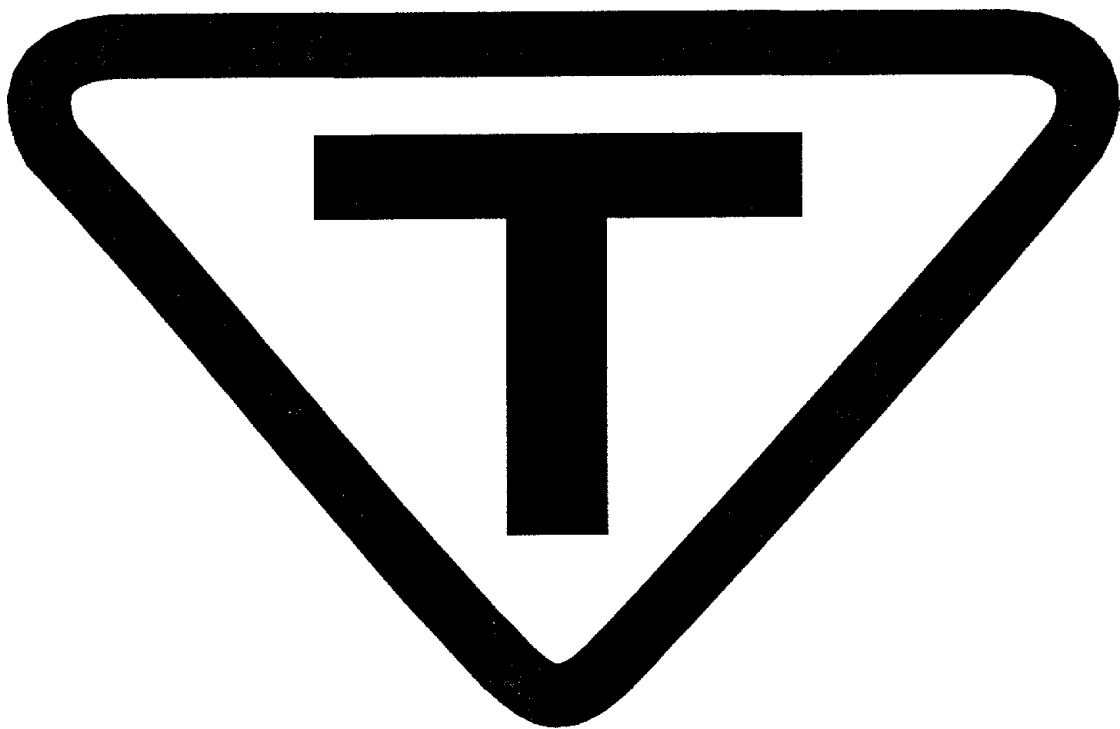


# EL PROCESO DE GRANALLADO



**TUPY**

---

**GRANALHAS**

## **EL PROCESO DE GRANALLADO**

### **I - INTRODUCCION**

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.

Inicialmente, el granallado con arena se hacia 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 alteraciones en 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 solamente alrededor de 1920, cuando comenzaron a aparecer evidencias de las ventajas económicas y técnicas como: menor desgaste de los equipos, mejor acabado superficial, mayor productividad, menor costo por tonelada acabada, menor volumen de material abrasivo manipulado, y, principalmente, por evitar la silicosis.

Los primeros abrasivos metálicos a ser ampliamente utilizados eran producidos en hierro fundido coquillado, que, a pesar de ser muy superiores a las arenas, se rompían rápidamente, provocando desgaste relativamente rápido del equipo. Posteriormente fueron desarrolladas las granallas de hierro fundido maleable y de acero y los alarques de acero cortados, todos con propiedades muy superiores a las de hierro fundido coquillado. Las granallas de acero se emplean actualmente en un sinnúmero de aplicaciones, tales como:

- limpieza de piezas después de la fundición;
- decapado mecánico de metales;
- retirada de rebabas de piezas metálicas, plásticos y gomas;
- empañado de superficies plásticas, vidrios, metales, cerámicas;
- "shot peening" de metales;

## II - PRINCIPIOS DE LIMPIEZA POR GRANALLADO

La limpieza de una superficie a través del chorro de granallas puede considerarse como una verdadera operación de bombardeo, en que un sinnúmero de partículas abrasivas son lanzadas en alta velocidad contra el objetivo.

Inmediatamente antes de chocar contra el objetivo, las partículas están dotadas de energía cinética, que es directamente proporcional a la masa de la partícula y al cuadrado de la velocidad, conforme la ecuación:

$$E_c = (m \cdot v^2) / 2$$

donde,

m = masa de la partícula

v = velocidad de la partícula

La masa de una partícula esférica es dada por la relación:

$$m = \rho \cdot (4 \pi \cdot r^3) / 3$$

donde,

r = radio de la partícula

$\rho$  = densidad del material

Por lo tanto, la energía cinética de una partícula esférica es dada por la relación:

$$E_c = \rho \cdot (2/3) \cdot \pi \cdot r^3 \cdot v^2$$

Las ecuaciones arriba indican que pueden ocurrir variaciones significativas de la energía cinética del chorro con pequeñas variaciones en las cantidades y dimensiones de las partículas. De hecho, considerándose que la velocidad de las partículas, independiente de sus tamaños, se mantiene fija, se observa, a través de la relación arriba, que la disminución del radio de una partícula para la mitad de su valor inicial corresponde a una disminución de 8 veces su energía cinética. Por otro lado, disminuyéndose el tamaño de la partícula, se aumenta la cantidad de partículas lanzadas por la turbina, en la misma proporción que se disminuye su energía cinética, conforme puede observarse en la tabla 1.

Tabla I - Influencia de las dimensiones de las partículas esféricas sobre su energía cinética relativa y sobre la cantidad de partículas en un kg de granallas de acero.

(N° SAE)	Dimensión de la granalla		Cantidades aproximadas de partículas nuevas / kg	Energía de impacto relativa aproximada
	Diámetro (mm)			
	Nominal	Medio		
780	2,00	2,38	18.100	500
660	1,70	2,00	30.600	300
550	1,40	1,68	51.600	175
460	1,18	1,41	87.300	100
390	1,00	1,17	152.900	60
330	0,85	1,00	244.900	37
280	0,71	0,84	413.100	22
230	0,60	0,71	684.100	13
170	0,43	0,55	1.471.700	6
110	0,30	0,39	4.127.700	2
70	0,18	0,30	9.068.600	1

Las partículas sufren una violenta desaceleración en el instante del impacto, transformando parte de la energía cinética en calor, parte en energía de deformación o de fractura y parte en trabajo de limpieza, restando también una parte de energía cinética que no es transformada (parte de las granallas sufren rebote).

La eficiencia de la conversión de energía cinética en trabajo efectivo de limpieza depende de factores relacionados al ángulo de incidencia del chorro, a las características de la granalla utilizada, al tipo de impureza a retirar, etc.

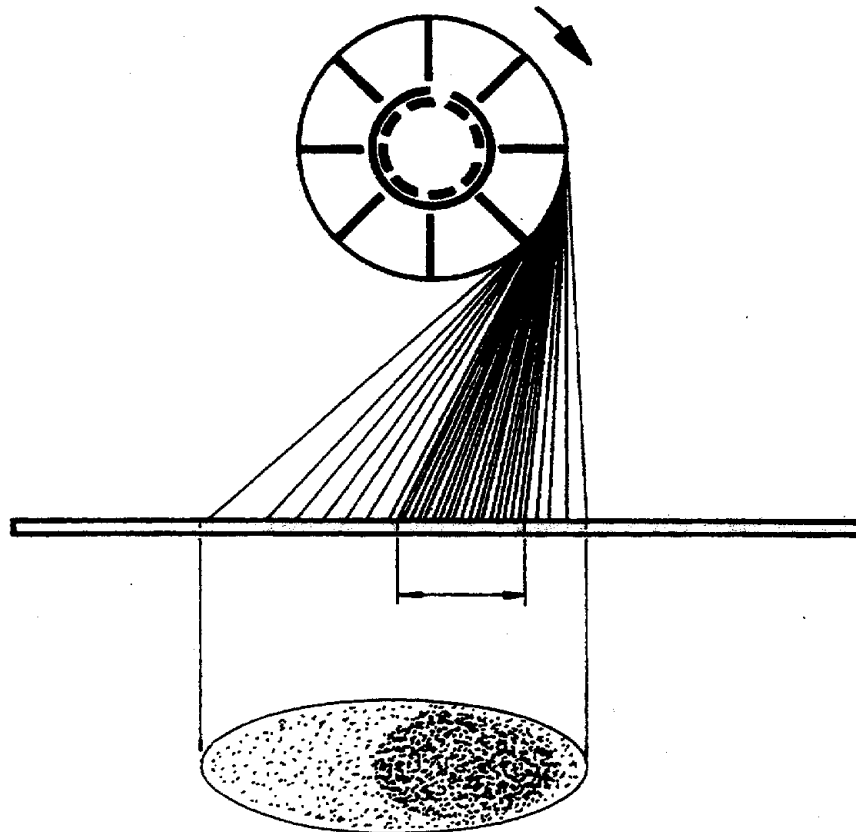
Se verifica que, cuanto más perpendicular fuera el chorro en relación a la superficie de trabajo, mayor será el componente de energía disponible para el trabajo de rompimiento de impurezas sueltas. En este caso, el acabado superficial también será más áspero, ya que las granallas dispondrán de mayor energía para deformar la superficie de trabajo, produciendo relieves más acentuados. Por consiguiente, deberán existir inclinaciones y dimensiones de granallas ideales para diferentes casos, que combinen las dificultades particulares de rompimiento y remoción de cada tipo de impureza asociada a las condiciones de cada superficie.

En el caso de equipos dotados de turbinas, cuanto menos esféricas fueran las granallas, más abierto y difuso será el chorro, ya que el rodamiento sobre las paletas será más difícil, aumentando la tasa de desgaste y el tiempo de contacto granalla/paleta. Esto provoca el desplazamiento del “punto caliente” y aumenta la dispersión del chorro, y, por consiguiente, altera la eficiencia y la rapidez de limpieza.

El "punto caliente" es la región donde la intensidad del chorro es mayor, o sea, donde la energía acumulada de impactos por unidad de área es mayor.

Una turbina lanza las granallas sobre una superficie plana según una distribución aproximadamente elíptica, conforme se puede observar en la figura - 1.

Experimentalmente, se verifica que la densidad o intensidad de impacto no es uniforme a lo largo de la proyección del chorro como sería deseable, observándose la máxima densidad ("punto caliente") junto a la región central, conforme se presenta en la figura 1.



*Figura 1 - Forma e intensidad de un chorro de granallas proyectado sobre una superficie plana*

Para un mismo equipo de limpieza, la localización y las dimensiones del "punto caliente" pueden variar, por ejemplo, en función del regulado o del desgaste de la capa de rotor, del desgaste del rotor, o del desgaste de las paletas.

Evidentemente, la optimización de la eficiencia de limpieza de un sistema de granallado (compuesto de equipo de limpieza, pieza y abrasivo), solamente puede conseguirse si se entienden y controlan las características y funciones de cada uno de estos componentes.

### **III - FUNCIONES DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DE UN EQUIPO DE GRANALLADO**

#### **III.1 - AMPERIMETRO**

El amperímetro permite evaluar la eficiencia de las turbinas y, por lo tanto, debe ser inspeccionado regularmente, de manera que indique CERO cuando el motor estuviera desconectado, y el AMPERAJE ESPECIFICADO en el manual del equipo cuando el motor estuviera funcionando a plena carga.

La eficiencia de la turbina puede ser calculada por la siguiente relación:

$$E = (ALC - ALV)/(AEC - ALV) \times 100 \quad \text{donde,}$$

E = eficiencia

ALC = Amps leídos con el motor bajo carga

ALV = Amps leídos con el motor en vacío

AEC = Amps especificado bajo carga plena

Ejemplo:

Un motor de 30 HP consume, funcionando en plena carga, cerca de 38 A y, en vacío, cerca de 12

A. En caso de que esté trabajando con apenas 30 A bajo carga, su eficiencia será:

$$E (\%) = (30 - 12)/(38 - 12) \times 100 = 69\%$$

Por otra parte, si no fuese considerado el amperaje consumido en vacío, tendríamos:

$$E (\%) = 30/38 \times 100 = 79\%$$

Es importante resaltar que una pequeña reducción de 8 amperios bajo carga, representó una caída de 31 % en la productividad de la turbina, por lo tanto bien diferente de la reducción de 21 % que ocurriría si no considerásemos en los cálculos el amperaje consumido con el motor funcionando en vacío.

### **III.2 - MANIPULADOR DE PIEZAS**

Existen varios tipos de manipuladores de piezas, tales como, mesas, ganchos, esteras, barriles, etc. Su principal función es soportar las piezas de manera a exponerlas a los chorros de granallas, generalmente a través de movimientos giratorios o por sacudidas sucesivas.

Para conseguir la máxima eficiencia del equipo, se debe verificar con bastante atención:

- a. Si las piezas están correctamente posicionadas debajo del chorro, con la finalidad de que el recubrimiento de las piezas sea integral, o sea, todas las superficies de las piezas reciban las cantidades necesarias de impactos de los abrasivos, quedando perfectamente limpias;
- b. Si el área de granallado está debidamente llena, para que el chorro no alcance directamente la oruga o los revestimientos internos de la cámara y, por lo tanto, no ocurran desgastes excesivos e innecesarios de los abrasivos, soportadores y blindados de la cámara de granallado;
- c. Si no fueran cargadas demasiadas piezas, principalmente en los equipos tipo barril o esteras evitándose, de esta forma, piezas mal granalladas por falta de recubrimiento y daños prematuros por sobrecarga de los rodamientos, ejes, esteras, etc.

### **III.3 - CAMARA DE GRANALLADO**

La cámara de granallado tiene por finalidad confinar los abrasivos y las piezas dentro de un lugar apropiado durante la operación de granallado, con la finalidad de que los abrasivos puedan ser reaprovechados y recirculados. Al mismo tiempo, debe cotejar la seguridad necesaria a las personas que circulan próximas al equipo.

Las pérdidas y los arrastres de granallas hacia afuera del sistema de recirculación del equipo pueden disminuir la eficiencia del separador y tienden a reducir el nivel de reserva de granallas, pudiendo hasta faltar granallas en las turbinas.

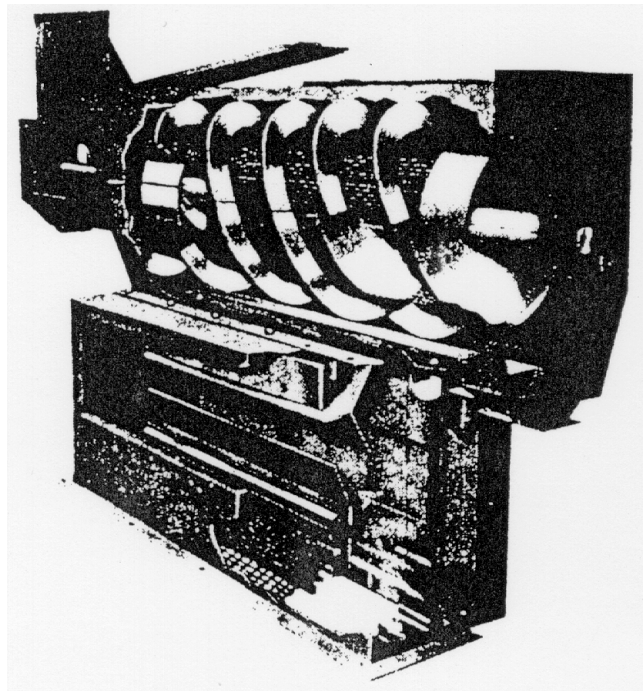
De esta forma, toda y cualquier pérdida a través de las estructuras de la cámara y de las turbinas, de los cierres de las puertas, etc., o arrastre excesivo de abrasivos debe ser rápidamente reparado para que no ocurran aumentos de los costos de operación de limpieza y sean evitados accidentes de trabajo.

### III.4 - SEPARADOR

El separador es uno de los más importantes componentes del equipo de granallado, correspondiéndole las siguientes funciones básicas:

- a) Controlar la remoción de contaminantes (cuerpos extraños, no magnéticos, etc.) del mix de operación, influyendo sobre los costos de mantenimiento.
- b) Controlar los tamaños de las partículas abrasivas en el "mix de operación", que tiene efecto directo sobre la velocidad de limpieza y, por consiguiente, sobre los costos de la operación.

Los separadores más modernos remueven el polvo y las partículas finas consideradas inactivas, por medio de un flujo de aire que pasa a través de los abrasivos contaminados que caen en forma de cortina, conforme se presenta en la figura 2.



*Figura 2 - Separador del tipo BE de la Pangborn, que posee tres zonas de separación*

La operación de forma eficiente del separador requiere:

- el regulado del flujo de aire de lavado a través de la cortina de abrasivos a recuperar, de manera que solamente las partículas inactivas sean descartadas;
- que la cortina de abrasivos se presente continua y con espesor uniforme por toda la extensión de la abertura del flujo de aire de lavado;



- que el caudal de abrasivos en la cortina sea compatible con el volumen de abrasivos en recirculación en el sistema.

En caso de que la cortina sea muy espesa, no podrán retirarse todas las impurezas, además de que la cortina tenderá a quedar interrumpida debido al caudal excesivo de granallas.

En caso de que la cortina quede interrumpida o incompleta, el aire fluirá por la trayectoria de menor resistencia, o sea, por las fallas de la cortina. Por consiguiente, podrán ocurrir los siguientes problemas:

- permanencia de impurezas en el mix de operación, reduciendo la eficiencia del chorro;
- el aire pasará libremente a través de las interrupciones en la cortina en velocidad acelerada, retirando de los bordes de la cortina, partículas abrasivas todavía útiles.

En régimen de operación estabilizado, se encuentran granallas de diferentes tamaños, debido desgaste natural (por rompimiento, abrasión o fatiga) durante el trabajo. De esta forma, al colocar por primera vez el equipo en operación, se debe cargarlo, de preferencia, con 3 ó 4 tamaños diferentes de granallas, para que se alcance rápidamente la estabilización.

Datos extraídos de literatura y presentados en la Tabla 1 muestran las distribuciones granulométricas comparativas de granallas S-460 producidas con los alambres de acero cortados, acero fundido e hierro fundido coquillado, después del ensayo en el mismo equipo de limpieza. Se observa que la distribución granulométrica, después de la estabilización, es bastante diferente entre los varios materiales, habiendo mayor proporción de partículas más gruesas para los materiales de mayor durabilidad, o sea, alambres de acero y granallas de acero.

La experiencia ha demostrado que, cuando se trabaja con distribución de granalla muy gruesa o muy fina, se puede aumentar el tiempo de limpieza en hasta 30%, significando un gran desperdicio de tiempo, además del desgaste innecesario del equipo y de las granallas.

Tabla I - Distribución granulométrica de granallas S-460 producidas con diferentes materiales, después de alcanzar la estabilización

Abertura de la malla (mm)	Cantidad retenida en cada tamiz (%)		
	Alambre de acero Cortado	Granalla de Acero	Hierro Coquillado
1.18	60	45	10
0.85	25	30	20
0.60	10	15	35
0.42	5	10	25
0.30	0	0	10

Para mantener la estabilización, es necesario que se hagan adiciones de granallas nuevas con mucha frecuencia y en pequeñas cantidades, en caso contrario, la eficiencia de limpieza sufrirá profundas oscilaciones a lo largo del tiempo.

En caso de que las reposiciones de granallas nuevas sucedan solamente después de la constatación de la falta de granallas en las turbinas, inmediatamente antes de la reposición habrá apenas partículas muy finas en el chorro y, luego después de la reposición, que normalmente se hace hasta completar nuevamente toda la reserva de abrasivos, habrá solamente partículas gruesas en el chorro. En este caso, las cantidades relativas de partículas gruesas, medianas y finas en el chorro estarán siempre variando a lo largo del tiempo, o sea, no sucederá la estabilización del chorro.

### **III.5 - RECOLECTOR DE POLVO**

El recolector de polvo es, por lógica, el componente menos entendido y más descuidado de una máquina de granallado, ya, que normalmente, se encuentra localizado del lado externo del edificio.

La finalidad del recolector de polvo es eliminar y retener el polvo generado durante la operación de limpieza.

Para garantizar el funcionamiento correcto del recolector de polvo, se debe verificar:

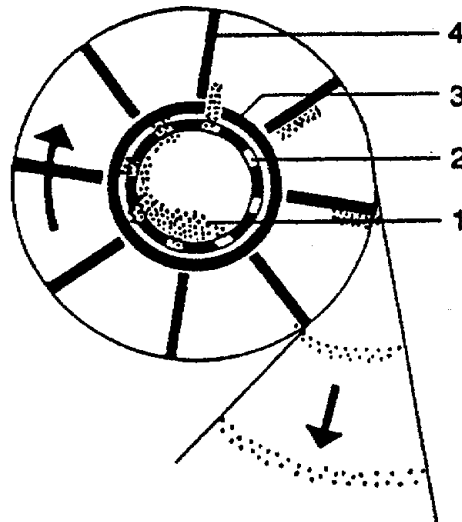
- a) si la rotación del ventilador está correcta;
- b) si las cintas del ventilador están debidamente tensionadas;
- c) si los filtros están en buenas condiciones (sin orificios y sin mallas muy abiertas u obstruidas);
- d) si los sistemas de vibración y limpieza de los filtros están operando eficientemente;
- e) si los compartimientos del filtro están libres de polvo;
- f) si el nivel de polvo en el silo no está elevado;
- g) si los sellos del recolector de polvo no están dañados y si la velocidad del aire en las tuberías está dentro de las especificaciones;
- h) si la válvula de descarga de polvo está en buenas condiciones y cerrada, mientras el equipo está conectado;
- i) si las tuberías de aire están destapadas y sin pérdidas en toda su extensión;
- j) si el flujo de aire está debidamente ajustado para remover apenas el polvo, y no abrasivos.

### III.6 - TURBINAS

Las turbinas son los principales componentes de un equipo de limpieza. Tienen "la función de acelerar y lanzar los abrasivos contra la superficie por granallar, manteniendo siempre constantes la velocidad y el peso total de las partículas, además de la forma y localización del chorro".

La figura 3 presenta un modelo típico de turbina de paletas rectas, en que se pueden observar los principales componentes de la turbina que son: las paletas, el rotor y la capa del rotor.

Las partículas aceleradas por la fuerza centrífuga de la turbina alcanzan, normalmente, velocidades del orden de 70 (252 km/h) a 80 m/seg (288 km/h).



*Figura 3: Turbina de paletas rectas mostrando los abrasivos (1) siendo captados por el rotor (2), saliendo por la abertura de la capa del rotor (3) y siendo acelerados y lanzados por las paletas (4).*

Las rotaciones de las turbinas están inversamente relacionadas a sus diámetros, o sea, turbinas con diámetros menores trabajan con rotaciones mayores, para que las velocidades de escape de las partículas seán, siempre las mismas, independiente del tamaño de la turbina. Por ejemplo, una turbina con disco de diámetro 19,5 pul. (495 mm) gira, normalmente, a una rotación de 2250 rpm, mientras que una de diámetro 15 pul. (381 mm) gira a 2900 rpm, ambas lanzando los abrasivos a una velocidad de cerca de 80 m/s.

El desgaste irregular de las paletas, con la aparición de surcos o la afinación localizada en determinadas regiones, modifica la trayectoria de las partículas desplazando el "punto caliente" del chorro.

El desplazamiento del "punto caliente" del chorro produce una acentuada reducción de la capacidad de limpieza del equipo. Por consiguiente, se aumenta el tiempo necesario de granallado, el desgaste del equipo y el consumo de abrasivos, elevando, por lo tanto, los costos de la operación de limpieza.

Debido a la elevada rotación del rotor de la turbina, las paletas deben estar todas siempre bien balanceadas. De esta forma, al sustituir una paleta rota, se recomienda todas las demás paletas de la misma turbina. Como regla general, se recomienda que la diferencia admisible de peso entre las paletas de un mismo juego, sea de como máximo 5,0 gramos.

El desgaste excesivo del rotor tiende a disminuir la cantidad de partículas en el chorro, mientras el desgaste excesivo de la capa del rotor tiende a producir, por ejemplo, el desplazamiento del punto caliente y una mayor dispersión del chorro.

Como puede observarse, el buen funcionamiento de la turbina y por consiguiente, de todo el equipo de limpieza depende, fundamentalmente, de las buenas condiciones de mantenimiento y de regulado de todos sus componentes.

#### **IV - TIPOS DE ABRASIVOS METALICOS PARA GRANALLADO**

Los principales tipos de abrasivos metálicos utilizados para la limpieza o el acabado de piezas ferrosas son, normalmente, producidas en hierro fundido o en acero, pudiendo presentarse en las formas angular o esférica.

Las granallas son clasificadas por sus formas y tamaños, de acuerdo con normas específicas, tales como, SAE J444 y SFSA 20-66. Al mismo tiempo, existen normas complementarias, tales como, SAE J445 que especifica los ensayos mecánicos en las granallas metálicas, y SAE J827 que establece límites para los desvíos de forma, composición química, microestructura, dureza y contaminantes no magnéticos.

##### **IV.1 - Granalla de hierro fundido blanco**

Las granallas producidas en hierro fundido blanco (coquillado) fueron las primeras a aparecer en el mercado, en sustitución a la arena de granallado.

Presentan dureza muy elevada (arriba de 700 HV) pero se rompen fácilmente, por ser muy frágiles. De esta forma, se vuelven angulares muy rápidamente, desempeñando acción de limpieza rápida, además de producir una superficie más "rugosa" de que con granallas esféricas, por lo tanto, de buen anclaje para tratamientos superficiales posteriores. En contrapartida, su durabilidad es bastante baja, además de producir desgaste intenso de los componentes del equipo de limpieza.

Encuentran aplicaciones, por ejemplo, en operaciones de granallado en que la recuperación del abrasivo no es posible y, paralelamente, no se puede utilizar la arena debido a problemas de salud.

Otra aplicación bastante común para las granallas de hierro fundido blanco es en el corte de mármoles y granitos.

## **IV.2 - Granallas de hierro fundido maleable**

Las granallas de hierro fundido maleable se producen a partir de las granallas de hierro fundido coquillado, a través del tratamiento térmico de maleabilización.

Presentan dureza entre 250 y 450 HV y dimensiones entre 0,6 y 2,0 mm.

Su acción de limpieza es menor que la de las granallas de hierro fundido blanco, sin embargo, su durabilidad es como mínimo dos veces mayor, debido a su mayor tenacidad. Presentan ventajas adicionales de ser menos abrasivas de que las de hierro fundido coquillado y, por lo tanto, desgastan menos los equipos de limpieza.

Actualmente son poco utilizadas, ya que su relación costo/beneficio es inferior a la de las granallas de acero.

## **IV.3 - Alarmes de acero cortados**

Se producen a partir de alarmes de acero, cortados en largos aproximadamente iguales a sus diámetros.

Los materiales más adecuados para la producción de este tipo de abrasivo son los aceros "cuerda de piano", que son alarmes de acero de composición eutéctide, sometidos al tratamiento térmico de patente.

Presentan óptimas combinaciones de resistencia mecánica y tenacidad, desempeñando acción de limpieza muy buena y óptima durabilidad; pero su costo es bastante elevado.

Actualmente, se utilizan en aplicaciones muy específicas, como por ejemplo, en algunas operaciones de shot peening.

#### **IV.4 - Granallas de acero fundidas**

Las granallas de acero surgieron comercialmente en el mercado europeo en la década del 50, habiendo aumentado progresivamente su aceptación en sustitución de las arenas y a los demás tipos de abrasivos metálicos utilizados para limpieza de superficies, principalmente, de piezas fundidas.

Las granallas se producen por atomización del acero líquido, a través de un chorro de agua bajo alta presión, que, en contacto con el metal líquido, "explota" produciendo gotículas esféricas, que caen en un tanque con agua, solidificándose y enfriándose rápidamente. Enseguida, las esferas (granallas) son retiradas del tanque, secas y preclasificadas en función de sus diámetros y tratadas térmicamente (templadas) en hornos de atmósfera protectora.

Las granallas grandes son rotas, generando las granallas angulares, pudiendo ser revenidas o no en bajas temperaturas.

Las granallas esféricas menores son, entonces, revenidas de acuerdo con la clase de dureza que se le quiere atribuir, obteniéndose, de esta forma, granallas para granallado o para "shot peening", o para corte de piedras.

Las granallas esféricas comunes para granallado son, normalmente, revenidas para alcanzar durezas en la faja de 40 a 50 HRC, conforme establece la norma SAE J827.

Las granallas para "shot peening" presentan, generalmente, durezas en la faja de 50 a 60 HRC, y hasta inclusive superior de 60 HRC, como por ejemplo, en los casos de "shot peening" de engranajes cementadas, templadas y revenidas para durezas también superiores a 60 HRC.

Granallas con fajas de durezas especiales también pueden ser producidas, dependiendo de acuerdos previos entre el cliente y el fabricante.

La norma SAE J827 especifica, para las granallas, aceros hipereutetóides con tenores de carbono entre 0,85% y 1,20%, manganeso entre 0,35% y 1,20%, y silicio entre 0,40% y 1,50%, además de los elementos residuales fósforo y azufre que no pueden ultrapasar el límite de 0,050%.

Actualmente, ya se cuenta con granallas fundidas de acero de bajo carbono (abajo de 0,15%C), con poder de limpieza equivalente a las granallas de acero comunes (hipereutetóides) para granallado (40 a 50 HRC), pero con durabilidad superior. La norma SAE J2175 establece las características para tales tipos de granallas.

## **V - ELECCION DE LAS GRANALLAS**

Un abrasivo para granallado debe limpiar con rapidez y eficiencia, tener buena durabilidad, desgastar el mínimo posible los componentes internos del equipo y producir el nivel de acabado superficial deseado, al menor costo posible.

Existen diversos tipos de abrasivos metálicos y no metálicos, muchos de los cuales pueden ser utilizados en una misma aplicación, sin embargo, cada cual presenta propiedades específicas que pueden ser ventajosas o no para cada caso.

De esta forma, la elección de un abrasivo puede hacerse bastante subjetiva, si no fueran obedecidas determinadas reglas básicas ya consagradas.

### **1 - Pérdida de granallas en el proceso**

Existen determinadas situaciones en que las pérdidas de abrasivos, por arrastre junto con las piezas hacia afuera del sistema de recirculación, son inevitables y bastante significativas. En otros casos, el equipo de granallado no permite la recuperación y reclasificación de los abrasivos de manera continua y automática, haciendo extremadamente oneroso su aprovechamiento. En estas condiciones, se recomienda utilizar granallas de hierro fundido coquillado, en vez de granallas de acero, ya que las granallas de hierro son más baratas que las de acero.

### **2 - Tipo de acabado superficial**

La elección de granalla angular o esférica dependerá de las exigencias de acabado superficial. Por ello, se recomienda la utilización de granallas angulares cuando, por ejemplo, la pieza después de la limpieza fuera sometida a tratamiento superficial de galvanización o pintura de responsabilidad. En estos casos, se obtiene una superficie más rugosa, que presenta mejor anclaje para las deposiciones superficiales.

### **3 - Grado de acabado superficial**

El grado de acabado superficial producido por la operación de granallado depende de los tamaños y formatos de las partículas del chorro, de las velocidades y de las durezas relativas entre las partículas y la superficie de la pieza, del ángulo de incidencia de las partículas, etc.

De esta forma, cuando la operación de granallado fuera de una simple limpieza, por ejemplo, después de la fundición, se recomienda utilizar el menor tamaño de granalla, compatible con el grado de acabado superficial, ya que las granallas menores producen acabado más fino y presentan mayor grado de recubrimiento, o sea, la cantidad de impactos por unidad de tiempo es mayor. Por ejemplo, se utiliza granalla S-330 se obtiene cerca de cinco veces más impactos por unidad de tiempo de que con la granalla S-550.

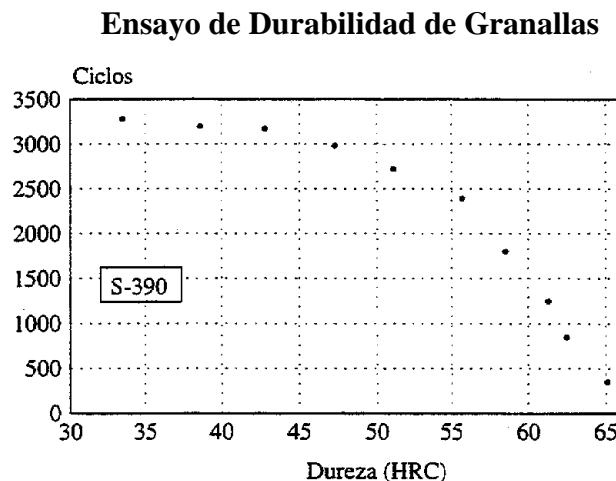
Experimentalmente, se verifica que la presencia de granallas gruesas en el chorro sirve para romper las películas de escama, arena quemada, u óxidos en la superficie de la pieza mientras las granallas medianas y finas sirven para limpiar y dar acabado a la superficie.

#### 4 - Dureza de las granallas

La dureza de las granallas ejerce gran influencia sobre su propia durabilidad y capacidad de limpieza, además de afectar la tasa de desgaste del equipo.

Las granallas más duran limpian, por lógica, más rápidamente. Sin embargo, a partir de determinados niveles de dureza, se vuelven excesivamente frágiles y quebradizas, acelerando el desgaste del equipo de limpieza. Por otro lado, las granallas más blandas presentan mayor durabilidad (véase figura 4) y producen menor desgaste del equipo, pero se deforman más fácilmente, absorbiendo parte considerable de la energía cinética disponible para el trabajo de granallado.

Se recomienda trabajar con dureza entre 42 y 48 HRC para que se consiga la mejor combinación de durabilidad y eficiencia de limpieza, ya que ambas propiedades caminan en sentidos opuestos con el aumento de la dureza de la granalla.



*Figura 4: Efecto de la dureza sobre la durabilidad de granallas de acero esféricas S-390, sometidas al ensayo de vida útil en equipo Ervin.*

#### 5 - Microestructura

Las granallas de acero templadas y revenidas presentan la mejor combinación de propiedades de resistencia al desgaste y tenacidad, cuando su microestructura es compuesta de martensita revenida fina, sin la presencia de carburos en red.



La presencia de carburos en red continua hace las granallas muy frágiles y quebradizas, mientras la aparición de perlita, ferrita o de austenita retenida en medio a matriz martensítica hace las granallas más blandas y, por lo tanto, con menor poder de limpieza.

## **6 - Composición química**

El control de la composición química dentro de límites estrechos es de importancia fundamental para conseguirse, regularmente, granallas con buen desempeño. De esta forma, es importante controlar los tenores de carbono, silicio y manganeso, además de los elementos residuales fósforo y azufre, que deben mantenerse tan bajos cuanto posible.

## **7 - Defectos físicos**

La presencia excesiva de defectos de fundición en las partículas, tales como rechupes y vacíos (huecos), reducen drásticamente la durabilidad de la granalla ya que en estas condiciones, ellas se parten o se desintegran fácilmente, alterando bruscamente las dimensiones y las formas de las partículas. Normalmente, estos defectos están asociados a desvíos de composición química y a las técnicas inadecuadas de desoxidación, desgasificación y granulación.

La ocurrencia de grietas, generalmente resultantes de la granulación o del tratamiento térmico, también contribuye para disminuir la durabilidad del abrasivo.

De esta forma, las normas SAE J827 y SFSA 20-66, por ejemplo, establecen niveles aceptables para la ocurrencia de defectos de aquellas naturalezas.

## **VI - APLICACIONES DE LAS GRANALLAS**

Actualmente, hay una gran variedad de abrasivos para granallado, tales como, cascaras de nueces molidas, esferas de vidrio, paja de arroz, óxido de aluminio, aluminio, acero fundido, etc., algunos de los cuales indicados para aplicaciones muy particulares.

Las granallas de acero esféricas y angulares encuentran campos de aplicaciones bastante diversificados, pudiendo ser utilizadas en operaciones, tales como: limpieza, empañado, eliminación de rebabas, "shot peening", etc.

La Tabla II presenta una clasificación genérica de los niveles de acabados superficiales obtenidos con granallas esféricas y angulares de diferentes tamaños. También presenta las aplicaciones más comunes para cada grupo de tamaños de granallas.

**TABLA II - Aplicaciones generales de granallas esféricas y angulares**

ESFERICAS		ANGULARES		APLICACIONES GENERALES
Tamaño (SAE)	Rugosidad	Tamaño	Rugosidad	
S-660	Rugosidad muy alta a alta	G-12	Rugosidad muy alta	1- Remoción de escama espesa o tenaz; 2- Limpieza de fundidos de acero o hierro, de grandes dimensiones.
S-550 S-460 S-390	Rugosidad alta a mediana	G-14 G-16 G-18	Rugosidad Alta	1- Limpieza de fundidos medianos de acero; 2- Remoción de camadas espesas de tinta o óxido (*); 3- Limpieza de fundidos espesos de hierro gris, nodular, etc. 4- Granallado de cilindro laminador (*); 5- Remoción de escamas de zoquetes, de chapas gruesas y placas
S-330 S-280 S-230	Rugosidad Mediana a baja	G-25	Rugosidad Baja	1- Limpieza de fundidos livianos de acero; 2- Limpieza de fundidos medianos de hierro gris, maleable y nodular y de no ferrosos; 3- Remoción de escama de piezas tratadas térmicamente, forjados medianos, chapas gruesas, finas y estructurales; 4- Preparación de tanques de agua caliente antes de la esmaltación (*); 5- Remoción de tintas y óxido (*); 6- Granallado de cilindro laminador (*);
S-170 S-110	Rugosidad baja a muy baja	G-40 G-50 G-80	Rugosidad Baja	1 - Limpieza de fundidos livianos de acero; 2- Remoción de escama de barras, bobinas, forjadas livianas, piezas tratadas térmicamente, tubos, chapas finas, tiras e inoxidable 3- Remoción de tinta y óxido liviano (*); 4- Limpieza de piezas maquinadas; 5- Granallado de cilindro laminador (*);
-----	-----	G-120	Rugosidad Muy Baja	1 - Limpieza de piezas fundidas ferrosas e no ferrosas muy pequeñas; 2- Remoción de camadas finas de tinta, óxido y escama (*); 3- Limpieza de piezas fundidas en coquilla o pequeñas piezas maquinadas; 4- Limpieza y preparación de moldes para vidrio y para fundición en coquilla (*); 5- Granallado de cilindro laminador (*);
(*) solamente com granalla angular				

La Tabla III presenta algunos ejemplos de aplicaciones para diversos segmentos industriales, indicando los tipos de abrasivos comunmente utilizados en cada situación.

**TABLA III - Aplicaciones específicas de granallas esféricas y angulares**

<b>APLICACIONES</b>	<b>TIPOS DE ABRASIVOS</b>
<b>AEROESPACIAL</b> Recondicionamiento general Conformación por granallado Shot peening	G-50, G-80 S-780 hasta S-460 S-390 hasta S-110
<b>AUTOMOTIVA</b> Ejes Eje comando de válvulas Cigüeñales Bloques de motores Forjados Chasis Resortes (shot peening) Piezas de transmisión	S-280, S-230 S-280, S-230 S-330 S-550, S-460 S-550 hasta S-330 S-230, S-170, G-40 S-390 hasta S-230 S-230 hasta S-110
<b>ACEROS BASICOS</b> Zoquetes y placas Galvanización Granallado de cilindros Perfiles (barras. etc.) Hojas y chapas Inoxidables Alarmes	G-12, G-14 G-14 hasta G-25 G-12 hasta G-80 S-330 hasta S-170, G-40, G-50 S-330 hasta S-170, G-40, G-50 S-110, S-70 S-170, S-110, G-40, G-50
<b>ALUMINIO</b> Anodos Barras colectoras de cátodos	S-390, S-330 S-280, S-230
<b>EQUIPOS</b> Tanques revestidos Estructuras Piezas maquinadas Metalización Aceros herramienta	G-25 hasta G-50 S-330 hasta S-230, G-18 hasta G-40 G-25 hasta G-120 G-16 hasta G-40 G-50, G-80
<b>FUNDICIONES</b> Hierros fundidos Fundidos no ferrosos Fundidos de acero Escama de forjado Escama de tratamiento térmico	S-550 hasta S-230, G-16 hasta G-25 S-230 hasta S-110, G-40 hasta G-200 S-660 hasta S-330 S-550 hasta S-280, G-12 hasta G-50 S-550 hasta S-280, G-16 hasta G-50
<b>TRANSPORTES</b> Embarcaciones y navíos Vagones y locomotivas Camiones	G-14 hasta G-25 S-230, S-170, G-14 hasta G-50 G-25 hasta G-80

Cuando la operación de granallado tiende a preparar la superficie para la aplicación de tinta o de algún otro tipo de revestimiento, se necesita de un control riguroso de la rugosidad, con la finalidad de garantizar la adherencia adecuada entre el sustrato y el revestimiento. En estos casos, se utilizan granallas angulares, o una mezcla de granallas angulares y esféricas.

La utilización de granallas esféricas, en conjunto con las angulares, aumenta la durabilidad de las granallas (comparativamente a la utilización exclusiva de angulares) y del equipo de limpieza, produciendo, sin embargo, un perfil de anclaje más suave y "menos adherente".

Frecuentemente se observan perfiles de anclajes no satisfactorios, cuyas causas se relacionan, principalmente, a:

- elección de granallas esféricas y angulares de características incompatibles en cuanto al tamaño y a la durabilidad;
- ajuste incorrecto del sistema de exhaustión y separación de abrasivos, produciendo un mix de operación demasiado grueso o demasiado fino;
- práctica inadecuada de reposiciones de granallas, permitiendo el desbalanceo frecuente del mix de operación y el redondeado excesivo de las granallas angulares, alterando el perfil de anclaje.

Sería extremadamente importante establecer una relación entre el tipo y tamaño de abrasivo y la rugosidad de la superficie granallada. Pero, hay un sinnúmero de variables involucradas en una operación de granallado (tipo de equipo, tipo y propiedades del abrasivo, tipo de material, dureza del material, etc.) siendo prácticamente imposible establecer dicha relación.

A pesar de las dificultades para establecer una relación precisa y universal entre el tipo de abrasivo y la rugosidad que produce, algunos investigadores presentan, a título ilustrativo, las rugosidades superficiales obtenidas para diferentes tipos de abrasivos, conforme se puede observar en la Tabla IV. Se utilizaron cuerpos de prueba de acero inoxidable de 0,25 pul, previamente rectificadas con rugosidad de 4 RMS en una dirección y 12 RMS en la dirección transversal, sometidos al granallado por presión directa a seco.

Se observa que las granallas esféricas producen rugosidades menores que las angulares de dimensiones equivalentes, indicando, por lo tanto, la actuación de diferentes mecanismos de limpieza.

Las granallas esféricas simplemente deforman y endurecen la superficie de la pieza, produciendo "ondulaciones" relativamente suaves, mientras que las granallas angulares cortan y penetran profundamente en el metal base, produciendo superficies con perfiles bastante más angulosos.

TABLA IV - Rugosidades superficiales producidas a través de granallado por presión, utilizándose diversos tipos de abrasivos.

RUGOSIDAD (RMS)	TIPO DE ABRASIVO	
	GRANALLA DE ACERO ESFERICA	GRANALLA DE ACERO ANGULAR
38		
45		
55		
60		
65		G-200
70		
80	S-70	
85		
100	S-110	
105		
110	S-170	
115		G-120
120	S-230	
130	S-280	
135	S-330	
140	S-390	
145	S-460	
150	S-550	
160		
185		G-80
210		
250		G-50
300		G-40
325		
350		G-25
400		G-18
425		G-16

Las mediciones de rugosidades de superficies granalladas, a través del empleo de rugosímetros convencionales, producen, normalmente, resultados bastante diferentes de los valores reales obtenidos por microscopios ópticos dotados de escalas micrométricas, conforme se puede observar en la Tabla V.

La Tabla V presenta los resultados comparativos de rugosidades evaluadas a través de ambas técnicas, utilizándose chapas de acero bajo carbono de 0,25 pul, laminadas en caliente.

TABLA V - Rugosidades producidas en chapa de acero laminada en caliente por diferentes tipos de abrasivos, evaluadas a través de equipo convencional y de microscopio especial.

TAMAÑO DEL ABRASIVO	RUGOSIDAD (PERFIL) (mil)		
	MICROSCOPIO	RUGOSIMETRO CONVENCIONAL	DIFERENCIA
NUEVA			
S-390	3.6	2.1	1.5
S-330	3.3	1.6	1.7
S-230	3.0	1.4	1.6
G-16	8.0	3.7	4.3
G-25	4.0	2.8	1.2
G-40	3.6	2.0	1.6
G-50	3.3	1.7	1.6
MIX DE OPERACION			
G-14	4.2	3.3	0.9
G-16	4.3	3.4	0.9
G-25	3.6	1.3	2.3
G-40	3.2	1.2	2.0
G-50	3.4	1.2	2.2

Obs: 1 mil = 25,4 um

## VII - CONSIDERACIONES FINALES

La eficiencia de una operación de granallado depende de la combinación entre la práctica de procedimientos operacionales adecuados, de la realización de mantenimientos periódicos cuidadosos y de la selección de abrasivos de buena calidad, con formas y tamaños que otorgan el grado de acabado superficial deseado.

La calidad de una granalla es influenciada por diferentes variables, como: su composición química, por la cantidad de defectos físicos (grietas, huecos y rechupes), por la microestructura, etc.

La presencia de defectos físicos y microestructurales en las granallas de acero fundidas está íntimamente relacionada a la composición química de la aleación y a las técnicas de desoxidación, desgasificación, granulación, rompimiento (para las angulares) y tratamiento térmico.

Para que siempre puedan producirse granallas fundidas de óptima calidad, es fundamental que se utilicen materias primas y equipos también de excelente calidad, aliados al empleo de técnicas de fabricación y de control de calidad comprobadamente eficaces y, sobretodo, que todo el proceso de fabricación se mantenga siempre estable a lo largo del tiempo.

La estabilidad de una operación de granallado puede ser sensiblemente alterada debido a la utilización de abrasivos de calidad inferior, pudiendo ocasionar serios problemas con el grado de acabado superficial, con la rapidez de limpieza y, evidentemente, con los costos de producción.

Para que todo el proceso de granallado pueda ser mantenido trabajando constantemente dentro de patrones de calidad, de productividad, y de costos adecuados, se recomienda que sea elaborado un programa de mantenimiento periódico para todos los principales componentes del equipo, y que se establezcan procedimientos que seán obedecidos por los operadores del equipo.

Al mismo tiempo, se sugiere que sean registradas todas las ocurrencias operacionales (ej. día, hora, indicación del horímetro, cantidad y tipo de granalla añadida, cantidad de piezas granalladas, etc.) además de las fechas y tipos de piezas cambiadas y, si fuera posible, de sus costos. De esta forma, se conseguirá conocer y controlar la productividad y los costos operacionales de cada equipo y, por consiguiente, de todo el proceso de granallado.

Thales M. Watanabe

Ingeniero Metalurgista

Indústria de Fundição Tupy Ltda.

### **BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

- 01- G. Calboreanu - "Increased Wear Performance of Abrasive Particles", AFS Transactions, V. 98, 1990
- 02- Sergej Toedtll - "Development Work on Blast Cleaning Plants" (Entwicklungsarbeiten an Schleuderstrahlanlagen), Stahl und Eisen 98 (1978) N' 7, 6. April
- 03- H. J. PLASTER, "Blast Cleaning and Allied Processes"
- 04- Eugene Tarabek - "Principles of Centrifugal Blast Machines", Modern Casting, Feb 1983
- 05- SAE J-444 - "Cast Shot and Grit Size Specifications for Peening and Cleaning", 1984
- 06- SFSA 20-66 - "Standard Specification for Cast Steel Abrasives", 1980
- 07- SAE J-445 - "Metallic Shot and Grit Mechanical Testing"
- 08- SAE J-827 - "Cast Steel Shot", 1990
- 09- Tony Gorton & Einar Borch - "The Basics of Blast Cleaning", Modern Casting, Oct. 1987

- 10- S. Dalgety - "Abrasives for Shotblasting", FWP Journal, Sep/83.
- 11- Robert E. Myers "Blast Cleaning Abrasives and their Application", Foundry M&T, Nov/77.
- 12- M. J. Robertson "Foundry Finishing Processes", FWP Journal, Sep/84.
- 13- R. Lindsay & J. Whittaker - "Choice and use of modern metallic abrasives for the cleaning of iron castings", Fettling and Cleaning of Iron Castings, University of Nottingham, BCIRA, Sep/74
- 14- Jack C. Miske - "Using Airless Blast Cleaning Effectively", Foundry M&T, Nov/85
- 15- C. A. Matthews - "Production and Quality Control of Cast Steel Shot and Grit", FWP Journal, Sep/83.
- 16- David A. Hale - "The Function of Shot Blast Cleaning Operation", Modern Casting, V.56, Nov/69
- 17- Ervin Abrasive Test Machine, Bulletin NI 3489
- 18- V. Panchanathan - "Steel Shots and its Application in Foundry", Indian Foundry Journal, V.24, N°10, Oct/78
- 19- H. J. Plaster - "Getting the Best from Blast Cleaning", Foundry Trade Journal, Nov/82
- 20- E. A. Borch - "Effective Use of Shotblasting Abrasives", Modern Casting, Jul/84
- 21- J. B. Hibbs - "Developments in Cleaning and Fettling of Castings", Foundry Trade Journal, Sep/66.