material con muchas esferas pequeñas llamadas “shot” a altas velocidades. El resultado de este proceso, es la deformación plástica de los granos superficiales dentro de un margen de 50 a 250  $\mu\text{m}$ , incrementando así la vida a la fatiga de las piezas mecánicas. Como resultado de la compresión de la estructura cristalina del metal. Así, se pueden obtener esfuerzos de compresión paralelos a la superficie, creando una superficie uniforme de esfuerzos residuales de compresión, estos por efecto secundario, eliminan tensiones residuales dejadas por otros procesos previos como: mecanizado, tratamientos térmicos o en algunos casos de conformación plástica.

La mayoría de las fallas por fatiga a largo plazo son producto de los esfuerzos a tracción. Los esfuerzos de tracción pueden resultar desde la aplicación de cargas externas o debido a los esfuerzos residuales desde el proceso de fabricación. Los esfuerzos de tracción tratan de separar, estirar o rasgar la superficie, esto conlleva a la iniciación de grietas; la compresión de la superficie del componente de metal a través del shot peening controlado, desinhibe la iniciación de fallas por fatiga, logrando retrasarla y en muchos casos elimina la sensibilidad.

## 1. ANTECEDENTES

El proceso de granallado de superficies a través de la utilización de materiales abrasivos tuvo su inicio hace más de 100 años, cuando, en 1870, Tilghman descubrió y patentó el principio de limpieza con chorro de arena<sup>[1]</sup>.

Inicialmente, el granallado con arena se hacía a cielo abierto, o en ambientes confinados sin sistemas de ventilación apropiados. De esta forma, no tardaron en aparecer los primeros problemas de silicosis para los operadores. Desde entonces, fueron introducidas muchas modificaciones a la técnica de limpieza, desarrollándose nuevos tipos de equipos y de abrasivos.

Los abrasivos metálicos fueron utilizados por primera vez en 1885, en Inglaterra, pero su aceptación industrial ocurrió alrededor de 1920<sup>[1]</sup>, cuando comenzaron a aparecer evidencias de las ventajas económicas y técnicas como: menor desgaste de los equipos, mejor acabado superficial, mayor productividad, menor volumen de material abrasivo manipulado, menor costo y, principalmente, por no producir la silicosis.

Los primeros abrasivos metálicos a ser ampliamente utilizados eran producidos de hierro fundido coquillado, que a pesar de ser muy superiores a las arenas, se rompían rápidamente, provocando desgaste relativamente rápido del equipo. Posteriormente, se desarrollaron granallas de hierros fundido maleable y aceros tanto fundidos como de alambres cortados, todos con propiedades muy superiores a las de hierro fundido coquillado<sup>[1]</sup>. Las granallas de acero se emplean actualmente en un sin número de aplicaciones, tales como:

- Limpieza de piezas después de la fundición,
- Decapado mecánico de metales,
- Remoción de rebabas de piezas metálicas, plásticos y gomas,
- Grabado de superficies plásticas, vidrios, metales, cerámicas y
- Endurecimiento de metales por deformación superficial.

## 1.1. GENERALIDADES DEL GRANALLADO

El granallado es un método de trabajo en frío mediante el cual se inducen esfuerzos residuales de compresión en la capa superficial de los objetos metálicos. El método está fundamentado en el uso de un chorro de granallas proyectadas hacia la superficie del componente a tratar, a una alta velocidad (40 – 100 m/s) y bajo condiciones controladas (Fig. 1.1) [2].

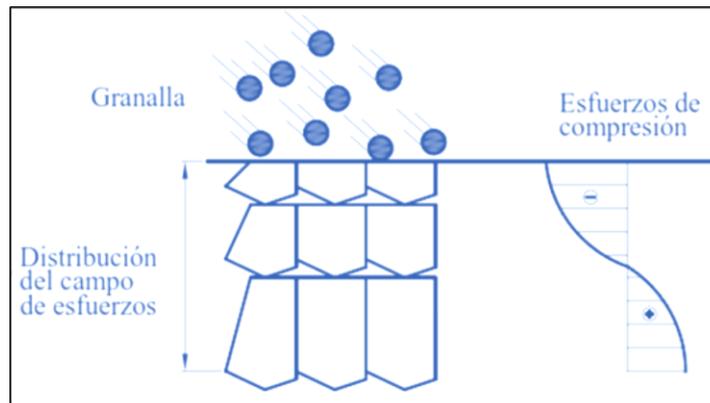


Fig. 1.1. Principio del proceso de granallado.

Así, con la introducción de esfuerzos residuales de compresión en una capa superficial, se logra aumentar la resistencia a la fatiga del material debido a que cuando se producen esfuerzos de tracción en la capa superficial por la aplicación de una carga externa, estos tienen que vencer los esfuerzos residuales de compresión. Además, el granallado se utiliza como pretratamiento superficial antes de aplicar algunas técnicas de recubrimientos, esto debido a que tanto se aprovechan los esfuerzos residuales de compresión como también porque se produce una mayor adherencia de la capa de recubrimiento por las irregularidades superficiales producidas [3].

Cuando las partículas individuales de un chorro de granallas a alta velocidad impactan una superficie metálica, producen ligeras depresiones ovaladas que se extienden radialmente como resultado del flujo plástico del metal impactado. Por lo general, el efecto se extiende de 0.127 a 0.254 mm bajo la superficie, cuando el metal no está deformado plásticamente [4]. Para

que se forme esa huella es necesario que la superficie no esté endurecida por deformación, esta huella se observa en la Fig. 1.2. Así, en el equilibrio que resulta después del rebote del choque, la capa superficial estará con esfuerzos residuales de compresión, mientras que el metal que está por debajo de esa capa, estará con esfuerzos residuales de tracción.

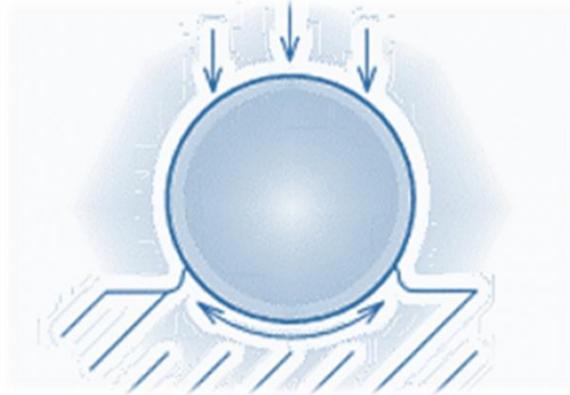


Fig. 1.2. Deformación plástica en el punto de impacto.

Bajo la superficie, el material comprimido intenta volver a su volumen inicial, como resultado de la contracción elástica del mismo (Fig. 1.3), la cobertura de las huellas permite obtener un esfuerzo residual uniforme de compresión logrando que el material no regrese a su volumen inicial.

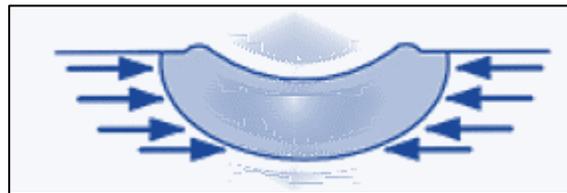


Fig. 1.3. La compresión se opone a la fisuración.

Se reconoce que las grietas no se inician ni se propagan en un volumen en compresión, esto debido a que la mayor parte de las roturas por fatiga y corrosión se inician en la superficie, los esfuerzos residuales de compresión

que se introducen por este proceso de granallado aumentan sensiblemente la resistencia a la fatiga de las piezas metálicas tratadas con shot peening<sup>[5]</sup>.

El denominador común de la mayoría de los modos de rotura a largo plazo son los esfuerzos de tracción. Esos esfuerzos pueden resultar de las sollicitaciones externas o ser residuales, creadas por procesos de fabricación como soldadura y el mecanizado. Los esfuerzos de tracción tienden a provocar un estiramiento de la superficie y esto puede producir inicio de grietas (Fig. 1.4).

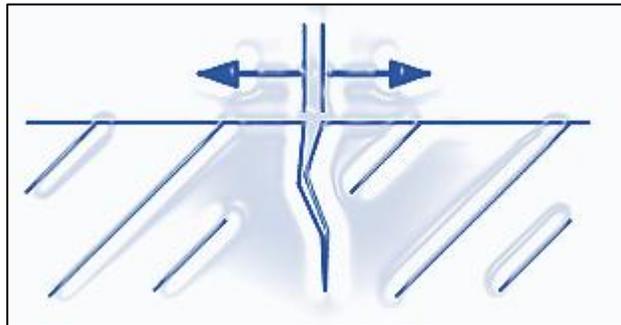


Fig. 1.4. Iniciación de grieta y propagación bajo esfuerzos de Tracción.

Los esfuerzos residuales de compresión provocan un acercamiento en los límites de grano lo cual genera el retraso o bloqueo del inicio de grieta. Ya que la propagación de las grietas se frena por la capa con esfuerzos residuales de compresión, aumentando la profundidad de la capa en compresión se aumenta la resistencia al agrietamiento del material. Además, el granallado es el método más económico y el más práctico para introducir esfuerzos residuales de compresión en los metales.

El Granallado es un tratamiento orientado a mejorar la resistencia a la fatiga de componentes mecánicos metálicos. No debe ser confundido con el arenado que no es otra cosa que un tratamiento de limpieza de materiales. El granallado, puede llegar a alcanzar profundidades apreciables, y es utilizado para retardar o eliminar la aparición de grietas por fatiga.

Resumiendo, se puede decir que el granallado aporta a las piezas metálicas los efectos siguientes:

- Deformación plástica de una capa superficial del metal.
- Introducción de esfuerzos residuales de compresión en la capa superficial.

Con el objeto de obtener una mayor eficacia del tratamiento superficial, el proceso de granallado se debe realizar en condiciones controladas para su repetitividad. De no ser así, no se podría hacer ninguna previsión a cerca del estado de la pieza después de dicho tratamiento.

## **1.2. CONTROL DEL PROCEDIMIENTO**

El granallado controlado es diferente de la mayoría de los procedimientos de fabricación por el hecho de que no existe un método no destructivo para determinar si el proceso ha sido realizado cumpliendo en su totalidad con las especificaciones.

Las técnicas de control, como el análisis por difracción de rayos X, necesitan el sacrificio de una pieza para obtener un perfil de esfuerzos en profundidad. Para asegurarse que se han cumplido las especificaciones del proceso en la producción de algunos lotes de piezas, se deben aplicar de manera permanente los controles siguientes:

- Control de la granalla,
- Intensidad Almen,
- Cobertura y
- Control de las máquinas y equipos de producción.

### 1.2.1. CONTROL DE LA GRANALLA

El tipo de granalla utilizada en el tratamiento de shot peening es decisiva durante la realización del proceso de alta calidad. Para hacer tratamientos de shot peening se pueden utilizar distintos tipos de granallas, en función de su composición y su proceso de fabricación, como son: de acero fundido, de alambre recortado, esferas de vidrio o esferas de material cerámico [9-11].

En la Fig. 1.5 se presentan las formas aceptables e inaceptables de las granallas que se fabrican industrialmente.

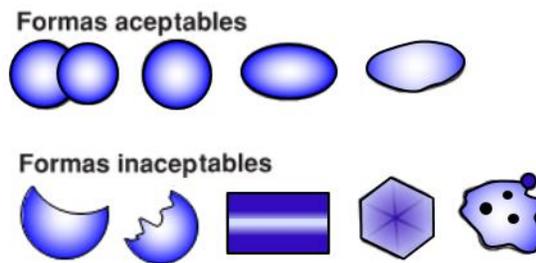


Fig. 1.5. Formas de las granallas.

La granalla debe ser de forma globalmente esférica. Cuando la granalla se quiebra debido al impacto, los residuos deben ser eliminados para procurar que la superficie granallada no se estropee. En la Fig. 1.6 se presenta la metalografía de una muestra metálica preparada en forma transversal que ha sido granallado de forma inaceptable por granallas rotas, en la cual se observa claramente el deterioro y los sitios potenciales de inicio de grietas por fatiga.



Fig. 1.6. Daño de superficies creado por granallas rotas, 100x.

En la Fig. 1.7 se presenta una vista transversal de una superficie correctamente granallada, en la cual se observa que el diámetro de las granallas utilizadas fue uniforme. Esto es debido a que una granalla de mayor diámetro tiene una masa y una energía de impacto superior que de una granalla de diámetro inferior. Es decir; si se utiliza una mezcla de granallas de tamaños diferentes, las más gruesas crearán zonas más profundas y las menos gruesas crearán zonas menos profundas, las cuales producirán una capa con esfuerzos residuales de compresión heterogéneo y ocasionará resultados dispersos de comportamiento a la fatiga. En la Fig. 1.8a se presenta un lote de granallas aceptables debido a que poseen el mismo tamaño. En la Fig. 1.8b se presenta un lote de granallas inaceptables debido a que muchas están fragmentadas.

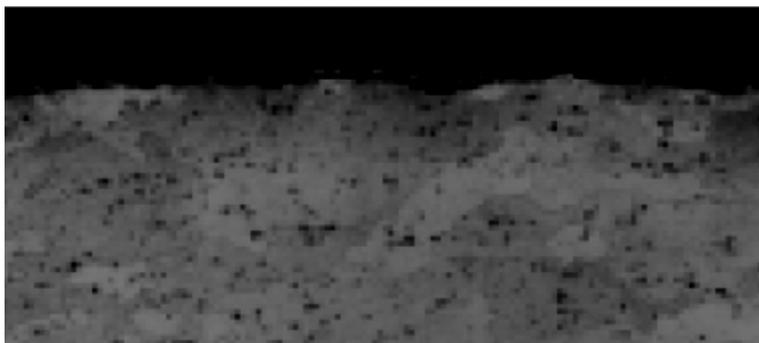


Fig. 1.7. Estado típico de una superficie granalla de buena calidad, 100x.

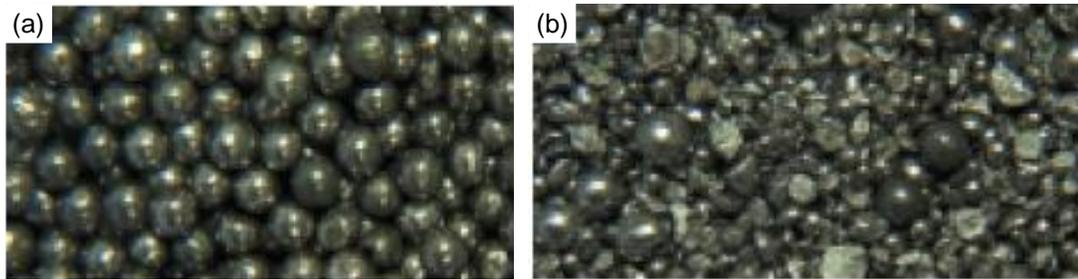


Fig. 1.8. Granallas: (a) de buena calidad y (b) de forma inaceptable.

La descripción anterior del proceso de control de granallado demuestra que la calidad de la granalla utilizada, es la clave para un proceso de granallado eficiente, eficaz y económico. Hasta el punto de impacto de la granalla con la superficie de la pieza, todos los tipos y niveles de calidad de la granalla, del mismo tamaño, son idénticos. Es en el instante del impacto en la superficie de la pieza que la calidad y la composición de la partícula disparada de manera eficiente debe transmitir esta energía cinética a la superficie de la pieza para producir los esfuerzos residuales de compresión beneficiosos.

La eficiencia con la que esta energía se utiliza para hacer un trabajo útil depende de las siguientes características de la granalla:

- Dureza,
- Micro estructura,
- Defectos físicos,
- Análisis químico,
- Tamaño,
- Resistencia a la fatiga (durabilidad) y
- Transmisión de energía.

### **Dureza**

La norma establece un intervalo de dureza para las granallas esféricas y angulares de acero entre 41 a 51 HRC, las cuales se designan por dureza S de granallas Amasteel esférica y angular. Existen otras gamas de dureza de granallas específicas para cumplir requisitos de granallados particulares,

algunas de las durezas estándar de granalla Amasteel son: M, 47-56 HRC; L, 54-61 HRC; y H, 60 HRC mínimo. La Amasteel 2431/1C desde 45 a 52 HRC y Amasteel 2431/2C desde 55 a 62 HRC.

Si la granalla es demasiado blanda, una gran parte de la energía cinética disponible es absorbida por la misma granalla cuando choca contra la superficie de la pieza, ya que ésta se deformará. Esta energía cinética se pierde y no se aprovecha en el granallado, lo que resulta en una menor deflexión lograda. La dureza de la granalla debe ser como mínimo 10% mayor que la dureza de la pieza de trabajo.

Una granalla demasiado blanda no producirá el nivel de esfuerzo de compresión residual adecuado. Además, el efecto de la utilización de granallas de baja dureza no puede ser compensado mediante el aumento de los tiempos de granallado.

Una granalla de mayor dureza se rompe más rápidamente y aumenta el consumo de la misma. A veces, los bajos resultados del granallado son causados debido a una excesiva cantidad de granallas finas, derivadas de la rápida fragmentación si la remoción de las mismas no está controlada adecuadamente. También, las granallas de mayor dureza crean un desgaste más excesivo en la máquina de granallar, lo que aumenta los costos de mantenimiento.

### **Microestructura**

La microestructura de la granalla debe ser tal que la partícula resista deformación cuando impacta contra la superficie de la pieza de trabajo. Las granallas con microestructura martensítica obtenidas mediante temple y revenido, son las más apropiadas y están disponibles en el mercado actual. Además, la microestructura debe estar libre de carburos de hierro, ya que son quebradizos y contribuyen muy fuertemente a la fractura de las granallas.

## **Defectos físicos**

La granalla debe estar lo más libre posible de defectos físicos (grietas, poros y fisuras de contracción) que pueden contribuir a la fractura de la misma y elevar las correspondientes tasas de consumo. Toda la granalla fabricada actualmente, tiene un cierto número de estos defectos debido a los métodos de fabricación utilizados. La aplicación de control estadístico de los procesos de fabricación reduce al mínimo el número de granallas con estos defectos objetables.

## **Análisis químico**

El análisis químico es muy importante para controlar la microestructura. Además, es importante destacar que un alto contenido de carbono contribuye al fallo prematuro de las granallas, debido a la formación de carburos duros y frágiles. El contenido de carbono demasiado bajo producirá granallas que se deformarán y absorberá la energía. El contenido de azufre y fósforo debe mantenerse tan bajo como sea posible ya que ambos contribuyen a la fractura temprana por fatiga<sup>[6]</sup>.

## **Tamaño**

El tamaño de las granallas es muy crítico. Esto debido a cada máquina de granallado impulsa un número constante de libras de granallas por hora, que es dependiente de la potencia de la rueda centrífuga o el volumen de aire utilizado por hora en una máquina de granallado por presión de aire.

El número de partículas en un libra está por lo tanto en función del tamaño de las partículas. Sí, una libra de abrasivo S-660 contiene 14,000 partículas. Una libra de S-330 (la mitad del diámetro de S-660) contiene 110,000 partículas, 8 veces más que la S-660. Por lo tanto, una turbina que lanza una libra, arrojaría 14,000 impactos de la S-660 ó 110,000 impactos de la S-330.

En el mismo sentido, una (1) partícula de S-660 tendría ocho (8) veces la energía de impacto de una (1) partícula de S-330, debido a la energía cinética de las mismas, la cual se calcula por la Ec. 1.1:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.1)$$

Sin embargo, una partícula pequeña de granallado puede no poseer la suficiente energía para realizar el impacto eficazmente y producir los esfuerzos residuales de compresión con la profundidad de compresión requerida<sup>[6]</sup>.

Es importante seleccionar el tamaño más pequeño de granallas que produzca la intensidad adecuada Almen, ya que a menor tamaño de granalla más se saturará de impresiones la superficie. Así, al usar granallas más pequeñas se obtiene una mayor velocidad en el proceso, ya sea cuando se requiere realizar una limpieza adecuada o un granallado.

### **Resistencia a la fatiga (durabilidad)**

La resistencia a la fatiga o durabilidad es la capacidad de la granalla para resistir la falla o avería debido al impacto con la pieza. El uso de granalla con mayor durabilidad producirá un proceso más económico a utilizar, siempre que se disponga de la capacidad de transmitir la energía necesaria a las partículas para limpiar o granallar.

### **Energía transmitida**

La granalla ideal debe ser capaz de transferir la máxima cantidad de energía cinética a la superficie de la pieza de trabajo. El proceso de granallado en donde se usa granallas que se deforman y absorben la energía durante el impacto tal como el ejemplo anterior de baja dureza, necesitará más tiempo de proceso para obtener los mismos resultados que los obtenidos con granallas que no se deforman, debido a la cantidad de energía perdida a través de la

deformación de la granalla. Por lo tanto, un proceso más económico para granallado es el que transmite mayor energía cinética a la superficie de la pieza, como lo mide Almen es la altura producida en idénticas condiciones de exposición.

La granalla que transmite la mayor cantidad de energía a la pieza de trabajo con la mayor resistencia a la fatiga producirá la operación de granallado más económica y más consistente. La granalla con la dureza apropiada, microestructura, análisis químico, tamaño y un mínimo de defectos físicos contribuirá a una mayor energía transmitida y resistencia a la fatiga.

Las granallas que más satisfacen la mayoría de las aplicaciones de procesos industriales de granallado, son las SAE J827 y J444 con un intervalo de dureza entre 41 a 51 HRC.

### **1.2.2. CONTROL DE INTENSIDAD**

La intensidad del granallado es la medida de la energía del flujo de granallas. Es uno de los medios esenciales para asegurar la reproductibilidad del procedimiento. La energía del flujo de granallas está en relación directa con los esfuerzos residuales de compresión en una pieza. La intensidad puede ser aumentada si se utilizan granallas de mayor tamaño y/o si se aumenta la velocidad del disparo de las granallas. Las otras variables a considerar son el ángulo de incidencia y el tipo de granalla.

Se mide la intensidad utilizando probetas Almen. La probeta es una placa de acero SAE 1070 <sup>[7,8]</sup>, la cual es granallada por un solo lado. Los esfuerzos residuales de compresión del granallado flexionaran la probeta Almen formando un arco convexo con respecto a la superficie granallada Fig. 1.9. La altura del arco de la probeta Almen dependerá de la energía del flujo de las granallas y dicho valor es proporcional a la intensidad.

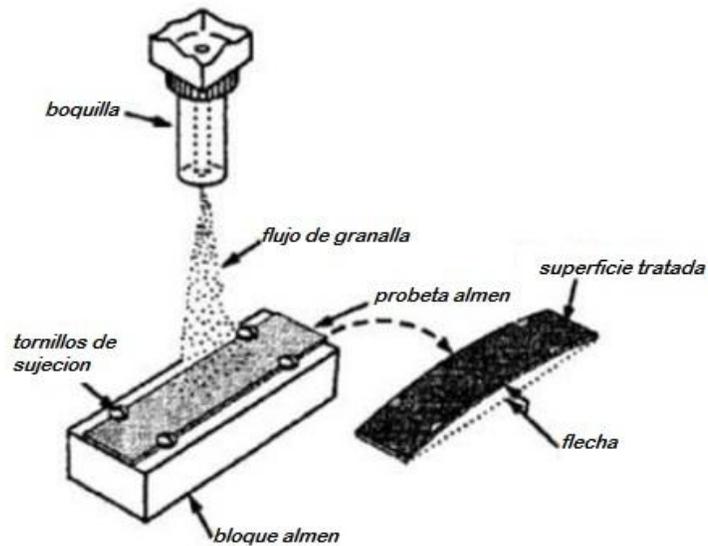


Fig. 1.9. Flecha generada en una placa Almen.

Existen tres tipos de probetas Almen utilizadas según la aplicación del granallado. Cabe destacar que, cuanto más intenso es el granallado, mayor cobertura de granallado se producirá en la probeta. Estas probetas son:

- Probeta "N": espesor = 0.79 mm (0.031 pulg)
- Probeta "A": espesor = 1.29 mm (0.051 pulg)
- Probeta "C": espesor = 2.39 mm (0.094 pulg).

La intensidad Almen es la altura del arco medido por un comparador Almen (comparador de caratula), seguida por el nombramiento del tipo de probeta Almen. El nombramiento apropiado para 0.30 mm de altura del arco utilizando una probeta tipo A es F 0.30A (o más usualmente F 30A). El intervalo de intensidad utilizado para las probetas Almen es de 0.10 a 0.60 mm.

Las probetas Almen se montan sobre bloques Almen, fijados sobre una pieza soporte (Fig. 1.10) o sobre un utillaje mecano-soldado de forma parecida. Los bloques Almen deben estar instalados en zonas donde la comprobación de energía del impacto es crucial. La intensidad real está

comprobada y registrada antes de tratar la primera pieza de cada lote. Esto permite comprobar que la máquina granalladora está ajustada correctamente y funciona de acuerdo al procedimiento aprobado. Al final del tratamiento del lote de piezas, la intensidad se comprueba de nuevo para asegurar que no se produjo variación en los parámetros de tratamiento de endurecimiento superficial. En caso de largos períodos de tratamiento, es necesario realizar controles de intensidad en el transcurso de la producción con el fin de satisfacer las exigencias de calidad.



Fig. 1.10. Utillaje soporte probeta Almen.

Para determinar la saturación o control de intensidad se necesita que se obtenga una curva de saturación. El tiempo de saturación está definido por el punto de la curva a partir del cual, duplicando el tiempo de exposición, la altura del arco aumentará un 10%. La curva de saturación se obtiene granallando una serie de probetas en una máquina, la cual es ajustada para diferentes tiempos de granallado.

En la Fig. 1.11 se puede observar que al duplicar el tiempo de granallado de la probeta Almen ( $2T$ ) respecto al tiempo inicial ( $T$ ), la altura del arco Almen aumenta menos de un 10%. Esto significa que el proceso alcanza la saturación en el tiempo  $T$ . La saturación establece la intensidad real del chorro de granallas en una zona en particular de la pieza y permite el ajuste específico de la máquina.



Fig. 1.11. Curva de saturación.

Se utiliza la saturación para calcular el tiempo de exposición que define la intensidad. La saturación y la cobertura no se producen necesariamente al mismo tiempo. Esto es debido a que la cobertura está determinada sobre la superficie de la pieza por una dureza media. Así, se puede determinar la saturación utilizando probetas Almen de acero de muelle SAE 1070 tratadas entre 44 y 50 HRC.

### 1.2.3. CONTROL DE COBERTURA

La cobertura completa de una superficie granallada es esencial para poder obtener un granallado de alta calidad. La cobertura es una la relación entre la superficie cubierta por las huellas del granallado y la superficie inicial que se espera granallar. Tal como se citó, la cobertura debe ser toda; es decir la cobertura no debe nunca ser inferior a un 100% porque el material se vuelve sensible a corrosión bajo esfuerzo y las zonas pequeñas no endurecidas permiten que se produzcan inicios de grietas por fatiga. En la Fig. 1.12 se presenta una cobertura completa y una cobertura parcial.

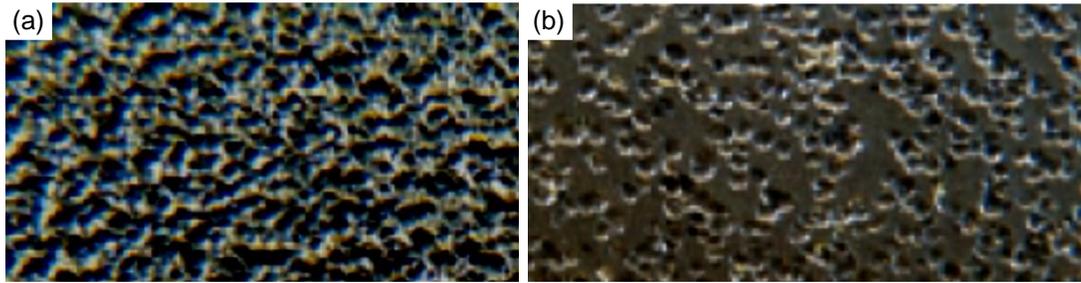


Fig. 1.12. Superficies granalladas: (a) cobertura completa y (b) cobertura parcial.

Bajo los supuestos indicados, la cobertura de un tratamiento por shot peening se define como el porcentaje de superficie expuesta al tratamiento que ha sido impactada por las granallas al menos una vez. Matemáticamente la evolución de la cobertura (en porcentaje) en un tratamiento de shot peening se puede ajustar a la siguiente expresión, conocida como *ecuación de Avrami*:

$$\% \text{ de } C = 100(1 - e^{-ARt})\% \quad (1.2)$$

Siendo  $C$  la cobertura,  $A$  el área de cada huella creada.  $R$  el ratio de flujo y  $t$  el tiempo de exposición.

En las primeras etapas, al haber muy pocos impactos, no existe solapamiento entre ellos, por lo que el crecimiento de la cobertura es lineal con el tiempo. Pero a medida que la superficie está siendo cubierta, aumenta la probabilidad de que haya impactos solapados, lo que hace que el ritmo de crecimiento de la cobertura disminuya. La aproximación al 100% de cobertura es exponencial, siendo teóricamente imposible alcanzarla <sup>[12]</sup>. Por lo que. Matemáticamente, se considera que la cobertura es total cuando se alcanza un 98%. En la práctica, se considera que se alcanza la cobertura total cuando los proyectiles producen suficientes huellas como para eliminar la textura superficial inicial <sup>[13]</sup>. En ocasiones se hace referencia a niveles de cobertura superiores al 100%. Lo que realmente se quiere indicar con esta notación es

que el elemento se somete a un tiempo de exposición igual a 2, 3 o más veces el tiempo necesario para tener una cobertura total.

### **1.3. TIPOS DE MÁQUINAS PARA GRANALLADO**

Actualmente existen dos tipos de máquinas para realizar el proceso de granallado, las cuales se describen a continuación.

#### **1.3.1. MÁQUINA CENTRIFUGA DE GRANALLADO**

Su funcionamiento consiste en una rueda (ver, Fig. 1.13) que gira a alta velocidad, en la cual en su circunferencia se han instalado una serie de boquillas, que proyectan las granallas sobre una superficie; las granallas son alimentadas por gravedad, la cual constituye una de las ventajas de la máquina tipo rueda:

- Por su tipo de operación, emite un potente flujo de granallas a alta velocidad, realizando el trabajo en un menor tiempo,
- Debido al rebote de las granallas, el trabajo se realiza en una cabina y la máquina se fija al piso y
- Las máquinas con grandes ruedas tienen un costo inicial elevado y sólo se justifica su adquisición para grandes producciones, las cuales tienen un mejor desempeño con respecto a las de aire presurizado.

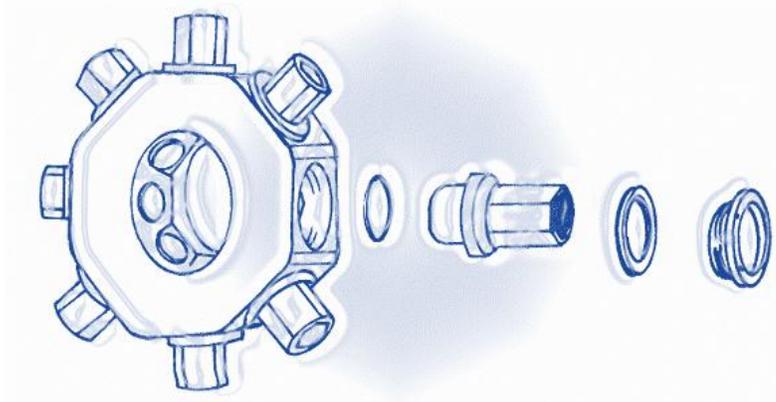


Fig. 1.13. Rueda de granallado centrífugo.

El método de granallado centrífugo tiene una eficiencia mayor que la del método neumático de granallado. No obstante, aunque el método de granallado centrífugo carece de la flexibilidad del método de granallado neumático, tiene la habilidad de hacer un uso más eficiente de la energía. Estas máquinas se construyen a la potencia requerida para un propósito basado en la demanda y usualmente está en el intervalo de 20 a 25 HP.

De acuerdo con el tamaño de la granalla de acero, ésta perderá velocidad relativamente a cortas distancias. Esto, es de suma importancia para dimensionar la capacidad cúbica de la cabina.

Además, un buen diseño de cabina es aquel que dispone de una buena ventilación que asegure una atmosfera limpia dentro de la misma durante la operación de granallado. Muchos componentes y piezas de trabajo que estén en su etapa final de fabricación, pueden ser limpiados minuciosamente, de forma tal que se requiere una adecuada ventilación.

### **1.3.2. MÁQUINAS NEUMÁTICAS DE GRANALLADO**

Existen tres diferentes sistemas de uso de aire comprimido para fines de granallado, en los cuales la granalla es proyectada desde una boquilla, estas son:

- Inducción por sifón
- Inducción por gravedad
- Presión directa.

### **Inducción por sifón**

En el método de inducción por sifón la granalla es aspirada hacia la boquilla. Este método no es complicado y se presta, asimismo, para un uso en cabinas de granallado manual (Fig. 1.14).



Fig. 1.14. Cabina de granallado manual de tipo sifón.

La única afirmación que se puede realizar sobre el método de inducción por sifón es la simplicidad del sistema que permite un trabajo constante e ininterrumpido.

El único inconveniente es que la mayoría de estas instalaciones no incorporan limpieza de granallas y graduación de granallas que para algunas aplicaciones no podría ser aceptable.

### **Inducción por gravedad**

Este sistema ofrece una eficiencia mejorada, con la granalla estando elevada sobre la zona de proyección, desde ahí es permitida una caída libre de la granalla hacia la boquilla donde es impulsada por el aire comprimido.

Este es un método ordenado que proporciona una operación continua elevando la granalla en el sistema de recirculación. El método esencial puede incorporarse cribado, graduado y limpieza de granallas.

### Presión directa

Este método es el más usado en la industria. Está basado sobre el uso de un recipiente a presión (ver, Fig. 1.15) en el cual la granalla es alimentada bajo presión a la boquilla. Una válvula de medida es incorporada al sistema para ajustar el volumen de granalla dentro de la corriente de aire. Existe un balance preciso entre el volumen de granalla y la medida del agujero de la boquilla. La ventaja de este sistema está en los ajustes que se puede hacer a la presión de aire. El depósito a presión puede ser incorporado como una unidad dentro de las cabinas cuando los sistemas son operados manualmente.

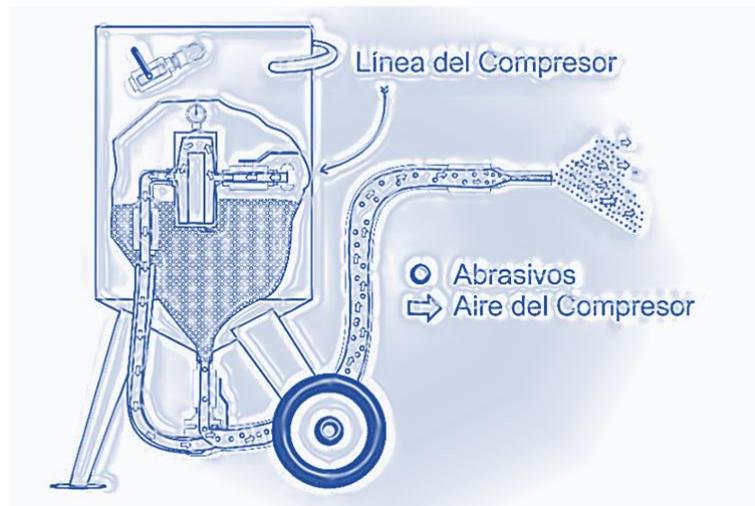


Fig. 1.15. Unidad de granallado por presión directa.

Por la flexibilidad el método de presión directa, este es superior a los otros métodos, en donde todos los tipos de granallas pueden ser usadas con la misma facilidad. Las presiones son fácilmente ajustadas, la distancia de la boquilla y el ángulo de impacto también pueden variarse. El uso de una boquilla permite que la corriente de granallas sea dirigida con precisión. No obstante, la desventaja en el sistema es el modo sin control de alimentación de granallas, la cual se realiza por medio de la válvula de alimentación.

Siempre que sea posible las boquillas deberán ser mecánicamente controladas, las cuales deberán estar colocadas a la distancia correcta con el ángulo preciso y con la velocidad de movimiento exacta. La máquina también deberá estar equipada con un temporizador para que la duración de cada operación de granallado sea llevada a cabo con precisión. Toda maquinaria para granallado deberá estar equipada con graduadores para asegurar una forma estándar de la granalla. La granalla quebrada deberá ser removida, así como también la granalla de menor tamaño. En pequeñas plantas granalladoras accionadas por aire, no es común que estén acoplados sistemas de suministro automático de granallas, pero en las que el consumo es suficientemente alto son esenciales dichos suministros automáticos.

### **1.3.3 CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE BOQUILLAS PARA GRANALLADO CON AIRE COMPRIMIDO**

Elegir la boquilla adecuada para cada aplicación es simplemente un asunto de entender las variables que afectan el desempeño y los costos del trabajo. Existen cuatro parámetros básicos para responder cuál será el desempeño y costo óptimo:

- Patrón de trabajo
- Suministro del compresor de aire
- Diámetro de la boquilla
- Material de la boquilla.

## **Patrón de trabajo**

El tipo que se elija determinará el patrón de trabajo que se obtendrá. Las boquillas generalmente presentan ya sea un diámetro recto o un diámetro Venturi restringido. Entre estas boquillas se tienen:

- Las boquillas de diámetro recto (Fig. 1.16, N° 1), se obtiene un patrón de granallado delgado, el cual es ideal para limpiar superficies angostas o en trabajos dentro de cabinas de granallado. Estas boquillas son muy utilizadas para trabajos pequeños como limpieza de partes, afinado de costillas de soldadura, limpieza de rieles, escalones, trabajos en parrillas o escultura de piedra u otros materiales.
- Las Boquillas con diámetro Venturi (Fig. 1.16 N° 2 y 3) crean un patrón de granallado amplio e incrementan la velocidad de la granalla en un 100% a la misma presión. Este tipo de boquillas son la mejor elección para grandes volúmenes de producción en donde se aplica el chorro de granalla a superficies muy grandes. Las boquillas tipo Venturi largas por ejemplo, tienen un incremento de cerca del 40% en la productividad a comparación con las boquillas de inserto recto, mientras que su consumo de granalla puede ser reducido a ~40%.
- Las boquillas doble Venturi y de entrada ancha son versiones mejoradas de las boquillas Venturi largas. Las boquillas doble Venturi (Fig. 1.16 N° 4) han sido construidas como dos boquillas de Venturi simples en serie que generan un vacío gracias a los huecos entre ellas. De esta forma, permiten la inserción de aire atmosférico dentro del caudal de la boquilla en este segmento. El diámetro de salida es también más amplio que el de una boquilla convencional. Así, ambas modificaciones están construidas con el fin de incrementar el tamaño del patrón de limpieza, así como también para minimizar la pérdida de velocidad del abrasivo.
- Las boquillas de entrada ancha (para altos volúmenes de producción) como su nombre lo indica, presentan una entrada más amplia que las boquillas Venturi normales, así como un diámetro de salida grande y divergente (Fig.

1.16 N° 5). Al ser combinadas con mangueras y/o tubería del mismo diámetro interior de 1/4 a 1 pulg, pueden ofrecer un aumento en la producción del 15% sobre aquellas boquillas con una entrada más pequeña. También, cuando las boquillas de entrada ancha presentan un diámetro de salida grande y divergente (por ejemplo: Boquilla bazooka) pueden ser utilizadas a presiones más altas para incrementar a un 60% el patrón de granallado con menor uso de granallas.

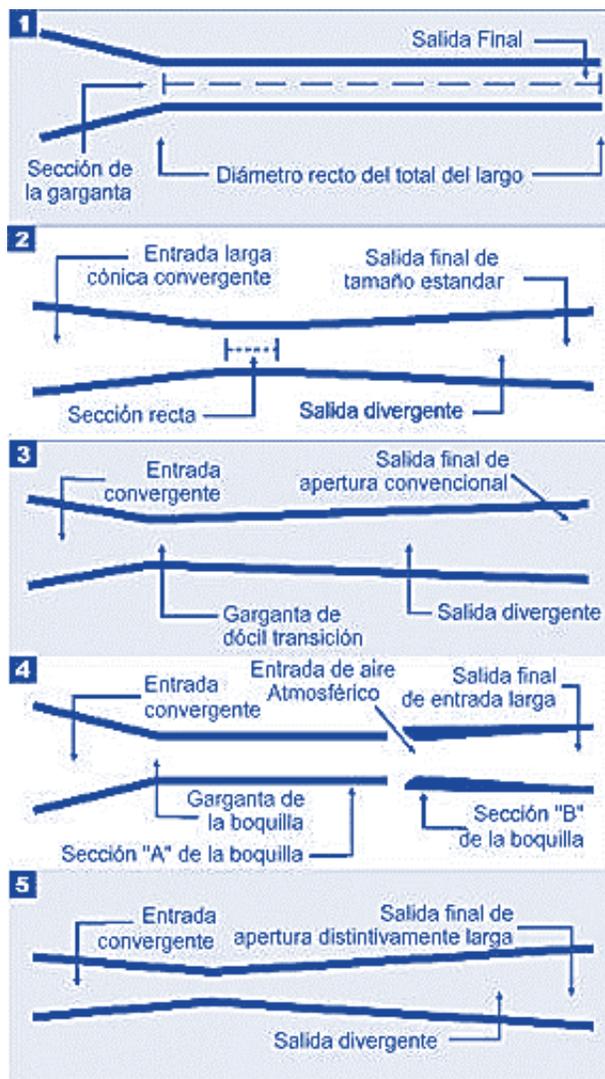


Fig. 1.16. Tipos de boquillas para granallado.

También, se disponen de boquillas en ángulo para el granallado en sitios ajustados tales como canales de puentes, detrás de rebordes o en el interior de tuberías. Muchos operadores desperdician tiempo y granalla realizando el trabajo por medio del rebote de la granalla. El poco tiempo que toma cambiar una boquilla Venturi por una boquilla en ángulo se recupera rápidamente y el tiempo total de trabajo se reduce.

### **Suministro del compresor de aire**

Como regla general, el sistema de suministro de aire debe ser capaz de proveer cuando menos 50% más del volumen de aire (cfm) requerido por la boquilla específica para realizar el trabajo a una presión dada, ya sean 100 ó 140 lb. Esto ayudará a que la boquilla pueda continuar proporcionando un buen servicio aun a pesar de sufrir un ligero desgaste. Sin embargo, no se debe permitir un desgaste excesivo, ya que en este caso la producción decrecerá dramáticamente.

Se considera siempre que el diámetro de entrada de la boquilla debe coincidir con el diámetro interior de su manguera de suministro de aire. Una combinación errónea puede provocar puntos de desgaste mayores, caídas de presión y una turbulencia interna excesiva.

### **Diámetro de la boquilla**

Para una mayor productividad, se selecciona el diámetro de la boquilla basado tanto en el flujo de aire disponible como también de la presión de trabajo que se necesita para lograr el acabado y endurecimiento deseados. Por ejemplo: si se supone que se tiene un compresor de 375 cfm a 80% de su capacidad. Además, de la boquilla para granallado, el compresor puede estar proveyendo aire a otros componentes como equipo neumático y el control remoto, quedando 250 cfm disponibles para la boquilla. De acuerdo con la tabla de consumos de aire y granallas 250 cfm son lo suficiente para la sola operación de una boquilla de 7/16 pulg a 100 lb de presión, una boquilla más grande o una boquilla de 7/16 pulg ya desgastada requerirá un volumen de

aire mayor para mantener la presión de 100 lb. Así, para lograr este requerimiento de flujo de aire extra, el compresor sobre trabajará o se reflejará en un decremento en la presión de trabajo. Por otro lado, si se elige una boquilla de diámetro menor al que el compresor pueda proveer resultará en un desperdicio de la capacidad instalada, lo que va en decremento de la productividad. Como se puede ver, es importantísimo elegir el diámetro que se ajuste mejor a las condiciones de trabajo.

### **Material de la boquilla**

La selección del material de la boquilla dependerá básicamente de la granalla que se elija, la frecuencia con la que se realiza el trabajo con chorro de granalla, el tamaño del trabajo, así como las condiciones del sitio de trabajo. A continuación se señala una guía de aplicación general para los distintos materiales.

- Boquillas de Cerámica (Óxido de Aluminio): ofrecen un rendimiento aceptable a menor costo que otros materiales. Son una buena elección en aplicaciones esporádicas en las cuales el precio es el factor principal y el tiempo de vida es lo menos importante,

En el mismo sentido, se tiene que obtener el mayor tiempo de servicio de la boquilla, para ello se recomienda:

- Evite tirar o golpear las boquillas, ya que el material de la boquilla se puede fragmentar,
- Asegurarse de utilizar una boquilla diseñada para la aplicación que se va a realizar y que le proporcione buen rendimiento con la granalla que se va a emplear,
- Siempre utilizar un empaque nuevo con la boquilla o inserto ya que esto previene que la entrada de la boquilla presente desgaste por el paso de la granalla. Inspeccionar y de ser necesario reemplazar el empaque después de cada 10 a 20 horas de uso y

- Si se está utilizando boquillas rebordeadas, gire la boquilla 45° cada semana. Esto ayudará a que tenga un desgaste uniforme y prolongará el tiempo de vida de la boquilla.

#### 1.4 ESFUERZOS RESIDUALES PRODUCIDOS POR EL GRANALLADO

Los esfuerzos residuales introducidos por el granallado son esfuerzos residuales de compresión. Estos esfuerzos residuales de compresión se superponen a los esfuerzos de tracción generados por cargas aplicadas y pueden hasta ser anulados. Un perfil típico de tensión residual de granallado está representado en la Fig. 1.15.

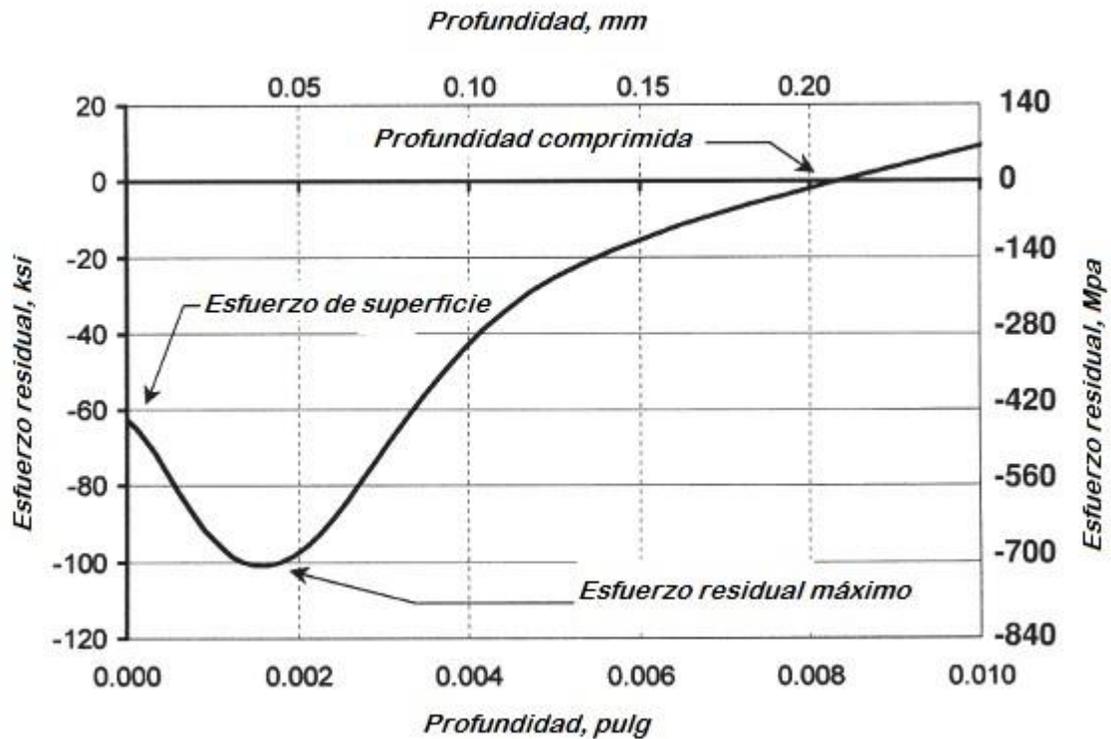


Fig. 1.17. Perfil típico de esfuerzos residuales de granallado.

En la Fig. 1.17 se presenta el perfil de esfuerzos generados por el granallado en función de la profundidad de la pieza. Así, en la superficie de la pieza se obtendrá un esfuerzo residual de compresión, el cual aumentará su valor a un esfuerzo residual de compresión máximo, luego disminuirá hasta llegar a un valor de cero, luego esta capa en compresión induce estados de esfuerzo de tracción en una capa siguiente en el material. Así, a esta capa con esfuerzos residuales de compresión se le define como profundidad de compresión.

#### **1.4.1 SUPERPOSICIÓN DE ESFUERZOS DE SERVICIO Y RESIDUALES**

Cuando se realiza un granallado sobre una pieza y subsecuentemente ésta se somete a sollicitaciones, sobre la superficie de esta pieza se desarrollará un estado de esfuerzo resultante de la diferencia entre el estado de esfuerzo producido por las cargas aplicadas y el estado de esfuerzo residual. En la Fig. 1.18 se presenta una barra sometida a flexión por tres puntos que crea un esfuerzo por flexión cuyo máximo está en la superficie. La línea discontinua diagonal representa el esfuerzo producido por dicha carga aplicada. La curva de rayas mixtas representa el esfuerzo residual de compresión generado por el granallado. La curva continua, es el resultado de las dos primeras, y presenta una disminución sensible del esfuerzo de tracción aplicado en la superficie de la pieza.

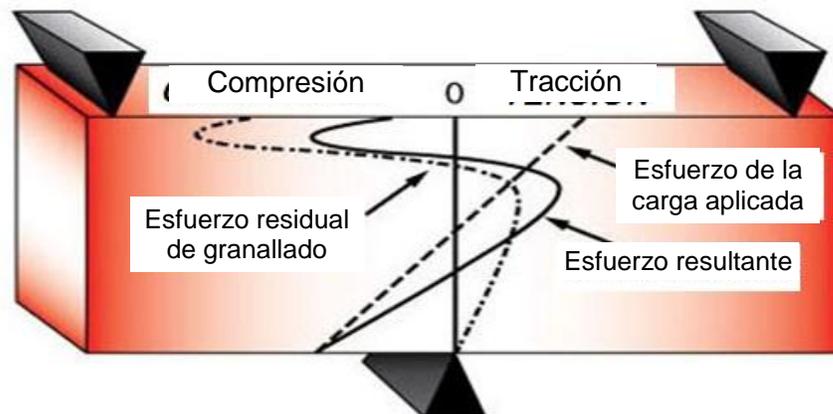


Fig. 1.18. Superposición de los esfuerzos residuales y los esfuerzos generados por la flexión en tres puntos.

El proceso de granallado tiene muchas ventajas en los dos siguientes casos:

Las concentraciones de esfuerzos están localizadas en los radios de empalme, entalladuras, agujeros, intersección de agujeros, estriado, ranuras de chaveta, etc. El granallado introduce esfuerzos residuales de compresión de gran amplitud para oponerse al factor de concentración de esfuerzo que resulta de esos accidentes geométricos.

El granallado es idóneo cuando se trata de materiales de altas características. El estado de esfuerzo de compresión depende directamente de la resistencia mecánica del material. Cuanto más sea el límite elástico, más fuerte será la amplitud de los esfuerzos residual. Así, por lo general, en la medida que los metales presentan mayor resistencia a la tracción, presentarán un mayor comportamiento a la fatiga. Estas estructuras cristalinas pueden resistir grados de esfuerzos muy importantes y así conservar mayores niveles de esfuerzos residuales.

### 1.4.2. PROFUNDIDAD DE LA CAPA CON ESFUERZOS RESIDUALES DE COMPRESIÓN

La selección de los parámetros del granallado y la dureza del metal a granallar influyen sobre la profundidad de la capa con esfuerzos residuales de compresión. En la Fig. 1.19 se presenta la relación entre la profundidad de la superficie comprimida y la intensidad del granallado para 5 tipos de aleaciones, entre los cuales se tienen: aceros de dureza 31 HRC, 52 HRC y 60 HRC, aleación de Aluminio 2024T351 y aleación de Titanio TA6V. Además, para obtener las profundidades de los esfuerzos residuales sobre aceros de diferentes durezas se puede obtener mediante interpolaciones entre estas curvas.

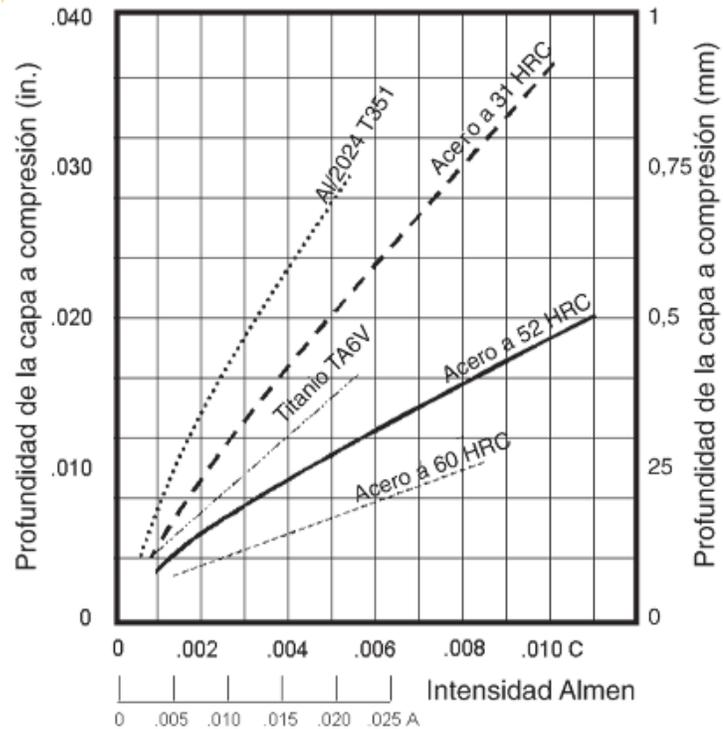


Fig. 1.19. Profundidad de la Compresión en función de la intensidad Almen.

## **2. DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS DE UN EQUIPO DE GRANALLADO PARA USO DIDÁCTICO**

En este capítulo se detalla la selección de materiales y el diseño de elementos, los cuales serán parte del proceso semiautomático de granallado, al mismo tiempo se detallan esquemas en los cuales se presentan dimensiones y particularidades del equipo. El proceso consta de 4 sistemas, los cuales son:

- Pistola de disparo,
- Cámara de disparo,
- Tolva recolectora y
- Sistema electroneumático.

### **2.1. PISTOLA DE DISPARO**

La pistola de disparo es el elemento esencial del sistema de granallado, ya que hace la función de proyectar las granallas hacia la probeta. Así, para su diseño se tomaron las siguientes condiciones.

- El diámetro de granalla de  $3.3 \pm 0.1$  mm,
- El CFM máximo de 40 cfm,
- Una presión de operación de 90 psi,
- Constará de 3 partes: el inyector, el cuerpo y la boquilla,
- Que soporte una presión de operación máxima de 175 psi,
- El diseño se basó en tres posiciones fijas de la pistola sobre una base en movimiento automático, aunque se diseño de forma tal para poder ser utilizarla manualmente si es necesario,
- La pistola se diseñó para disparar las granallas a una velocidad mayor de 40 m/s y

- Para fines de diseño, este se realizará bajo el concepto de flujo isentrópico unidimensional.

Con los parámetros establecidos se procede a determinar el perfil de la boquilla que se adecue más a las condiciones anteriormente descritas.

Del capítulo anterior en el cual se presentaron los diferentes tipos de boquillas y sus aplicaciones, para las condiciones establecidas se seleccionó una boquilla recta, tal como se presenta en la Fig. 2.1, la cual satisface las necesidades del equipo y trabajará correctamente con el cfm máximo.



Fig. 2.1, Perfil de boquilla.

Con el perfil de la boquilla establecido se procede a dimensionar las medidas internas de las partes de la pistola.

La boquilla es la parte más importante del diseño, ya que de ella dependerá que el equipo funcione dentro del intervalo de operación establecido, por lo cual para la determinación del diámetro se tomaron en consideración 2 parámetros fundamentales, los cuales son:

- Consumo de aire y
- Diámetro de granalla.

Existen muchas tablas de fabricantes, las cuales presentan para diferentes diámetros comerciales de boquillas, el consumo de aire y el flujo másico de granalla que se pueden desarrollar en condiciones de uso a diferentes presiones de operación. Así, para este caso en particular se utilizará la información que se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Consumo de aire por tamaño de granalla para una boquilla de ¼" [14]

Tamaño	Caudal de Aire CFM con flujo de granalla.						
S70 THRU S390	29.4	37.6	45.8	52.4	62.2	70.7	78.8
	Intensidad de granallado banda "A"						
S70	0.006	0.009	0.011	0.012	0.014	0.014	0.015
S110	0.006	0.009	0.011	0.013	0.014	0.015	0.016
S170	0.01	0.014	0.016	0.018	0.02	0.021	0.021
S230	0.012	0.016	0.019	0.021	0.023	0.024	0.025
S330	0.012	0.018	0.022	0.024	0.026	0.025	0.027
S390	0.014	0.019	0.023	0.025	0.027	0.028	0.029
	Flujo de granalla: lb/min						
S70 THRU S390	4.2	5.2	6.4	7.3	8.3	9.3	10.4

En la Tabla 2.1 se presenta el consumo de aire, la intensidad Almen y el flujo másico de granallas para un diámetro de boquilla de ¼ plg utilizando diferentes diámetros de granallas, entonces tenemos de los parámetros iniciales de diseño lo siguiente:

Parámetros de diseño para el equipo de granallado:

CFM: 40cfm

Diámetro de granalla: 3.3+-0.1mm

En la tabla anterior encontramos que para una granalla s330 con un diámetro de 3.3mm se obtiene los siguientes valores:

CFM con flujo de abrasivo: 37.6

Un flujo másico de granalla de: 5.2lb/min

Intensidad almen: 0.018 para una probeta almen tipo

De lo anterior un diámetro de  $\frac{1}{4}$ " cumple con los parámetros iniciales de la boquilla.

El otro factor es la cantidad de granallas que se requiere que pase en forma simultánea por la boquilla sin que éstas obstruyan el flujo, lo que hace que el diámetro interno de la boquilla sea por lo menos 2 veces el diámetro de la granalla a utilizar. Así, un diámetro de granalla de  $\frac{1}{4}$  pulg cumple con los parámetros iniciales <sup>[14]</sup>.

Para el diámetro del inyector se recomienda que se seleccione un diámetro que sea la mitad del diámetro de la boquilla, por lo que el diámetro del inyector será de  $\frac{1}{8}$  pulg <sup>[14]</sup>.

Con los diámetros establecidos se procede a realizar un análisis isentrópico unidimensional de la pistola para determinar si con las medidas seleccionadas se generara una succión del abrasivo y una velocidad superior a 40 m/s.

El conjunto de la pistola se analizará como una tobera divergente (ver, Fig. 2.2) la cual aumenta la velocidad del fluido y disminuye la presión a un punto mínimo en la salida del inyector donde está la entrada del abrasivo.

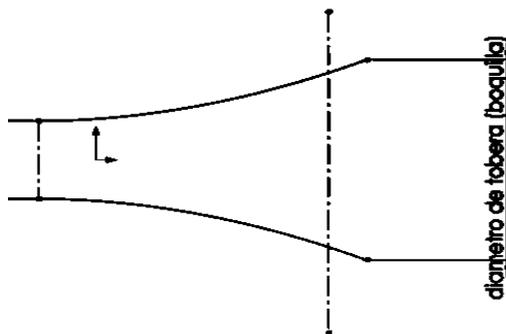


Fig. 2.2. Tobera divergente-convergente.

Disponiendo de las condiciones de estancamiento a la entrada de la boquilla, las cuales son el Punto 0 con  $P_0$ ,  $T_0$  y  $\rho_0$ . Luego, se tiene el Punto 1

con  $P_1$ ,  $T_1$  y  $\rho_1$  a la salida del inyector o la garganta de la tobera divergente. Así, a partir de los puntos de análisis establecidos, se sabe que el caudal total que fluirá por la boquilla es de 40 cfm, para la cual los porcentajes de aire y granalla son:

$$Q_{total} = 99.95\% Q_{aire} \text{ y el } 0.05\% Q_{granalla} \quad (2.1)$$

Sustituyendo los valores de caudales en la ecuación 2.1 se tienen:

$$Q_{aire} = 40 * .9995 = 39.98 \text{ CFM} = 1.887 * 10^{-2} \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{granalla} = 40 * 0.0005 = 0.02 \text{ CFM} = 9.439 * 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

Los diámetros son respectivamente:

$$\phi_{boquilla} = \frac{1}{4} \text{ pulg} = 0.00635 \text{ m}$$

$$\phi_{inyector} = \frac{1}{8} \text{ pulg} = 0.003175 \text{ m}$$

Para determinar las condiciones de presión, temperatura y densidad del aire a la salida del inyector se necesitan conocer sus propiedades isentropicas; Para ello, se supone que el aire se comporta como un gas ideal donde el calor específico constante es de  $K = 1.4$ . También, se necesita calcular su número de mach para lo cual se determina la relación de áreas. Así, esto queda de la forma siguiente:

El área se determina a partir de la ecuación 2.2:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2.2)$$

La relación de áreas se determina a partir de la ecuación 2.3:

$$\frac{A_B}{A_I} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2}{\frac{\pi}{4} d^2} = 4 \quad (2.3)$$

donde

D: diámetro de la boquilla y

d: diámetro del inyector.

Sustituyendo en la ecuación 2.3 queda:

$$\frac{A_B}{A_I} = \frac{\frac{\pi}{4} 0.00635^2}{\frac{\pi}{4} 0.003175^2} = 4$$

Con esta relación se entra a la Tabla 2.2, de relaciones isentrópicas unidimensionales, donde se tienen:

Tabla 2.2. Relaciones isentrópicas unidimensionales.

M	A/A*	P/P <sub>0</sub>	ρ/ρ <sub>0</sub>	T/T <sub>0</sub>
0.15	4.00	0.984	0.989	0.986
2.94	4.00	0.030	0.081	0.366

De los datos anteriores se toman cuando  $M > 1$ , ya que es cuando la tobera divergente se comporta de forma aceleradora del flujo.

Con mach = 2.94 las condiciones de estancamiento son:

$$P_0 = 80 \text{ psi} = 551580.583 \text{ Pa}$$

$$T_0 = 27 \text{ }^\circ\text{C} = 300.15 \text{ K}$$

Para encontrar la densidad del aire es necesario utilizar la ecuación 2.4, de los gases ideales que es:

$$Pv = RT \quad (2.4)$$

donde:

*P*: Presión absoluta

*V*: Volumen

*R*: Constante de los gases ideales

*T*: Temperatura absoluta .

Además, dado que:

$$v = 1/\rho \quad (2.5)$$

Así, la presión absoluta se puede expresar por ecuación 2.6.

$$P = \rho \cdot R \cdot T \quad (2.6)$$

Así, para encontrar la presión absoluta se puede utilizar la ecuación 2.7.

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm} \quad (2.7)$$

Sustituyendo en la ecuación 2.77, queda:

$$P_{abs} = 551580.583 \text{ Pa} + 98043.449 \text{ Pa} = 649624.032 \text{ Pa}$$

Además, dado que:

$$T = 300.15 \text{ K}$$

$$R = 283 \frac{m \cdot N}{kg \cdot K}$$

Entonces al despejar la densidad de la ecuación 2.6, ésta queda:

$$\rho_0 = \frac{649624.032 Pa}{283 \frac{m \cdot N}{kg \cdot K} 300.15 K} = 7.652 \frac{kg}{m^3}$$

Con las relaciones isentropicas unidimensionales de la Tabla 2.2, se tiene la ecuación 2.8:

$$\frac{P}{P_{0abs}} = 0.030 \quad (2.8)$$

Entonces sustituyendo en la ecuación 2.8, queda:

$$P = 0.030 * 649624.032 Pa = 19488.721 Pa$$

La cual es la presión absoluta a la salida del inyector.

Despejando la presión manométrica de la ecuación 2.7, esta queda:

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm} \quad (2.9)$$

Sustituyendo en la ecuación 2.9, se tiene:

$$P_{man} = 19488.721 Pa - 98043.449 Pa = -78554.728 Pa$$

Con lo anteriormente realizado se garantiza que la pistola a la entrada generará succión del abrasivo y no una contrapresión en ese punto, facilitando

que las granallas entren libremente por gravedad al cuerpo de la pistola y en si al flujo de aire.

Ahora se pasa a analizar la velocidad con que la granalla saldrá de la boquilla, para determinar a qué velocidad sale la mezcla aire-granalla de la boquilla se utiliza la ecuación 2.10:

$$\dot{m}_t = A_t * V_s * \rho_m \quad (2.10)$$

donde:

At: área transversal de la boquilla

Vs: velocidad de salida

Pm: densidad de la mezcla

Entonces el flujo másico total se puede calcular por la ecuación 2.22:

$$\dot{m}_t = \dot{m}_a * \dot{m}_g \quad (2.11)$$

Para lo cual se necesita calcular los flujos másicos de aire y de granalla. De las relaciones isentropicas obtenidas de la Tabla 2.2, se tiene que:

$$\rho/\rho_0 = 0.081 \quad (2.12)$$

Sustituyendo en la ecuación 2.12, se tiene:

$$\rho = 0.081\rho_0 = 0.081 * 7.652 \frac{kg}{m^3} = 0.620 \frac{kg}{m^3}$$

Con esta densidad del aire se calcula el flujo másico, así:

$$\dot{m} = Q\rho \quad (2.13)$$

Sustituyendo en la ecuación 2.13, se tiene:

$$\dot{m}_a = 0.01887 \frac{m^3}{s} * 0.620 \frac{kg}{m^3} = 0.0117 \frac{kg}{s}$$

Para calcular el flujo de granalla se utiliza un valor de densidad de 4000 kg/m<sup>3</sup>, entonces al sustituir en la ecuación 2.13 de flujo másico, da como resultado.

$$\dot{m}_g = 9.439 * 10^{-6} \frac{m^3}{s} * 4000 \frac{kg}{m^3} = 0.0378 \frac{kg}{s}$$

Por lo que sustituyendo los valores obtenido en la ecuación 2.11, el flujo másico total es:

$$\dot{m}_t = 0.0117 \frac{kg}{s} + 0.0378 \frac{kg}{m^3} = 0.0495 \frac{kg}{s}$$

Ahora despejando la densidad de la mezcla del flujo másico total da como resultado:

$$\rho_m = \frac{\dot{m}_t}{Q_t} = \frac{0.0495 \frac{kg}{s}}{0.01888 \frac{m^3}{s}} = 2.622 \frac{kg}{m^3}$$

Entonces la velocidad de salida, se puede calcular mediante la ecuación 2.14:

$$V_s = \frac{\dot{m}_t}{A_t \rho_M} \quad (2.14)$$

El área transversal de la boquilla se calcula con la ecuación 2.2:

$$A_t = \frac{\pi}{4} (0.00635m)^2 = 3.167 * 10^{-5} m^2$$

Sustituyendo en la ecuación 2.14, queda:

$$V_s = \frac{0.0495 \frac{kg}{s}}{(3.167 * 10^{-5} m^2) (2.622 \frac{kg}{m^3})} = 596 m/s$$

Por lo cual se garantiza que la mezcla aire granalla saldrá a una velocidad elevada, lo que permitirá realizar un trabajo constante de granallado.

Ahora que ya se sabe que el diámetro seleccionado de boquilla, garantizará un flujo a alta velocidad de la mezcla, se prosigue a determinar las otras dimensiones y material de las partes de tal boquilla, el cuerpo e inyector de aire.

Para poder realizar lo anterior, se sabe que la pistola se diseñará para una presión máxima de operación de 175 psi.

La boquilla es la parte que debe tener las mayores propiedades mecánicas como una alta resistencia al desgaste, ya que es por donde la mezcla saldrá a una alta velocidad, por lo cual se debe elegir un material que cumpla con los requerimientos.

Existen diferentes aceros aleados para estas aplicaciones, de la sección anterior se puede observar que el acero más adecuado basado en las características y existencia en el mercado local, el acero SAE 1045 con alta resistencia y alta tenacidad cumple con las expectativas, por lo cual para la boquilla se selecciona el acero SAE 1045, una vista de dicha boquilla se presenta en la Fig. 2.3.

Para encontrar el esfuerzo producido por la presión máxima de operación se considera que la boquilla, el cuerpo e inyector se comportan como un cilindro de pared delgada, con esta consideración se utilizará la ecuación de esfuerzo tangencial que es:

$$\sigma_t = \frac{P \cdot r}{h} \quad (2.15)$$

donde

*P*: presión máxima

*r*: radio interno

*h*: espesor

Las dimensiones de la boquilla son las siguientes:

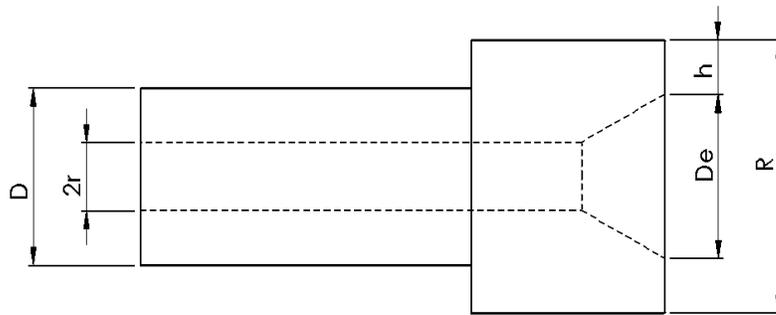


Fig. 2.3. Dimensiones de boquilla:  $r$ : 6.35 mm,  $D_e$ :  $2.4 r = 15.24$  mm y  $R$ : 22 mm.

Así,  $R$  es el diámetro menor de rosca milimétrica M24x2 ya que los tres elementos se ensamblaran entre sí por medio de roscas.

Entonces el espesor  $h$  se puede calcular mediante la ecuación 2.16:

$$h = \frac{R - D_e}{2} \quad (2.16)$$

Sustituyendo en la ecuación 2.16, queda:

$$h = \frac{22\text{mm} - 15.24\text{mm}}{2} = 3.38 \text{ mm}$$

Calculadas las dimensiones se procede a evaluar la ecuación 2.15 de esfuerzo tangencial con un factor de seguridad de 3, lo cual da por resultado:

$$\sigma_t = \frac{3.275 \text{ MPa} * 3.175 \text{ mm}}{3.38 \text{ mm}} = 3.076 \text{ MPa}$$

$$\sigma_t \ll S_y$$

Como se puede observar que el esfuerzo resultante es muchísimo menor que la resistencia de fluencia del material, esto significa que la boquilla no fallara.

Para el cuerpo de la pistola, el material seleccionado será un acero de bajo carbono que exista en el mercado local.

El acero seleccionado es el acero AISI 1045, ya que este acero tiene un esfuerzo de fluencia de:

$$S_y = 210 \text{ MPa}$$

En el mismo sentido, el cuerpo también se tratará como un cilindro de pared delgada por lo que el esfuerzo estará dado por la ecuación 2.16.

Así, a partir de las dimensiones del cuerpo de la pistola que se presentan en la Fig. 2.4.

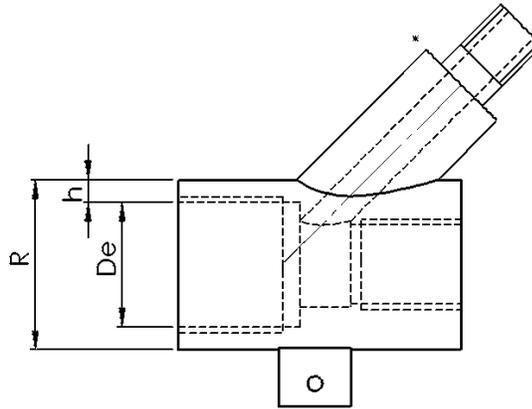


Fig. 2.4 Dimensiones del cuerpo

Se analiza el punto más crítico que es donde se tiene el menor espesor posible.

$$R = 30mm$$

$$De = \text{diámetro exterior de rosca M24x2} = 24 mm$$

$$r = De/2$$

$$h = \text{espesor}$$

Entonces

$$h = R - De/2 \tag{2.17}$$

Sustituyendo se tiene:

$$h = 30 - \frac{24}{2} = 3 mm.$$

Con el espesor determinado se evalúa en la ecuación 2.15 y se obtiene un esfuerzo tangencial resultante, utilizando también un factor de seguridad de 3.

$$\sigma_t = \frac{3.275 \text{ Mpa} * 12 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} = 13.1 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_t \ll S_y$$

El esfuerzo tangencial obtenido es mucho menor que el de la resistencia a la fluencia del material, por lo tanto el cuerpo no fallara con la presión máxima de operación.

## 2.2. DISEÑO DE LA CÁMARA DE DISPARO

Para el diseño de la cámara de disparo se consideraron las siguientes condiciones:

- Deberá ser un espacio cerrado,
- Deberá permitir una distancia máxima de disparo de 300 mm,
- Deberá permitir una buena visibilidad de las partes y del proceso de granallado,
- Deberá permitir la maniobrabilidad para poder hacer el cambio de probetas de prueba y
- La longitud máxima de la pistola será de 120 mm.

Con las condiciones anteriores se procede a calcular las medidas de la cámara de disparo. De lo anterior se tiene que la profundidad de la cámara será la suma de las siguientes dimensiones:

$$L_{disp} + L_{pist} + T_{probeta} = L_{cámara} \quad (2.18)$$

donde:

$L_{disp}$ : distancia máxima de disparo.

$L_{pist}$ : longitud de la pistola.

$T_{probeta}$ : espesor de la probeta más el espesor de la placa de soporte.

Con lo anterior se tiene en cuenta que la longitud será máxima, si se supone que se instalaran en un ángulo horizontal la pistola y la probeta de prueba por lo que la longitud de la cámara se presenta en la Fig. 2.5.

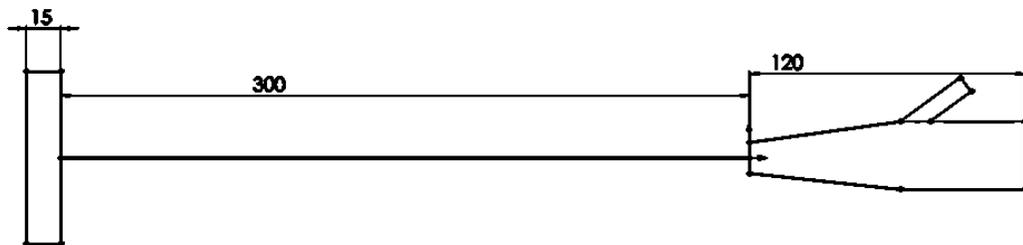


Fig. 2.5. Diagrama de distancias entre pistola y probeta de prueba.

Sustituyendo en la ecuación 2.18, queda:

$$300 \text{ mm} + 120 \text{ mm} + 15 \text{ mm} = 435 \text{ mm}$$

La longitud necesaria de la cámara es de 435 mm, además para que exista un espacio entre el visor y la pistola se diseñará a 500 mm. Para el ancho de la cámara las medidas a tomar en cuenta serán las siguientes.

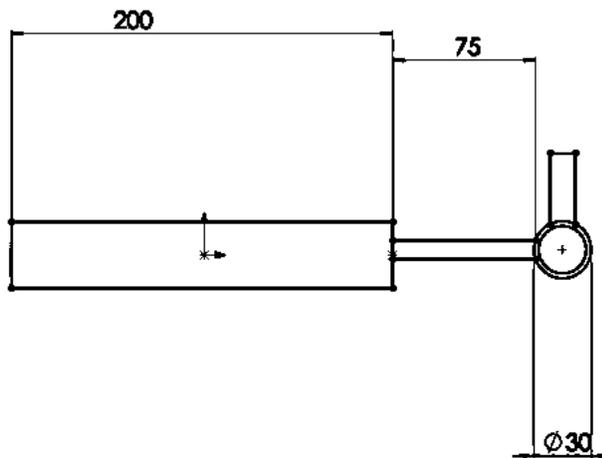


Fig. 2.6. Diagrama de distancias del sistema cilindro pistola

$$L_{cil} + L_{carre} + A_{pist} = A_{cam} \quad (2.19)$$

donde:

$L_{cil}$ : es igual a la longitud del cilindro.

$L_{carre}$ : es igual a la carrera del vástago del cilindro

$A_{pist}$ : es igual al ancho de la pistola

Sustituyendo en la ecuación 2.19, el ancho de la cámara será de:

$$(200 + 76 + 30) \text{ mm} = 306 \text{ mm}$$

En el mismo sentido, para fines de construcción el ancho será de 500 mm.

Por otro lado, la altura de la cámara se tomará en cuenta el ángulo en el cual se instalará la pistola y la distancia máxima de disparo, por lo cual se tiene:

$$\text{Sen } 30^\circ = OP/420 \text{ mm}$$

$$OP = 420 \text{ mm} (\text{sen}30^\circ) = 210 \text{ mm}$$

Si se supone que el rebote de la granalla después del choque con la probeta sale disparada con el mismo ángulo de llegada, entonces se requiere una misma altura hacia abajo para que el impacto final sea siempre en la cámara de disparo y no en la tolva por lo que la altura total será de 420 mm. Así, de la misma forma como se realizó un sobredimensionamiento del ancho de la cámara, para fines de construcción la altura será de 500 mm.

Para el visor de la cámara la ventanilla será de acrílico y estará colocada sobre ranuras para que pueda servir también de compuerta, con el fin de facilitar la vista completa a la mitad de la altura de la cámara de disparo con un ángulo de visión de  $50^\circ$ , esto es debido a que el mejor ángulo para poder observar el proceso es como se presenta en la Fig. 2.7.

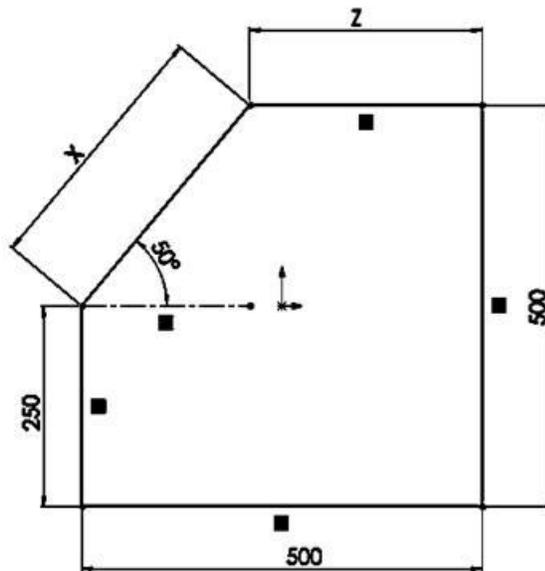


Fig. 2.7. Vista de perfil de la cámara de granallado.

Por trigonometría se tiene que:

$$\frac{250}{X} = \text{sen } 50^\circ$$

$$X = 250 / \text{sen } 50^\circ$$

$$X = 326.35 \text{ mm.}$$

Entonces Z es igual a:

$$Z = 500 - \frac{250}{\tan 50^\circ} = 290.23 \text{ mm}$$

Con las dimensiones obtenidas se puede utilizar comúnmente un espesor de visor de acrílico de 6.35 mm, lo cual permitirá un fácil montaje y desmontaje cuando se tenga que abrir y cerrar la cámara.

### 2.3. DISEÑO DE LA TOLVA RECOLECTORA

La tolva recolectora es la encargada de dirigir el flujo de granalla utilizada hacia el depósito recolector, su forma se presenta en la Fig. 2.8.

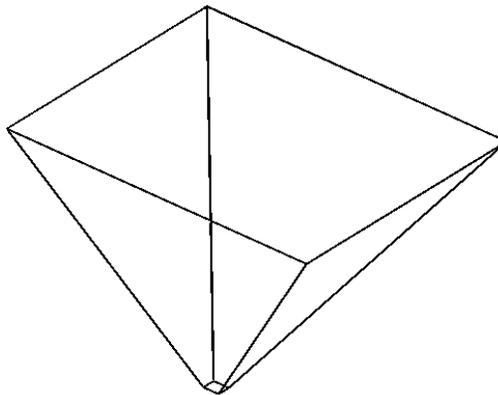


Fig. 2.8. Forma de la tolva recolectora.

Para el diseño de la tolva recolectora se tomaron en cuenta las siguientes condiciones:

- Formará parte de cámara de disparo,

- Tendrá forma de pirámide truncada,
- Con un ángulo con la vertical de 30° y
- Con un orificio de salida de 25.4 mm.

Así, esta se dimensiona tal como se presenta en la Fig. 2.9.

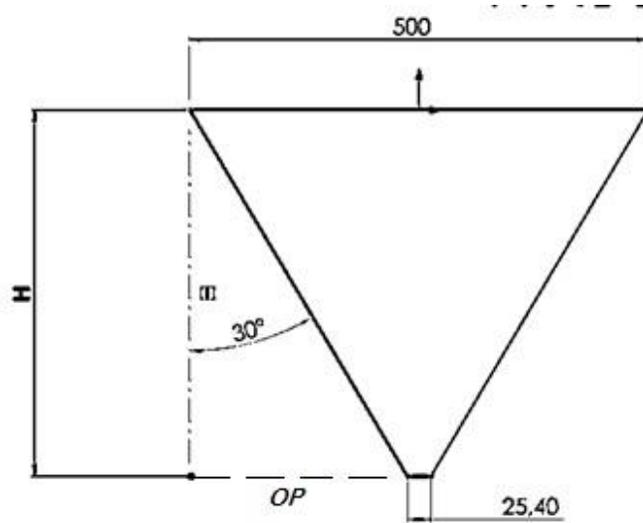


Fig. 2.9. Vista de perfil de la tolva recolectora.

Para la altura se tiene entonces que por trigonometría:

Donde OP es igual a:

$$OP = (500 - 25.4)/2$$

$$OP = 237.30 \text{ mm}$$

Entonces H es igual a

$$\text{Tan}30^\circ = OP/H$$

$$H = OP/\text{tan}30^\circ$$

$$H = 237.30/\text{tan}30^\circ$$

$$H = 411 \text{ mm}$$

En la Fig. 2.10 se presentan las dimensiones del lado opuesto (OP) y la altura (H).

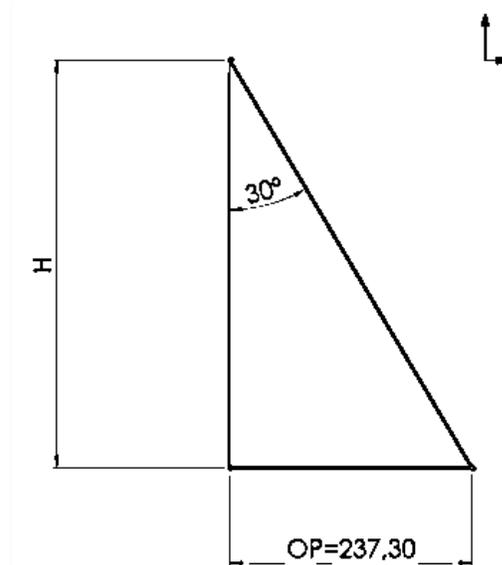


Fig. 2.10. Altura de la tolva recolectora.

Con la cámara de disparo y la tolva ya dimensionadas, las patas de la máquina deberán de tener una altura adecuada para facilitar la visión de una persona promedio, por lo que se ha tomado como base una persona de 1.65 m, la altura de las patas será a 1 m más la altura de la cámara de 0.5 m; es decir, la altura total de la máquina será de 1.5 m.

## 2.4 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRONEUMÁTICO

El movimiento de la pistola es una variable muy importante en el funcionamiento de la máquina granalladora, ya que será éste el encargado de realizar los procesos de granallado de la manera más uniforme.

Los parámetros a tomar en consideración durante el diseño del sistema de movimiento de la pistola, son los siguientes:

*V: velocidad de movimiento, la cual debe ser 0.4 cm/s*

*D: distancia de recorrido, la cual será de 8 cm*

*W: carga a soportar, la cual es de 2.5 kg.*

Para poder cumplir con estos parámetros se debe hacer una correcta selección de los materiales, la propuesta para realizar el movimiento de vaivén de la pistola se presenta en la Fig. 2.11, en la cual se observa tanto el diagrama electroneumático como también el diagrama de escalera.

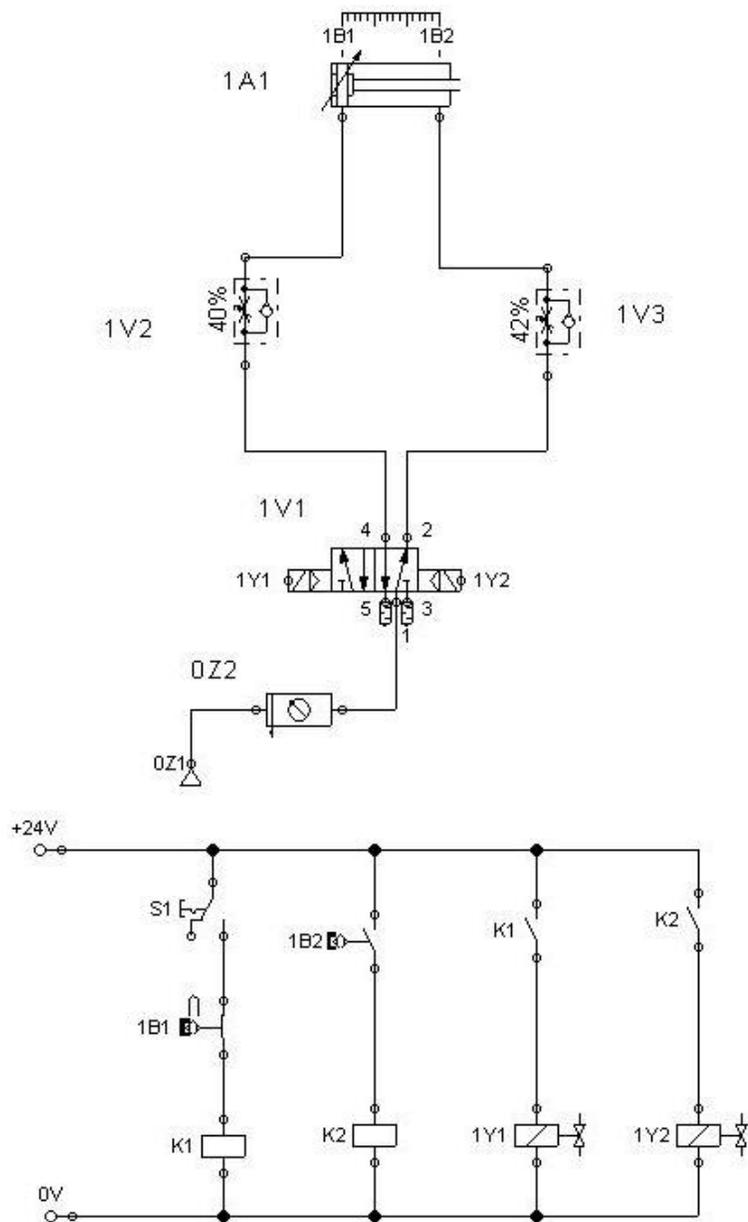


Fig. 2.11. Diagrama electro neumático y diagrama de escalera.

Este diagrama de la Fig. 2.11, posee los accesorios siguientes:

- 1 Unidad de mantenimiento ½ NPT (filtro, regulador, lubricador)
- 1 Electroválvula 5/2 servo pilotada a ambos lados, 24V dc, conexión ¼ NPT.

- 2 Válvulas antiretorno con estrangulamiento de ¼ pulg
- 1 Cilindro de doble efecto, carrera de vástago de 10 cm, ranuras para instalación de sensores red Swicht, conexión ¼ NPT
- 3 metros de manguera de poliuretano de ¼ pulg
- 3 metros de manguera de poliuretano de ½ pulg
- 2 Redes Swicht 24
- 1 Fuente de 24 V dc, Instalación Riel DIM
- 2 Relé de 8 pines
- 2 Bases para relé de 8 pines
- 1 Maneta SPDT
- 4 metros de cable #18 negro
- 4 metros de cable #18 rojo

Con esta selección de elementos para el sistema electroneumático, se finaliza la etapa de diseño del sistema semiautomático de granallado para uso didáctico.

### **3. CONSTRUCCIÓN DE MÁQUINA GRANALLADORA**

En este capítulo se detalla la construcción de la máquina granalladora diseñada en este trabajo de graduación. Para ello, se presentará la construcción agrupada por los diferentes sistemas que constituyen el equipo, luego en cada uno de estos sistemas se presenta el proceso de construcción de sus componentes, tal como se detalla a continuación.

#### **3.1. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA SEMIAUTOMÁTICO DE GRANALADO**

El sistema semiautomático de granallado está constituido por 3 componentes, las cuales son:

- Carcasa,
- Pistola y
- Montaje del sistema electroneumático.

##### **3.1.1. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE CARCASA**

El primer componente que se construyó fue la carcasa, esto fue debido a que para poder realizar las etapas de montaje de la pistola y el sistema electroneumático, es necesario poseer la base donde estos elementos se instalaran. Así, la carcasa está compuesta por:

- Cámara de disparo y tolva recolectora de granalla,
- Tolva de alimentación de granalla y
- Estructura soporte.

La construcción de las diferentes partes que conforman la carcasa se llevo a cabo de manera simultánea. Los diferentes procesos que se llevaron a cabo en la construcción de la carcasa son los siguientes:

- Trazado de lámina,

- Corte de lámina,
- Corte de tubo estructural y
- Soldado de lámina y tubo estructural.

En las Figs. 3.1 y 3.2 se presentan las diferentes etapas del proceso de construcción de la carcasa.



Fig. 3.1. Corte en la cámara de disparo, para la colocación de ventana visor.



Fig. 3.2. Montaje de la estructura soporte.

### 3.1.2 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE PISTOLA

Construida la carcasa de la máquina, se continuó con la parte de maquinado de la pistola de granallado y los accesorios para su montaje, esta etapa se subdividió de la manera siguiente:

- Inyector de aire,
- Cuerpo de pistola,
- Boquilla,
- Riel base y
- Guía de movimiento.

Las 3 piezas que conforman la pistola (inyector, cuerpo y boquilla) están construidas de acero AISI 1045, las cuales están unidas entre sí mediante roscas. En las Figs. 3.3 y 3.4 se presentan algunas etapas del proceso de maquinado de las piezas que constituyen la pistola.

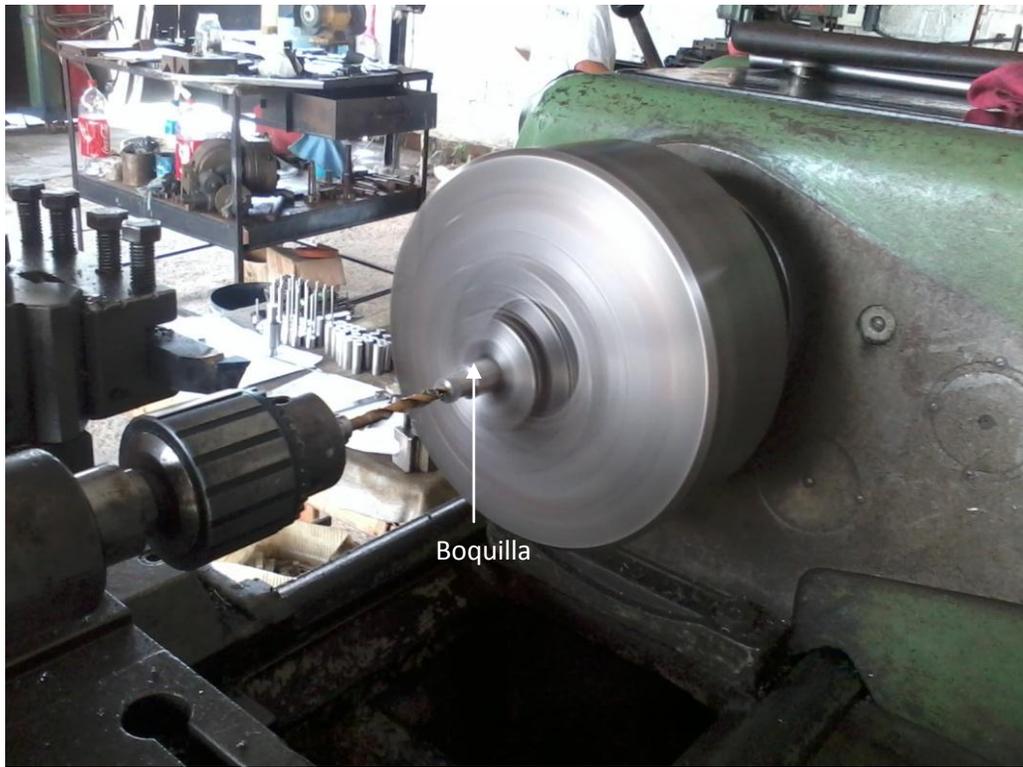


Fig. 3.3. Proceso de maquinado de boquilla.

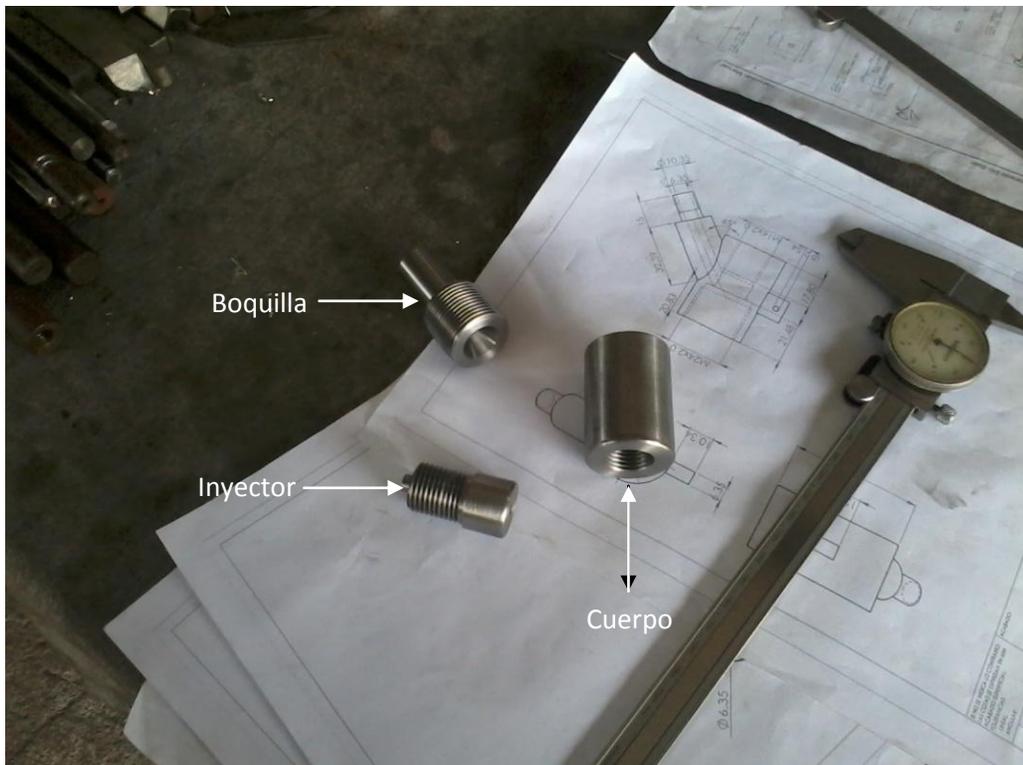


Fig. 3.4. Piezas de la pistola, listas para ser acopladas.

Luego de la construcción de las piezas de la pistola se llevó a cabo la construcción del riel que servirá de base de la pistola y al mismo tiempo sirve para obtener diferentes distancias de la salida de la boquilla a la probeta plana a granallar. Así, para poder observar los detalles de medidas ver los planos en Anexo. En la Fig. 3.5 se presenta el montaje y las partes del riel.



Fig. 3.5. Montaje del riel base de pistola.

Mediante el riel base se puede modificar la distancia de proyección de las granallas, por ello se debe realizar una fabricación y un montaje preciso para poder cuantificar el mismo.

Luego de la construcción del riel base, se realizó el proceso de construcción de la guía del movimiento de la pistola, el cual da la capacidad al sistema de lograr una cobertura total de la probeta a granallar, luego se procedió al montaje de la guía de movimiento. Así, en la Fig. 3.6 se presenta el montaje de la pistola sobre el riel base y éstos sobre la guía de movimiento.

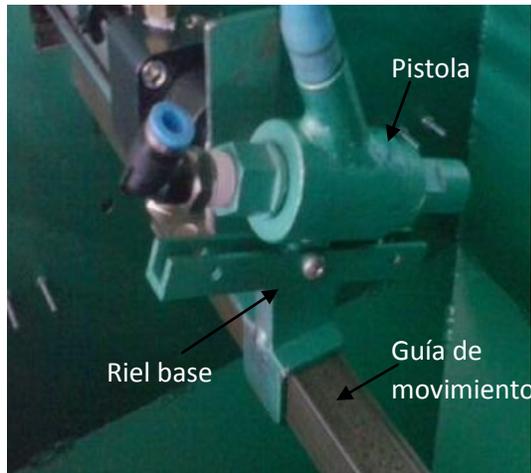


Fig. 3.6. Montaje final de pistola.

### 3.1.3. MONTAJE DE SISTEMA ELECTRONEUMÁTICO

La tercera parte de la construcción de la máquina granalladora es el montaje del sistema de movimiento de la pistola. Este sistema de movimiento seleccionado es electroneumático, el cual se presentó en la sección 2. Así, con el fin de presentar el montaje del sistema electroneumático el proceso se subdivide en las etapas siguientes:

- Montaje de componentes eléctricos (transformador, relés, borneras y breaker),
- Montaje de componentes neumáticos (electroválvula, actuador, unidad de mantenimiento y válvulas de estrangulamiento) y
- Acople de componentes eléctricos y neumáticos.

El primer montaje que se llevó a cabo es el de los componentes eléctricos el cual se presenta en la Fig. 3.7.

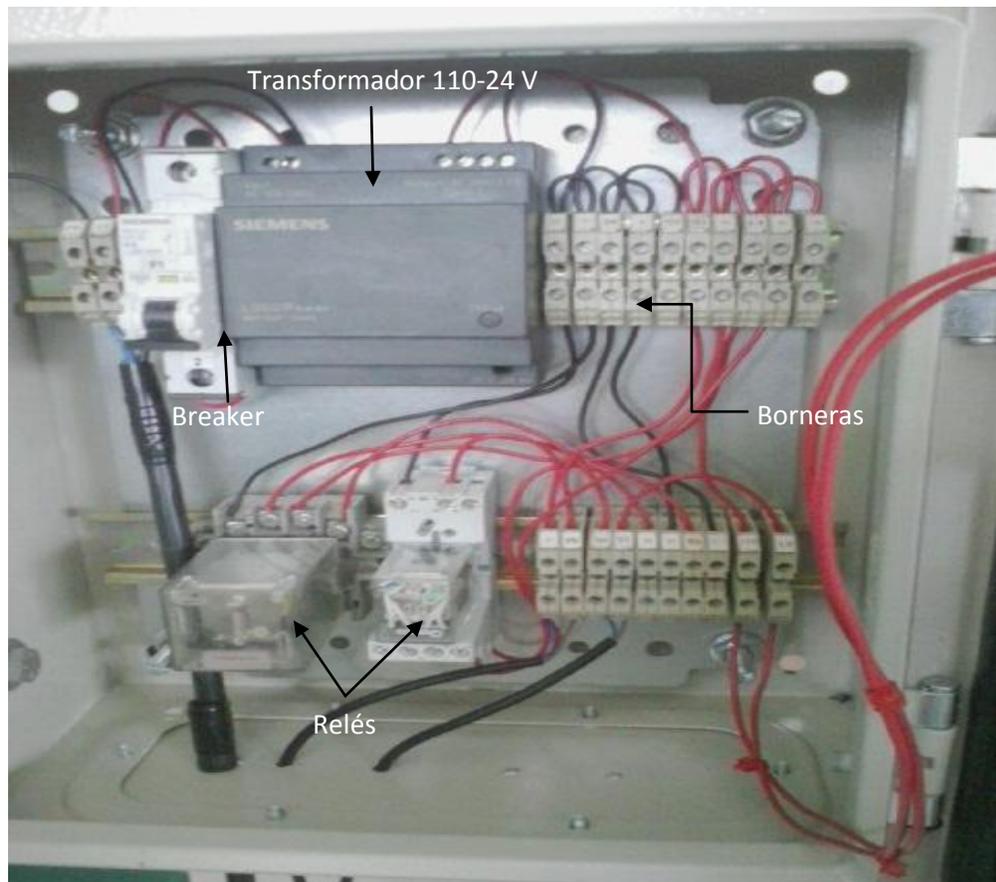


Fig. 3.7. Montaje de sistema eléctrico.

Luego de llevar a cabo el montaje eléctrico, se continuó con el montaje de los componentes neumáticos. Así, en la Fig. 3.8 se presenta el montaje de los componentes neumáticos, con sus cables listos para el acople con el sistema eléctrico.

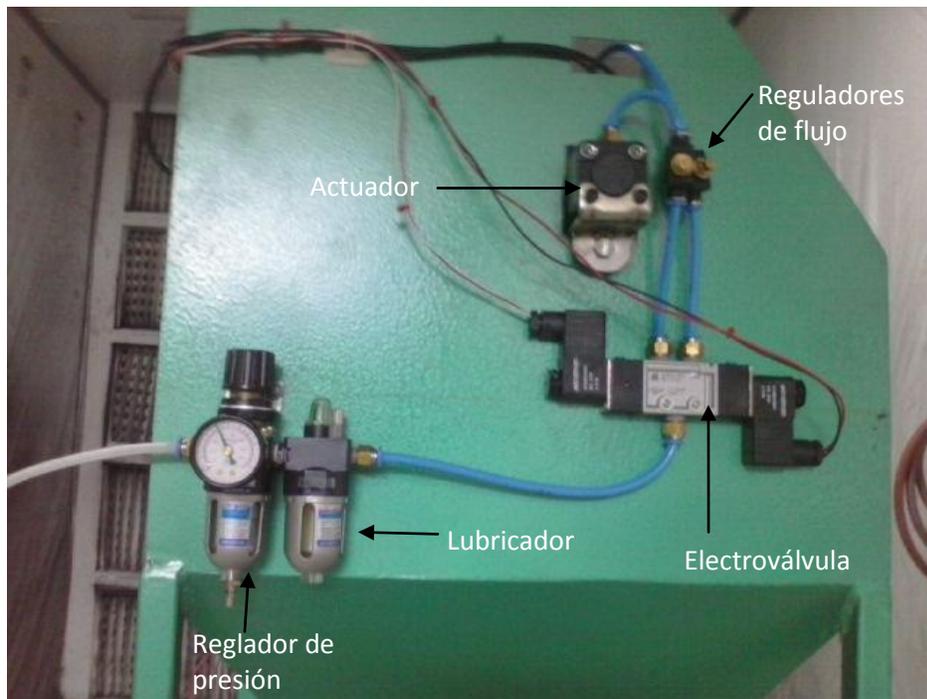


Fig. 3.8. Montaje de sistema neumático.

Luego de la construcción y ensamble de la carcasa, el montaje completo de la pistola y el montaje del sistema electroneumático de movimiento, se finaliza con la construcción del sistema semiautomático de granallado, el cual se presenta en la Fig. 3.9.



Fig. 3.9. Sistema electroneumático de granallado: (a) vista frontal y (b) vista lateral.

#### 4. PUESTA A PUNTO DE LA MÁQUINA GRANALLADORA

La puesta a punto o caracterización del sistema construido se realizó mediante una serie de granallados sobre probetas planas, con el fin de producir deflexiones en las mismas, lo cual indica el grado de efectividad del proceso. Así, en este capítulo se presentan los pasos a seguir para realizar los granallados con sus correspondientes registros y los resultados obtenidos de cada granallado, finalizando con un análisis de los resultados obtenidos.

En este proceso de caracterización del sistema semiautomático de granallado, se estudiaron 3 variables, las cuales son la distancia de granallado (D), ángulo de incidencia de las granallas ( $\theta$ ) y presión de granallado (P). Además, para cada variable se estudiaron 3 condiciones diferentes; es decir 9 condiciones de granallado y para cada condición se granallaran tres probetas. Estas condiciones son:

D<sub>1</sub>: 200.0 mm

D<sub>2</sub>: 161.9 mm

D<sub>3</sub>: 123.8 mm

$\theta_1$ : 17°

$\theta_2$ : 20°

$\theta_3$ : 23°

P<sub>1</sub>: 80 psi

P<sub>2</sub>: 90 psi

P<sub>3</sub>: 100 psi

Es importante destacar que para este estudio se mantuvieron constantes otros parámetros que en algunos casos pudiesen ser considerados de suma importancia. Estos parámetros que se mantuvieron constantes son.

- La velocidad de desplazamiento de la pistola, la cual se controló con las válvulas estranguladoras de flujo, la cual fue establecida en el diseño a un valor 0.10 m/s.
- La carga de granalla, la cual es de 1.24 kg, la cual establece la cantidad de granallas que impactarán cada probeta de estudio.

A continuación se presenta los pasos generales para la utilización del sistema semiautomático de granallado (ver Fig. 4.1).

- a) Encender el compresor,
- b) Revisar que las mangueras de aire estén bien conectadas (1, Fig. 4.1.a),
- c) Montar probeta al sistema de sujeción (2, Fig. 4.1.a),
- d) Depositar las granallas en la tolva de alimentación (3, Fig. 4.1.b),
- e) Conectar el sistema eléctrico a un tomacorriente de 110 V ac,
- f) Abrir la válvula de alimentación de la máquina,
- g) Verificar que la guía de movimiento de la pistola este lubricada,
- h) Regular el ángulo de disparo al requerido,
- i) Posicionar la pistola a la distancia requerida (4, Fig. 4.1.a),
- j) Abrir el regulador de presión y controlar la presión de trabajo utilizando el manómetro (5, Fig. 4.1.b),
- k) Energizar el sistema eléctrico haciendo girar la maneta que se ubica en el gabinete de control,
- l) Abrir la válvula de salida de la tolva de alimentación (6, Fig. 4.1.b),
- m) Cuando la carga de granalla se haya terminado, desenergizar el sistema, moviendo la maneta ubicada en el panel de control,
- n) Retirar la probeta granallada del sistema de sujeción.
- o) Efectuar el procedimiento de medición para determinar la deflexión producida.

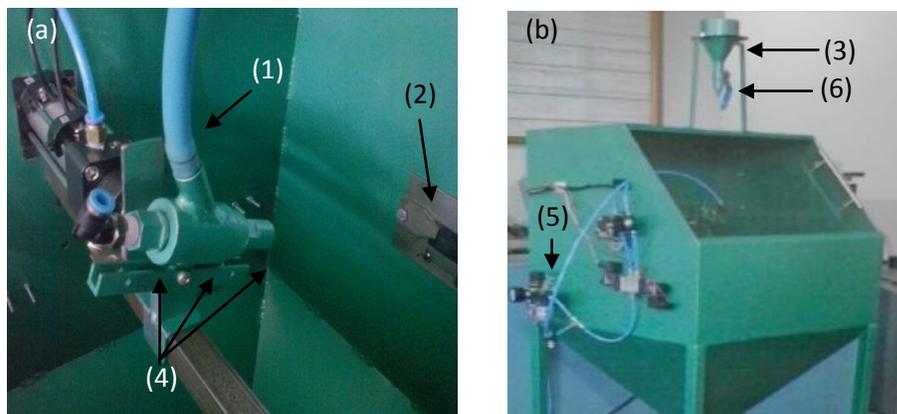


Fig. 4.1. Sistema semiautomático de granallado (a) parte interna y (b) parte externa de la máquina.

Para llevar a cabo el procedimiento de medición de la deflexión en las probetas granalladas fue necesario disponer de los siguientes instrumentos:

- Tornillo micrométrico,
- Lámina o probeta auxiliar y
- Probeta a granallar.

El procedimiento utilizado para determinar las deflexiones obtenidas mediante el proceso de granallado se presenta a continuación (Ver Fig. 4.2):

- Medir espesor del conjunto (lámina auxiliar + lámina sin granallar)
- Medir el espesor total (lámina auxiliar + lámina granallada)
- Hacer la diferencia (espesor total – espesor del conjunto).

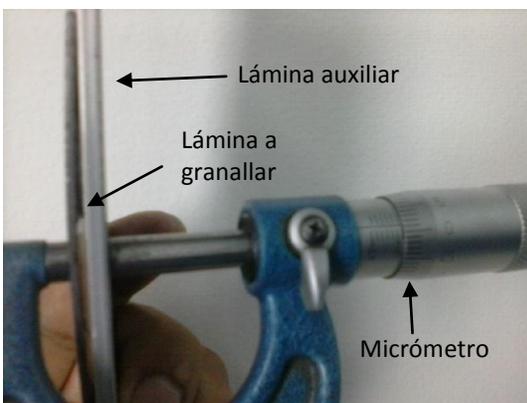


Fig. 4.2. Procedimiento de medición con el tornillo micrométrico.

Luego de presentado el procedimiento de medición, se presentan los 3 casos de estudio de granallado. Así, como su procedimiento a seguir durante la realización de los ensayos.

#### **4.1. GRANALLADOS A TRES DISTANCIAS DE DISPARO**

Para este caso se tienen como parámetros constantes los siguientes:

Presión de trabajo = 90 psi

Ángulo de disparo =  $20^\circ$

A continuación se presentan los pasos necesarios para realizar los primeros ensayos del sistema semiautomático de granallado, estos son:

- a) Encender el compresor,
- b) Revisar que las mangueras de aire estén bien conectadas,
- c) Depositar las granallas en la tolva de alimentación,
- d) Conectar el sistema eléctrico a un tomacorriente de 110 V ac,
- e) Abrir la válvula de alimentación de la máquina,
- f) Verificar que el eje de movimiento de la pistola este lubricado,
- g) Regular la presión de trabajo a 90 psi (para esto girar la válvula del regulador de presión de la unidad de mantenimiento),
- h) Posicionar la pistola de granallado en el agujero 3 del riel base, con el fin de obtener la distancia de granallado ( $D_1$ ),
- i) Ubicar probeta a granallar en las bridas de sujeción,
- j) Encender el sistema eléctrico con la maneta que se ubica en el gabinete de control,
- k) Abrir la válvula de salida del depósito de alimentación,
- l) Cuando la carga de granalla se haya terminado, desenergizar el sistema moviendo la maneta ubicada en el panel de control,
- m) Recolectar la granalla abriendo la válvula inferior de descarga,
- n) Depositar las granallas en la tolva de alimentación,
- o) Repetir los pasos del “j” al “n” por 4 veces,
- p) Retirar la probeta granallada,
- q) Efectuar el procedimiento de medición,
- r) Anotar los resultados en la Tabla 4.1,
- s) Repetir los pasos del “i” al “r” por 3 veces,
- t) Repetir los pasos del “h” al “s” ahora posicionando la pistola de granallado en el agujero central del riel base ( $D_2$ ) y
- u) Repetir los pasos del “h” al “s” ahora posicionando la pistola de granallado en el agujero más cercano del riel base a la lámina a granallar ( $D_3$ ).

En la Tabla 4.1 se presenta los resultados de los granallados variando la distancia de granallado.

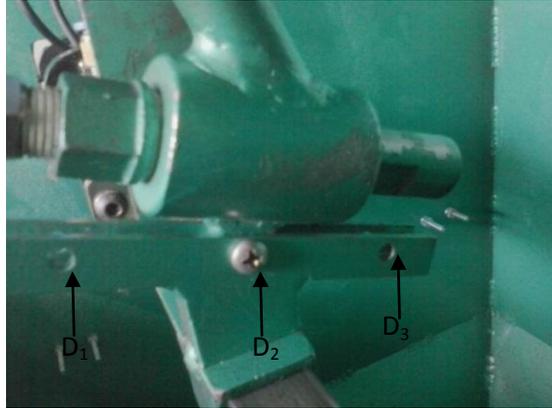


Fig. 4.3. Variación de la distancia de granallado.

Tabla 4.1. Deflexiones en mm, por probetas y su correspondiente promedio y desviación estándar para tres distancias de granallado.

Distancia	Probeta # 1, mm	Probeta # 2, mm	Probeta # 3, mm	Promedio, mm	DE, mm
D <sub>1</sub>	0.59	0.62	0.61	0.61	0.0072
D <sub>2</sub>	0.64	0.66	0.68	0.66	0.0094
D <sub>3</sub>	0.72	0.66	0.72	0.70	0.0163

En la Fig. 4.4 se presenta la gráfica distancia de granallado vs deflexión promedio obtenida.

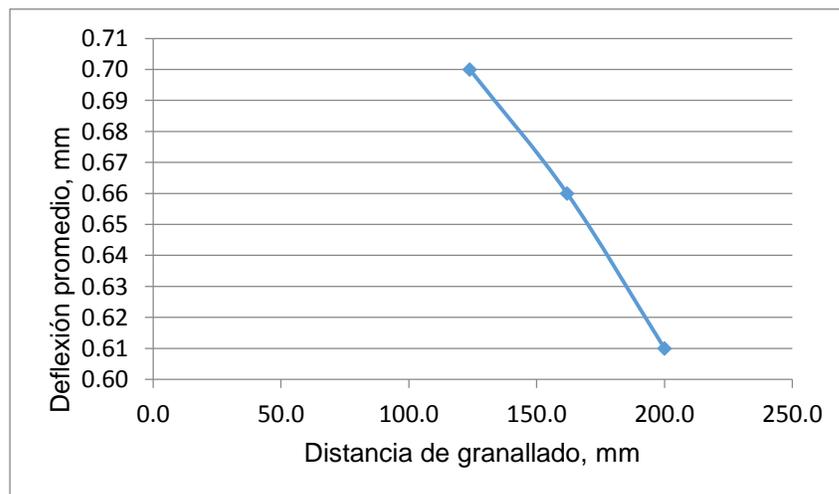


Fig. 4.4. Gráfico distancia de granallado vs deflexión promedio obtenida.

## 4.2. GRANALLADOS A TRES ÁNGULO DE INCIDENCIA DE GRANALLADO

En estos granallados se tomó como parámetros constantes, los siguientes:

Presión de trabajo = 90 psi

Distancia de disparo =  $D_2$ .

A continuación se presentan los pasos necesarios para realizar los segundos ensayo del sistema semiautomático de granallado, estos son:

- a) Encender el compresor,
- b) Revisar que las mangueras de aire estén bien conectadas,
- c) Depositar las granallas en la tolva de alimentación,
- d) Conectar el sistema eléctrico a un tomacorriente de 110 V ac,
- e) Abrir la válvula de alimentación de la máquina,
- f) Verificar que el eje de movimiento de la pistola este lubricado,
- g) Regular la presión de trabajo a 90 psi (para esto girar la válvula del regulador de presión de la unidad de mantenimiento),
- h) Posicionar la pistola en el ángulo de disparo en  $17^\circ$  ( $\theta_1$ ), para esto utilizar la cuña de variación de ángulo de incidencia en la parte superior ver Fig. 4.5.
- i) Ubicar la probeta a granallar en las bridas de sujeción,
- j) Encender el sistema eléctrico con la maneta que se ubica en el gabinete de control,
- k) Abrir la válvula de salida del depósito de alimentación,
- l) Cuando la carga de granalla se haya terminado, desenergizar el sistema moviendo la maneta ubicada en el panel de control,
- m) Recolectar la granalla abriendo la válvula inferior de descarga,
- n) Depositar las granallas en la tolva de alimentación,
- o) Repetir los pasos del “j” al “n” por 4 veces,
- p) Retirar la lámina granallada,

- q) Efectuar el procedimiento de medición,
- r) Anotar los resultados en la Tabla 4.2,
- s) Repetir los pasos del “i” al “r” por 3 veces,
- t) Repetir los pasos del “h” al “s” ahora posicionando la pistola de granallado en  $20^\circ$  ( $\theta_2$ ),
- u) Repetir los pasos del “h” al “s” ahora posicionando la pistola de granallado en  $23^\circ$  ( $\theta_3$ ),

En la Tabla 4.2 se presenta los resultados de los granallados variando el ángulo de incidencia de granallado.



Fig. 4.5. Cuña de variación de ángulo de incidencia.

Tabla 4.2. Deflexiones en mm, por probetas y su correspondiente promedio y desviación estándar para tres ángulos de incidencia de las granallas.

Ángulo de incidencia	Probeta # 1, mm	Probeta # 2, mm	Probeta # 3, mm	Promedio, mm	DE, mm
$\theta_1$	0.76	0.78	0.78	0.77	0.0054
$\theta_2$	0.79	0.79	0.79	0.79	0.0000
$\theta_3$	0.66	0.72	0.68	0.69	0.0018

En la Fig. 4.6 se presenta la gráfica ángulo de incidencia vs deflexión promedio obtenida.

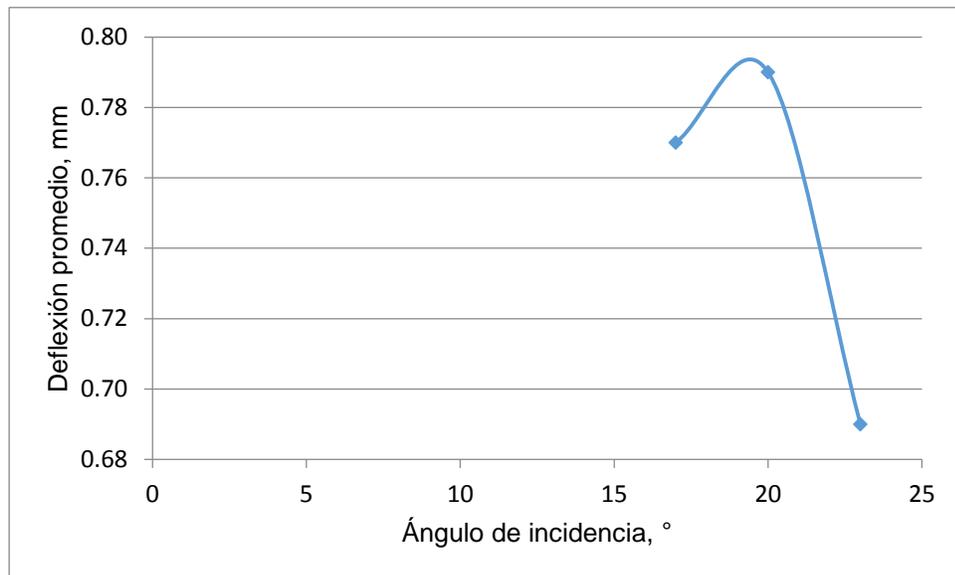


Fig. 4.6. Gráfico ángulo de incidencia vs deflexión promedio obtenida.

### 4.3. GRANALLADOS A TRES PRESIONES DE INYECCIÓN

En estos granallados se toma como parámetros constantes los siguientes:

Distancia de disparo =  $D_2$

Ángulo de incidencia =  $20^\circ$

A continuación se presentan los pasos necesarios para realizar los terceros ensayos del sistema semiautomático de granallado, estos son:

- a) Encender el compresor,
- b) Revisar que las mangueras de aire estén bien conectadas,
- c) Depositar las granallas en la tolva de alimentación,
- d) Conectar el sistema eléctrico a un tomacorriente de 110 V ac,
- e) Abrir la válvula de alimentación de la máquina,
- f) Verificar que el eje de movimiento de la pistola este lubricado,
- g) Posicionar la pistola de granallado a la distancia de granallado ( $D_2$ ),
- h) Posicionar la pistola en el ángulo de disparo en  $20^\circ$  ( $\theta_2$ ),

- i) Regular la presión de trabajo a 80 psi (para esto girar la válvula del regulador de presión de la unidad de mantenimiento) ver Fig. 4.7,
- j) Ubicar la probeta a granallar en bridas de sujeción,
- k) Encender el sistema eléctrico con la maneta que se ubica en el gabinete de control,
- l) Abrir la válvula de salida del depósito de alimentación,
- m) Cuando la carga de granalla se haya terminado, desenergizar el sistema moviendo la maneta ubicada en el panel de control,
- n) Recolectar la granalla abriendo la válvula inferior de descarga,
- o) Depositar las granallas en la tolva de alimentación,
- p) Repetir los pasos del “k” al “o” por 4 veces,
- q) Retirar la lámina granallada,
- r) Efectuar el procedimiento de medición,
- s) Anotar los resultados en la Tabla 4.3,
- t) Repetir los pasos del “j” al “s” por 3 veces,
- u) Repetir los pasos del “i” al “t” ahora abriendo el regulador de presión hasta 90 psi ( $P_2$ ) y
- v) Repetir los pasos del “i” al “t” ahora abriendo el regulador de presión hasta 100 psi ( $P_3$ ).

En la Tabla 4.3 se presenta los resultados de los granallados variando la presión de inyección.



Fig. 4.7. Regulador de presión

Tabla 4.3. Deflexiones en mm, por probetas y su correspondiente promedio y desviación estándar para tres presiones de inyección de granalla.

Presión	Probeta # 1, mm	Probeta # 2, mm	Probeta # 3, mm	Promedio, mm	DS, mm
P <sub>1</sub>	0.65	0.66	0.67	0.66	0.0047
P <sub>2</sub>	0.77	0.79	0.75	0.77	0.0942
P <sub>3</sub>	0.87	0.83	0.85	0.85	0.3196

En la Fig. 4.8 se presenta la gráfica presión de trabajo vs deflexión promedio obtenida.

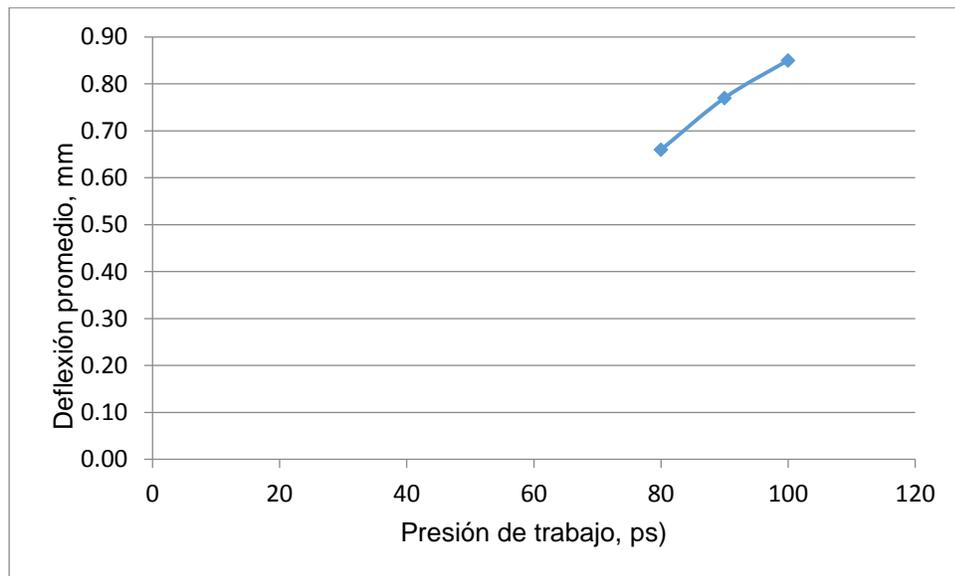


Fig. 4.8. Gráfico presión de trabajo vs deflexión promedio obtenida.

#### 4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se describió previamente el valor importante para la caracterización del sistema de granallado construido es la deflexión producida en las probetas granalladas para cada una de las variables utilizadas. Así, en base a los resultados promedios obtenidos se puede concluir que:

- 1) La distancia de granallado que causa una mayor deflexión en las probetas plana, es la distancia de 123.8 mm (D<sub>3</sub>),

- 2) El ángulo de incidencia de las granallas que causa una mayor deflexión en las probetas, es el ángulo de incidencia de  $20^\circ$  ( $\Theta_2$ ), lo cual está de acuerdo con los resultados reportados en la literatura <sup>[1]</sup>.
- 3) La presión de inyección o de trabajo que causa una mayor deflexión en las probetas, es la presión de inyección de 100 psi ( $P_3$ ) <sup>[1]</sup>.



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**DEPTO DE MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN**  
**ASIGNATURA:** \_\_\_\_\_  
**CICLO** \_\_ **AÑO** \_\_\_\_\_

## **5. GUÍA DE LABORATORIO: PROCESO DE GRANALLADO**

### **INTRODUCCIÓN**

El granallado (en Ingles *Shot peening*) es un tratamiento superficial que consiste en trabajar en frío un metal, impactando directamente contra este una corriente de granallas de forma esférica. Esta acción es equivalente a ejercer pequeños martilleos sobre la superficie del metal, lo que ocasiona un incremento en la resistencia mecánica por deformación plástica <sup>[2]</sup>.

Después de aplicado el tratamiento superficial, la superficie del metal queda inducido con un campo de esfuerzos residuales de compresión lo cual es sumamente benéfico para evitar la nucleación y grietas por fatiga <sup>[3]</sup>.

### **OBJETIVO GENERAL**

Que el estudiante de ingeniería mecánica pueda realizar procesos de granallado y verificar la deflexión de las probetas utilizadas.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Que el estudiante conozca los elementos básicos de un sistema de granallado
- Que el estudiante pueda fijar los parámetros de un proceso de granallado en probetas de hierro dulce de 75.00 mm de largo, 24.00 mm de ancho y 1.53 mm de espesor.

## **EQUIPO A UTILIZAR**

Los equipos necesarios para desarrollar la práctica del laboratorio son:

- Máquina Granalladora
- Compresor de aire de 90-125 psi
- Desarmador Phillips
- Micrómetro de 0-25 mm
- 1/16 galones de aceite SAE10
- 3 probetas planas (lámina) de hierro dulce de 75.00 x 24.00 x 1.53 mm
- Lámina auxiliar.

## **PROCEDIMIENTO**

Para llevar a cabo los ensayos a realizar en el sistema de granallado es necesario definir parámetros constantes, así como el procedimiento de medición a utilizar.

## **PARÁMETROS CONSTANTES**

Estos parámetros son:

- Velocidad de pistola:  $V_p = 0.10$  m/s
- Carga de granalla:  $W_g = 1.24$  kg

- Velocidad de granalla:  $V_g = 70$  m/s

## VARIABLES INDEPENDIENTES

Las variables que se presentan a continuación son de diseño y son las que hacen cumplir que el sistema de granallado funcione para las 3 variables, las cuales son:

- Distancia proyección de la granalla (D): 200,0 161.9 ó 123.8 mm
- Ángulo de incidencia ( $\theta$ ): 17, 20 ó 23°
- Presión de inyección (P): 80, 90 ó 100 psi.

## PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN UTILIZADO

El procedimiento utilizado para determinar las deflexiones obtenidas mediante el proceso de granallado se presenta a continuación (Ver Fig. 5.1):

- Medir espesor del conjunto (lámina auxiliar + probeta sin granallar)
- Medir el espesor total (lámina auxiliar + probeta granallada)
- Hacer la diferencia (espesor total– espesor del conjunto).

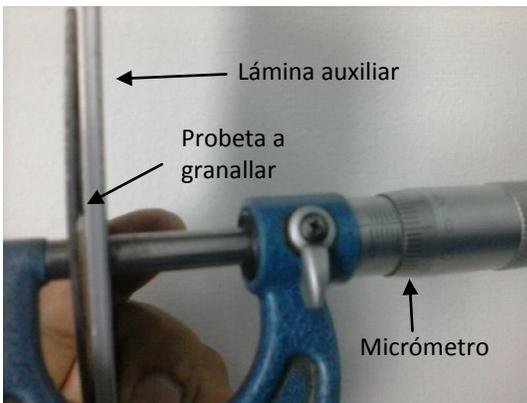


Fig. 5.1. Procedimiento de medición con el tornillo micrométrico.

## PROCEDIMIENTO DE GRANALLADO

Para una mejor comprensión de las indicaciones del procedimiento de granallado, se hace referencia a cada uno de los elementos en la Fig. 5.2.

- p) Encender el compresor,
- q) Revisar que las mangueras de aire (1) estén bien conectadas,
- r) Montar probeta al sistema de sujeción (2),
- s) Depositar las granallas en la tolva de alimentación (3),
- t) Conectar el sistema eléctrico a un tomacorriente de 110 V ac,
- u) Abrir la válvula de alimentación de la máquina,
- v) Verificar que la guía de movimiento (7) de la pistola este lubricada,
- w) Regular el ángulo de disparo al requerido (8),
- x) Posicionar la pistola a la distancia requerida (4),
- y) Abrir el regulador de presión y controlar la presión de trabajo utilizando el manómetro (5),
- z) Energizar el sistema eléctrico haciendo girar la maneta que se ubica en el gabinete de control,
- aa) Abrir la válvula de salida de la tolva de alimentación (6),
- bb) Cuando la carga de granalla se haya terminado, desenergizar el sistema, moviendo la maneta ubicada en el panel de control,
- cc) Retirar la probeta granallada del sistema de sujeción (2).
- dd) Efectuar el procedimiento de medición para determinar la deflexión producida, tal como se indica en la sección 5.3.
- ee) Anotar los resultados en la Tabla 5.1.
- ff) Repetir los pasos del “h” al “o” según el número de probetas que se vaya a granallar.

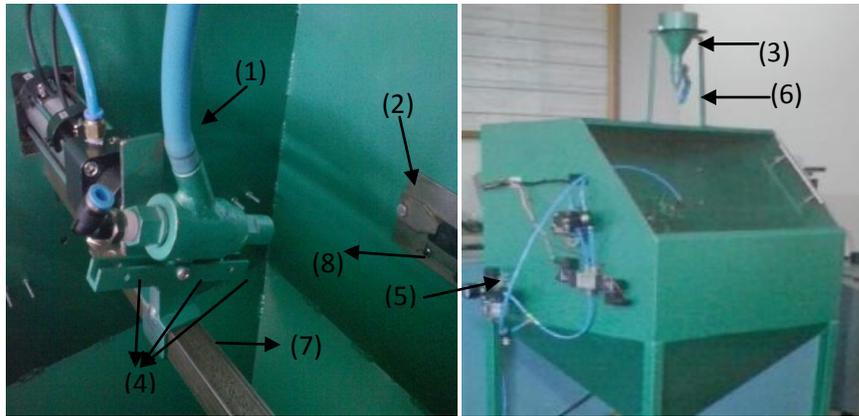


Fig. 5.2. Sistema semiautomático de granallado.

Tabla 5.1. Registro de los parámetros del granallado y resultados obtenidos.

Probeta #	1	2	3
Distancia de granallado, mm			
Ángulo de incidencia de las granallas, °			
Presión de inyección, psi			
Carga de granallado, kg			
Espesor del conjunto, mm			
Espesor total			
Deflexión, mm			

Nota: reproduzca la cantidad de tabla requeridas en base al número de probetas a ensayar.



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**DEPTO DE MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN**

## **6. GUÍA DE MANTENIMIENTO DE LA MÁQUINA DE GRANALLADO**

El mantenimiento de este sistema de granallado es de fundamental importancia para garantizar el cumplimiento de la vida útil de cada componente, así como para lograr la mayor eficiencia del proceso de granallado.

El programa de mantenimiento de este sistema semiautomático de granallado para uso didáctico está basado bajo la filosofía de “mantenimiento por horas de utilización del recurso”.

El programa de mantenimiento consta de 2 procedimientos, el primero será un check list antes de iniciar un procedimiento de granallado.

### **CHECK LIST**

Más que ser un mantenimiento es una revisión que debe realizarse antes de iniciar un procedimiento de granallado, los insumos necesarios y las tareas a efectuar se detallan a continuación (ver, Fig. 6.1):

- 1/8 galón de aceite SAE 10,
- 1 bote de limpiador de contactos,
- 1 metro de manguera de poliuretano de 1/8 de pulgada de diámetro,
- 4 libras de paño para limpieza,

- a) Revisión general de mangueras de aire comprimido (1), al detectar fugas o mal estado de las mismas realizar su cambio,
- b) Revisar el nivel del aceite (2) del lubricador, este nivel no debe ser menor a 1/3 del volumen del depósito,
- c) Realizar limpieza a sistema eléctrico, utilizar limpiador de contactos,
- d) Lubricación de eje guía de pistola (3),
- e) Realizar limpieza externa e interna a la máquina y
- f) Poner el equipo a trabajar.

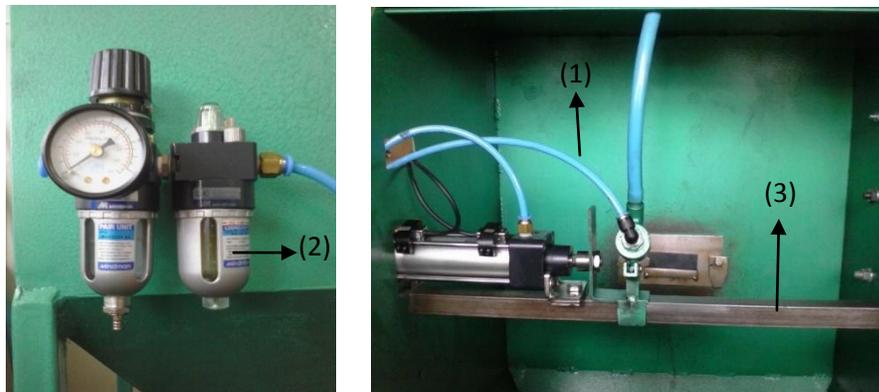


Fig. 6.1. Check list sistema semiautomático de granallado.

## MANTENIMIENTO PREVENTIVO CADA 90 HORAS DE TRABAJO

El mantenimiento luego de 90 horas de trabajo está calculado para haber realizado 50 lotes de láminas granalladas, ya que a estas horas de trabajo se pronostica un leve desgaste en partes de suma importancia del equipo; los insumos, repuestos y tareas a realizar se detallan a continuación.

## INSUMOS Y REPUESTOS

Estos son los insumos y repuestos calculados a utilizar en un mantenimiento después de 90 horas de trabajo:

- 1/8 galón de aceite SAE 10w para unidades lubricadoras de aire comprimido,

- 1 bote de limpiador de contactos,
- 1 metro de manguera de poliuretano de 1/8 de pulgada de diámetro,
- 4 libras de paño para limpieza,
- 1 manómetro de 0 - 175 psi y
- 2 sensores magnéticos,
- 1 boquilla de granallado y
- 1 ventana visor.

## **TAREAS DE MANTENIMIENTO**

Para una mejor comprensión de las indicaciones de las tareas de mantenimiento, se hace referencia a cada uno de los elementos en la Fig. 6.2.

- a) Revisión general de mangueras de aire comprimido (1), al detectar fugas o mal estado de las mismas realizar su cambio,
- b) Realizar el cambio del aceite de la unidad lubricadora (2),
- c) Revisión del funcionamiento del manómetro (3) de la si no funciona realizar su cambio,
- d) Realizar limpieza a sistema eléctrico (4), utilizar limpiador de contactos,
- e) Revisión de ventana visor, si afecta a la visibilidad del proceso realizar su limpieza o cambio si es necesario,
- f) Lubricación de eje guía de pistola (5),
- g) Revisión de funcionamiento de sensores magnéticos (6) de posición, de no funcionar realizar su cambio,
- h) Desmontar y revisar desgaste en boquilla de pistola (7), el desgaste máximo permisible es  $\frac{1}{2}$  diámetro inicial de la boquilla (revisar capítulo 2).
- i) Realizar limpieza externa e interna a la máquina,
- j) Realizar prueba en vacío a la máquina (alimentarla de aire comprimido, activar sistema eléctrico, verificar su funcionamiento) y
- k) Dejar el área de trabajo limpia y ordenada.

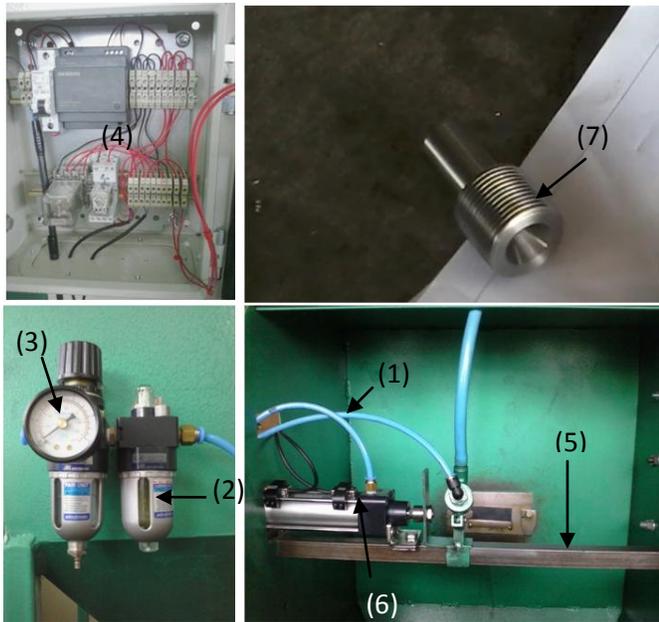


Fig. 6.2. Elementos de la máquina granalladora a verificar cada 90 horas de trabajo.

## CONCLUSIONES

Del desarrollo de este trabajo de graduación se concluye que:

- 1) Se diseño, construyo y comprobó el funcionamiento de un sistema semiautomática de granallado caracterizándolo con 3 variables (distancia de proyección, ángulo de incidencia y presión de granallado, con satisfacción.
- 2) Se comprobó que las variables que causan la mayor deflexión a una probeta plana de hierro dulce de espesor de 1.51 mm son: 123.8 mm de distancia de disparo,  $20^{\circ}$  el ángulo de incidencia y una presión de granallado de 100 psi.

## RECOMENDACIONES

Las siguientes sugerencias son mejoras la máquina Granalladora, así como ampliar las utilidades de la misma:

- Se puede reemplazar el sistema de sujeción de las láminas para poder utilizar una amplia variedad de probetas, para el caso tener la dualidad de probetas cilíndricas y planas.
- La base de 3 distancias y la regulación de presión se puede aumentar para así tener más distancias y más presiones de trabajo para granallar y así poder obtener gráficas del comportamiento del granallado con estas variables.

## BIBLIOGRAFIA

1. H. J. Plaster "Technical aspects of shot- peening machinery and media"  
*Chairman British Impact Treatment Association.*
2. Zaldivar-González. E. Urriolagoitia-Calderón, G. Hernández-Gómez, L. H. Urriolagoitia-Sosa, G. Bautista-Camino. V, "Comparación y evaluación del Shot Peening con otros tratamientos superficiales". *Segundo Congreso Científico Tecnológico Je /A/E.* 2007.
3. Enger, P. A. "Impact wear of Material". Ed. Elsevier Scientific Publishing Company, 1970.
4. Kostilnik. T. Shot peening: Surface Engineering. ASM Handbook. ASM International, Vol. 5, pp 278-302, 1994.
5. Champaigne J. "Shot peening overview" Electronics Inc., January 2001.
6. Thales M. Watanabe, "el proceso de granallado", Industria de Fundição Tupy Ltda.
7. SAE J442 "*Test strip, holder and gage for shot peening*" Society of Automotive Engineers, January 1995.
8. SAE J443 "*Procedures for using standard shot peening test strip*" Society of Automotive Engineers, January 1984.
9. The Shot Peener Staff "*Recycled glass for grit Blasting*" The Shot Peener. Vol. 19, Issue 3, Summer 2005.
10. The Shot Peener Staff "*Recycled glass for shot Blasting*" The Shot Peener. Vol. 19, Issue 2, Spring 2005.
11. The Shot Peener Staff "*Recycled glass gives aqueduct a smooth finish*" The Shot Peener. Vol. 19. Issue 4. Fall 2005.
12. Kirk D., Abyaneh M. "*Theoretical basis of shot peening coverage control*" The Shot Peener, Vol. 13, Issue 3, Fall 1999.
13. Happ M.. Rumpf D. "*Ahnen Strip Variability: A Statistical Treatment*" Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Shot Peening. San Francisco, USA, 1996. pp. 302-311.

14. VacuBlast Corporation "*Shot peening nozzle performance*" VacuBlast Corporation 1967.

## GLOSARIO

**Fatiga:** disminución de la resistencia mecánica de los materiales al someterlos a esfuerzos repetidos.

Proceso de tracción: esfuerzo interno a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.

**Límite de grano:** es la superficie de separación entre dos cristales de un mismo gran policristal.

**Deformación plástica:** Modo de deformación en que el material no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada. Esto sucede porque, en la deformación plástica, el material experimenta cambios termodinámicos irreversibles al adquirir mayor energía potencial elástica.

**Microestructura:** Estructura micrográfica detallada de un sólido, en especial de un mineral o de un metal.

**Boquilla:** Orificio de salida de un cuerpo.

**Inyector:** es un dispositivo utilizado para bombear fluidos utilizando el efecto Venturi.

**Esfuerzos residuales:** Esfuerzos existentes en el material sin la aplicación de cargas externas.

**Tobera:** es un dispositivo que convierte la energía térmica y de presión de un fluido (conocida como entalpía) en energía cinética.

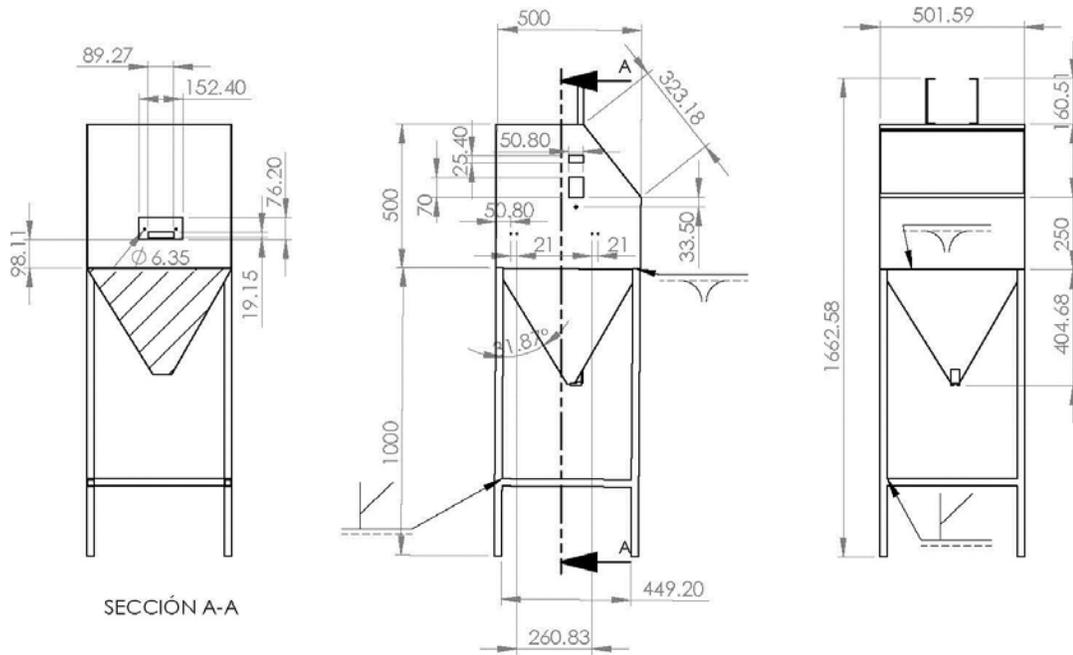
**Corrosión:** Desgaste total o parcial que destruye, disuelve o ablanda cualquier sustancia por reacción química o electroquímica superficial a partir de agentes del medio ambiente. El término corrosión se aplica también a la acción gradual de agentes naturales, como el aire o el agua salada sobre los metales.

**Resistencia mecánica:** La resistencia mecánica es la capacidad de los cuerpos para resistir las fuerzas aplicadas sin romperse. La resistencia mecánica de un cuerpo depende de su material y de su geometría. La Resistencia de Materiales combina los datos de material, geometría y fuerzas aplicadas para generar modelos matemáticos que permiten analizar la resistencia mecánica de los cuerpos.

**Deflexión:** deformación que sufre un elemento por el efecto de las flexiones internas. Para determinar la deflexión se aplican las leyes que relacionan las fuerzas y desplazamientos utilizando dos tipos de métodos de cálculo: los geométricos y los de energía.

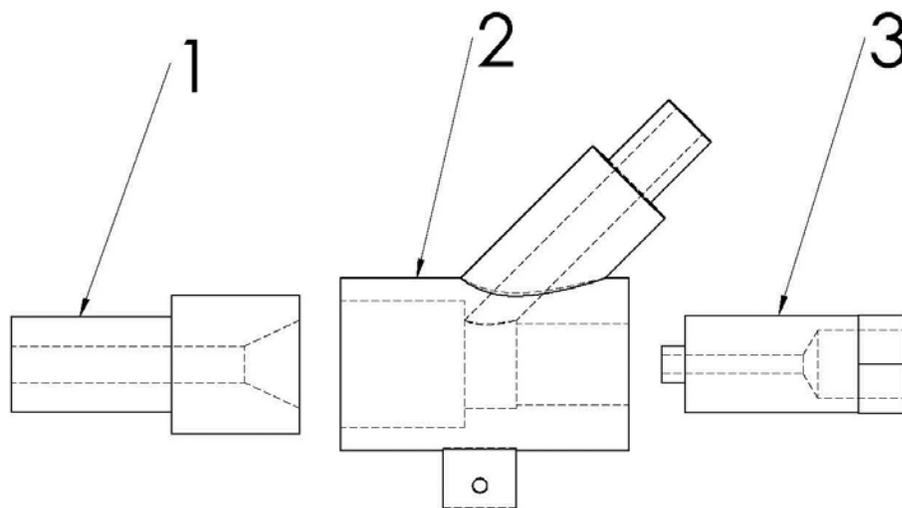
**Desviación estándar:** s una medida de dispersión para variables de razón (variables cuantitativas o cantidades racionales) y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable.

# ANEXOS

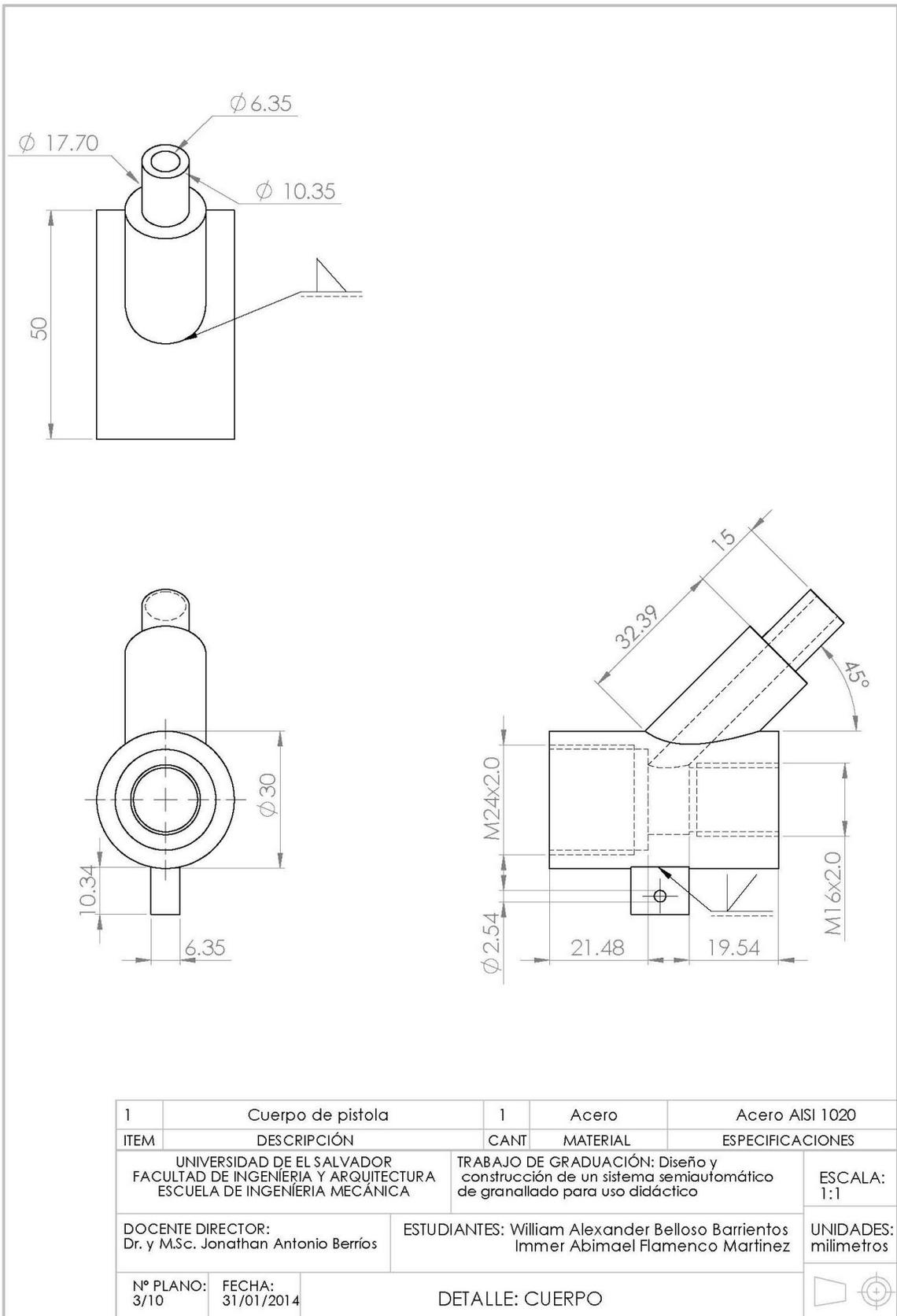


SECCIÓN A-A

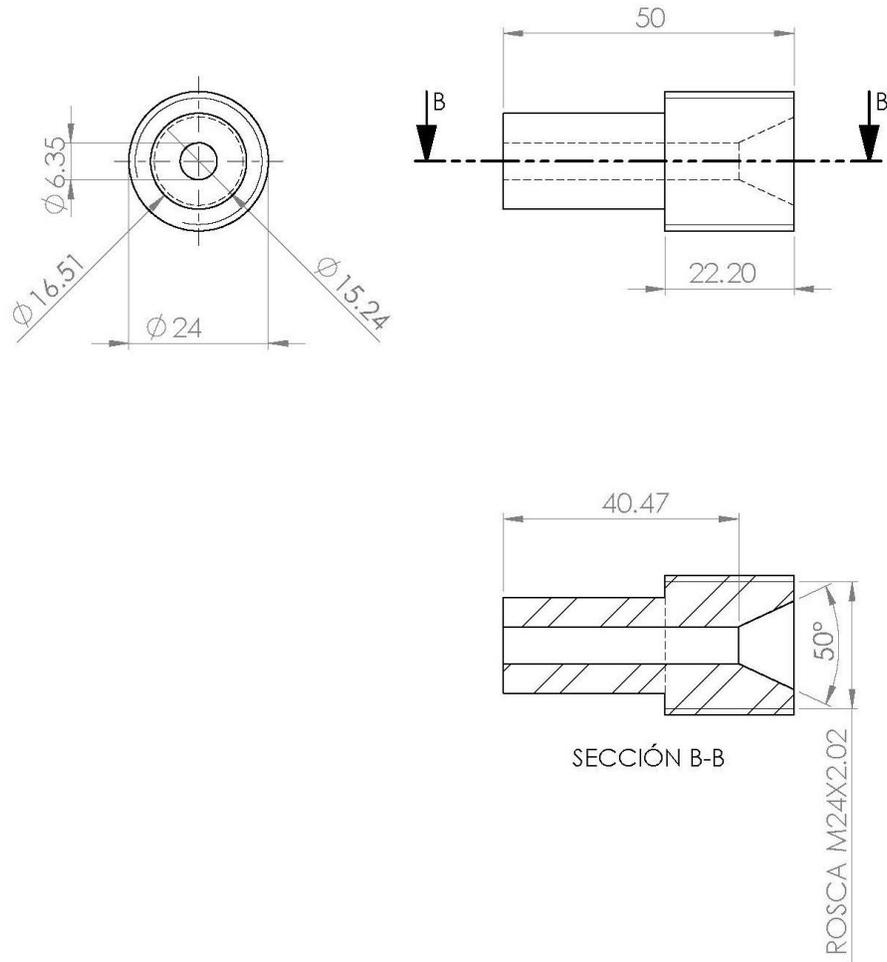
1	CÁMARA DE DISPARO	1	Lámina galvanizada	Lámina Galvanizada de 1/16
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
	UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un sistema semiautomático de granallado para uso didáctico	ESCALA: 1:20
	DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos		ESTUDIANTES: William Alexander Beloso Barrientos Immer Abimael Flamenco Martínez	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: 1/10	FECHA: 31/01/2014	CONJUNTO: CÁMARA DE DISPARO ESTRUCTURA PRINCIPAL		



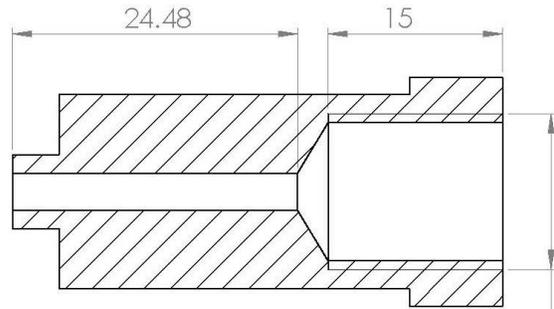
3	INYECTOR	1	BRONCE	BRONCE
2	CUERPO	1	ACERO	ACERO AISI 1020
1	BOQUILLA	1	ACERO	ACERO AISI 4043
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un sistema semiautomático de granallado para uso didáctico		ESCALA: 1:1
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos		ESTUDIANTES: William Alexander Beloso Barrientos Immer Abimael Flamenco Martínez		UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: 2/10	FECHA: 31/01/2014	SUBCONJUNTO: EMSAMBLE DE PISTOLA		



1	Cuerpo de pistola	1	Acero	Acero AISI 1020
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un sistema semiautomático de granallado para uso didáctico		ESCALA: 1:1
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios		ESTUDIANTES: William Alexander Belloso Barrientos Immer Abimael Flamenco Martinez		UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: 3/10	FECHA: 31/01/2014	DETALLE: CUERPO		

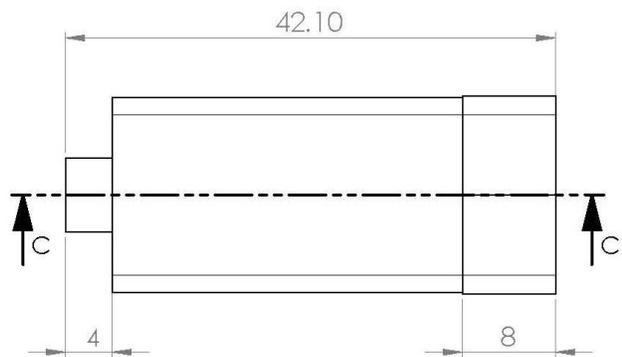
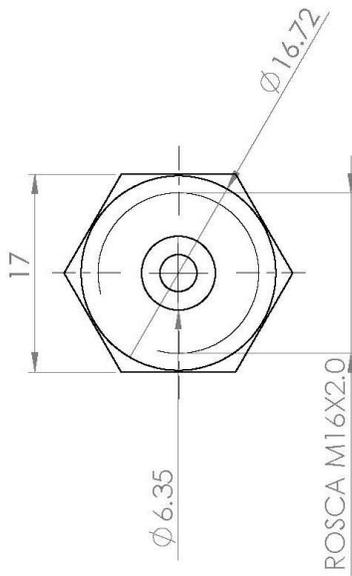


1	BOQUILLA	1	ACERO	ACERO AISI 4340
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
	UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un sistema semiautomático de granallado para uso didáctico	ESCALA: 1:1
	DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios		ESTUDIANTES: William Alexander Beloso Barrientos Immer Abimael Flamenco Martínez	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: 4/10	FECHA: 31/01/2014		DETALLE: BOQUILLA	

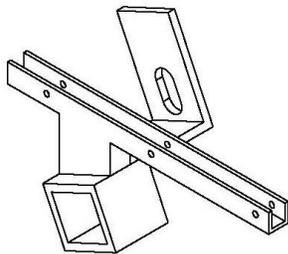


SECCIÓN C-C  
ESCALA 2:1

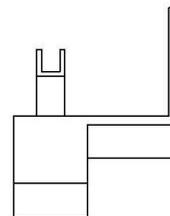
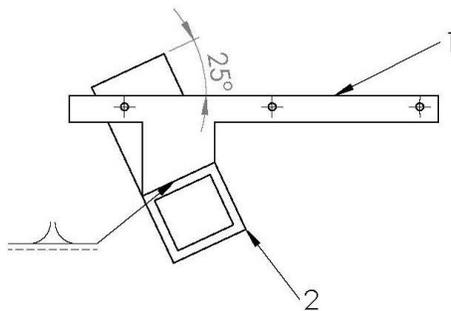
NPT 1/4 pulg



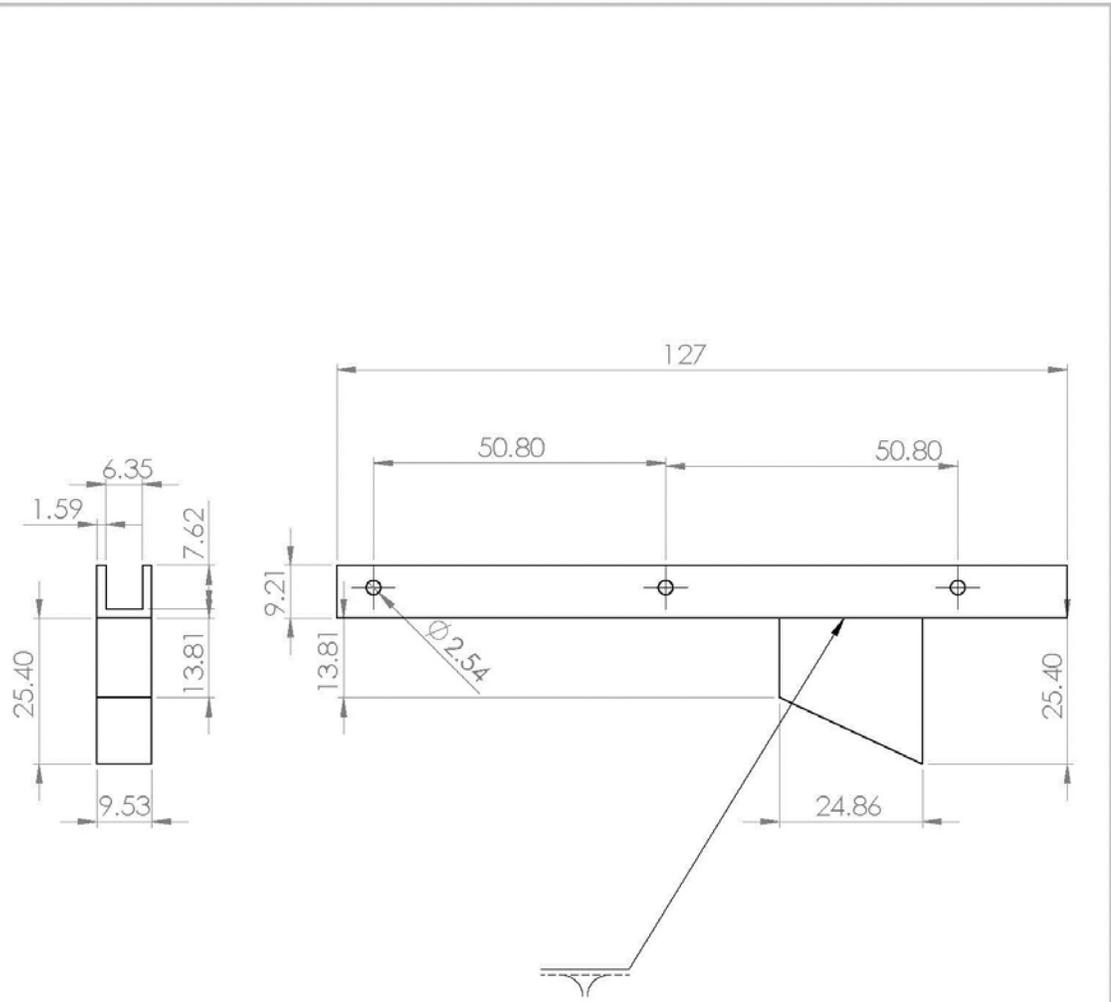
1	INYECTOR DE AIRE	1	BRONCE	BRONCE
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
	UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un sistema semiautomático de granallado para uso didáctico	ESCALA: 2:1
	DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios		ESTUDIANTES: William Alexander Beloso Barrientos Immer Abimael Flamenco Martinez	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: 5/10	FECHA: 31/01/2014		DETALLE: INYECTOR	



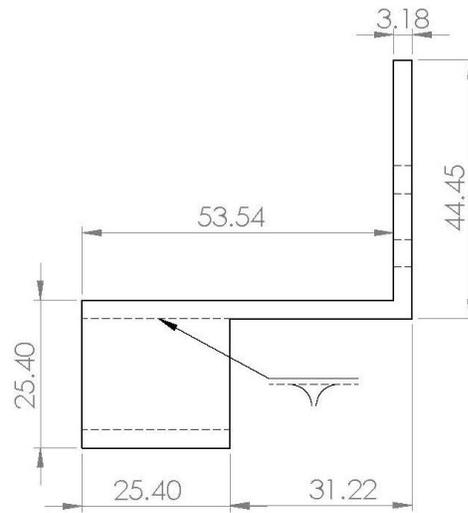
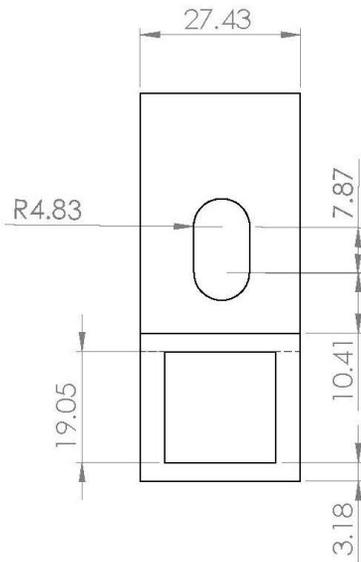
ISOMÉTRICO



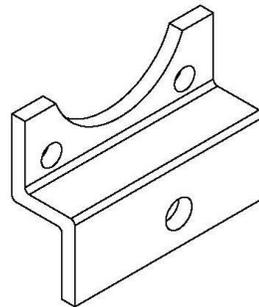
2	SOPORTE DE RIEL	1	ACERO	ACERO GALVANIZADO
1	RIEL SOPORTE DE PISTOLA	1	ACERO	ACERO GALVANIZADO
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un sistema semiautomático de granallado para uso didáctico		ESCALA: 1:1
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos		ESTUDIANTES: William Alexander Beloso Barrientos Immer Abimael Flamenco Martinez		UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: 6/10	FECHA: 31/01/2014	SUBCONJUNTO: SOPORTE DE PISTOLA		



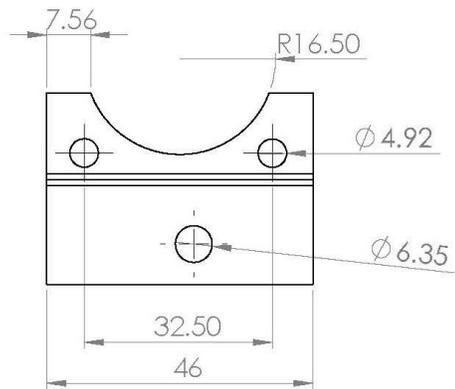
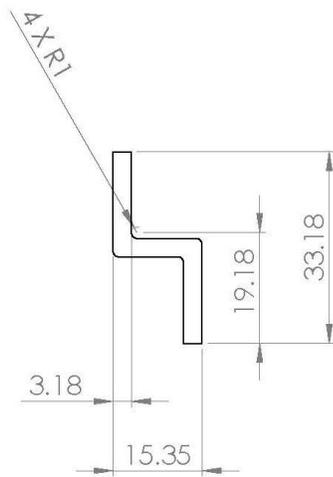
1	RIEL SOPORTE DE PISTOLA	1	ACERO	ACERO GALVANIZADO
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un sistema semiautomático de granallado para uso didáctico		ESCALA: 1:1
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos		ESTUDIANTES: William Alexander Belloso Barrientos Immer Abimael Flamenco Martínez		UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: 7/10	FECHA: 31/01/2014	DETALLE: RIEL SOPORTE DE PISTOLA		



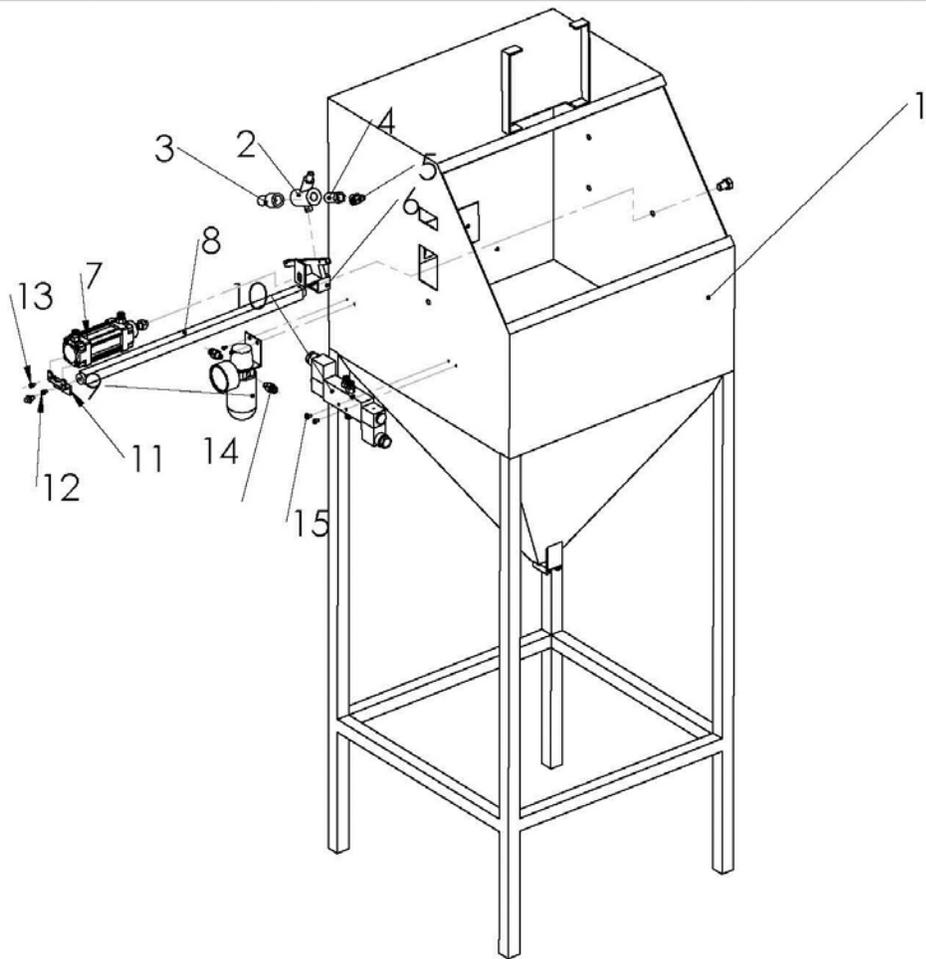
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
1	SOPORTE DE RIEL	1	ACERO	ACERO GALVANIZADO
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un sistema semiautomático de granallado para uso didáctico		ESCALA: 1:1
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios		ESTUDIANTES: William Alexander Belloso Barrientos Immer Abimael Flamenco Martinez		UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: 8/10	FECHA: 31/01/2014	DETALLE: SOPORTE RIEL		



ISOMÉTRICO



1	SOPORTE CILINDRO	1	ACERO	ACERO GALVANIZADO
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
	UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un sistema semiautomático de granallado para uso didáctico	
	DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios		ESTUDIANTES: William Alexander Beloso Barrientos Immer Abimael Flamenco Martinez	
	Nº PLANO: 9/10		FECHA: 31/01/2014	ESCALA: 1:1
DETALLE: SOPORTE CILINDRO				UNIDADES: milímetros



15	TORNILLO	2	ACERO	TORNILLO PLANO DE 1/8
14	CONECTOR RÁPIDO I	2	PLASTICO	CONECTOR DE 3/8
13	PERNO CABEZA HEXAGONAL	2	ACERO	PERNO 14 X 3/4
12	PERNO ALLEN	2	ACERO	PERNO ALLEN DE 1/4
11	SOPORTE PARA ACTUADOR	1	ACERO	LÁMINA GALVANIZADA
10	VÁLVULA ELECTRONEUMÁTICA	1	ALUMINIO	VÁLVULA 5/2 VIAS DE 3/8
9	VÁLVULA REGULADORA	1	ALUMINIO	VÁLVULA REGULADORA DE 3/8
8	CORREDERA	1	ACERO	TUBO ESTRUCTURAL
7	ACTUADOR NEUMATICO	1	ALUMINIO	ACTUADOR DE 2 TIEMPOS
6	RIEL	1	ACERO	ACERO GALVANIZADO
5	CONECTOR RÁPIDO L	1	PLÁSTICO	CONECTOR DE 3/8
4	INYECTOR	1	BRONCE	BRONCE
3	BOQUILLA	1	ACERO	ACERO AISI 4043
2	CUERPO	1	ACERO	ACERO AISI 1020
1	ESTRUCTURA	1	LÁMINA	LÁMINA DE 1/16
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ESPECIFICACIONES

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

TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un sistema semiautomático de granallado para uso didáctico

ESCALA:  
1:10

DOCENTE DIRECTOR:  
Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos

ESTUDIANTES: William Alexander Beloso Barrientos  
Immer Abimael Flamenco Martínez

UNIDADES:  
milímetros

Nº PLANO:  
10/10

FECHA:  
31/01/2014

CONJUNTO: MÁQUINA DE GRANALLADO

