



The Shot Peener's Corner

Nº 30

The Shot Peener's Corner es una colaboración entre ELECTRONICS INC. e IPAR-BLAST, S.L.

Cada artículo, es una traducción del reportaje más destacado de la revista THE SHOT PEENER.

ELECTRONICS INC. es líder mundial en formación y difusión del shot peening.

IPAR-BLAST, S.L. es subcontratista de tratamientos superficiales de precisión.

Entre los cuales se encuentra el shot peening.

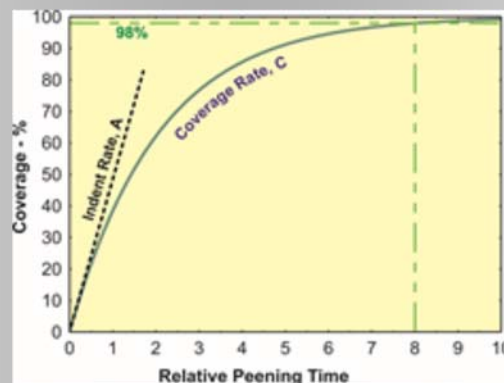
## Requisitos para la cobertura en Shot Peening

*Prof. Dr. David Kirk Universidad de Coventry, Reino Unido* (Texto traducido por Eduardo Vázquez—IPAR-BLAST, S.L.)

### INTRODUCCION

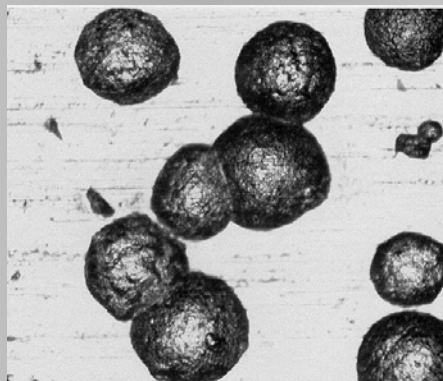
Los usuarios suelen requerir que sus componentes sean tratados hasta cierto grado de cobertura. También requieren que el haz de granalla tenga características determinadas, como la intensidad, el tamaño y el tipo de granalla. El término "cobertura" se entiende como el porcentaje de la superficie a tratar, que se ha impactado al menos una vez. Las pruebas de cobertura son claramente independientes de las pruebas de intensidad y deben determinarse mediante procedimientos específicos, como los descritos en SAE J2277 "Determinación de la cobertura en shot peening".

Todo operario experimentado está familiarizado con el efecto del tiempo de exposición al shot peening en la evolución de la cobertura. La fig.1 es muy similar a la curva de cobertura/tiempo de granallado publicada como fig.3 en la norma SAE J443, 1952. La forma de la curva mostrada se llama "exponencial" porque el valor de cobertura sólo puede acercarse al 100%, pero nunca alcanzarlo. La cobertura es la suma de las contribuciones realizadas por múltiples impactos individuales. Estos impactos se crean en base a un "ritmo de impactos".



*Fig. 1. Relación de cobertura con tiempo de granallado y tasa de impacto.*

Cuanto mayor sea la cobertura, mayor será la posibilidad de que un nuevo impacto se superponga a un impacto anterior, o incluso golpee un clúster de impactos anteriores y no haga ninguna contribución a la cobertura en absoluto. Esto se ilustra en la fig.2.



*fig. 2 Micrografía de acero con muestra de impactos superpuestos.*

Al especificar sus requisitos de cobertura, muchos clientes consideran que "más cobertura es mejor". Por lo tanto, nos encontramos con solicitudes de cobertura del 200% y 300%. Sin embargo, hay que tener en

cuenta que no son los impactos en sí mismos los que mejoran el rendimiento del servicio de los componentes tratados. La mejora proviene principalmente de los niveles de tensión de compresión superficial y también, pero en menor medida, del trabajo de endurecimiento de la superficie. Existe una corriente creciente que considera que los niveles máximos de tensión residual de compresión y el endurecimiento superficial, generalmente ocurren con una cobertura significativamente inferior al 100%. Por lo tanto, en general, "más cobertura, no es lo mejor". Los componentes cementados proporcionan un ejemplo interesante. El rendimiento óptimo de la fatiga generalmente coincide con la presencia de un pequeño porcentaje de austenita retenida en la estructura final templada. Miles de partículas diminutas de austenita actúan como "rutas de escape" para las dislocaciones que se amontonan y que de otro modo iniciarían grietas por fatiga.

Una definición formal de cobertura es la contenida en SAE J2277, 2009:

" La cobertura se define como el porcentaje de una superficie que ha sido impactada al menos una vez. Sin embargo, es muy difícil obtener mediciones precisas de la cobertura por encima del 98%. Por lo tanto, la "cobertura completa" se define como al menos un 98% de la superficie a tratar. Las coberturas superiores a la "cobertura completa", cuando sea necesario, se obtienen usando múltiplos del tiempo requerido para la "cobertura completa".

Esta definición J2277, 2009 de "cobertura completa" está condicionada por la inclusión de las palabras "al menos". Esto, involuntariamente, permite que cualquier cobertura por encima del 98% satisfaga el requisito de "cobertura completa". El defecto se está corrigiendo actualmente sustituyendo la palabra "aproximadamente" por las palabras "al menos".

Los requisitos de cobertura de shot peening estarían probablemente mejor especificados haciendo referencia a la "cobertura completa", donde eso correspondería a "aproximadamente 98%". Cualquier cobertura superior al 98% de cobertura sólo debería ser necesaria si hay pruebas de que no resta rendimiento a los componentes.

Los operarios tienen que ajustar el tratamiento aplicado a los componentes para satisfacer cualquier nivel de cobertura que haya especificado el cliente. Durante sesenta años se ha dispuesto de una relación cuantitativa entre la cobertura y la cantidad de granallado, descrita en SAE J443 1952. Esta relación, junto con otras, se tratará en este artículo. No se necesita ninguna habilidad matemática para usar estas relaciones. Solo será necesario tener la capacidad de hacer una sola medición de cobertura e insertar el resultado en un programa informático adecuado.

## COBERTURA COMPLETA

En la fig. 3 se ilustra un enfoque pictórico de una cobertura del 98%. Este enfoque comienza con la suposición de que la cobertura se mide después de una pasada (o unidad de tiempo equivalente). Si se encuentra que esto alcanza el 98%, entonces se ha alcanzado el objetivo. Sin embargo, si es menos del 98%, entonces se necesitarían más pasadas (o tiempo adicional). La figura 3 muestra cuántas pasadas en total serían necesarias para alcanzar el 98%. Esto incluye cualquier cobertura de más del 32%.

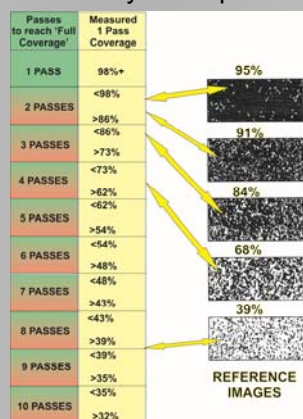


fig. 3. Predicción de pasadas necesarias para una cobertura del 98% utilizando imágenes de referencia.

Si, por ejemplo, se mide una cobertura del 58% después de una pasada, entonces se necesitaría un total de cinco pasadas para alcanzar el 98%. El sombreado "verde a rojo" de las pasadas para alcanzar la "cobertura completa" es un control visual. Por ejemplo, si la cobertura con una pasada era, digamos, 54,5% estaríamos en un área de sombreado rojo. Esto indica que se debe tener cuidado al asumir que se necesitan un total de cinco pasadas, ya que se está confiando plenamente en la precisión de una medición. Por el contrario, si la cobertura de una sola pasada hubiera sido, digamos, el 61 %, entonces estaríamos en una zona de sombreado verde y se podía confiar en la indicación de cinco pasadas para alcanzar el 98%.

Las flechas de las imágenes de referencia en figura 3 muestran los puntos correspondientes en la tabla de pasadas.

### RELACION ENTRE COBERTURA/CANTIDAD DE GRANALLADO

Para tener un control adecuado de la cobertura, es esencial disponer de una relación cuantitativa entre la cobertura y la cantidad de granallado. Tal relación tiene que resolver el problema de la disminución de las contribuciones a la cobertura, de los impactos a medida que avanza el tiempo de granallado. Este problema fue resuelto ya en 1939 por M. Avrami.

#### 1) Ecuación Avrami

La ecuación más simple de Avrami (una de las varias que halló) se emplea comúnmente para relacionar la cobertura con la cantidad de granallado. Esta relación fundamental puede expresarse como:

$$Ct \% = 100[1 - \exp(-A*t)] \quad (1)$$

donde Ct % es la cobertura después de un tiempo t y A es la tasa de impacto.

A es la relación entre el área total de impactos en el área objetivo, producida en 1 unidad de tiempo de granallado. t es el número de unidades de tiempo de granallado utilizadas. Imaginemos, por ejemplo, que en una pasada se impacta en 500 mm<sup>2</sup> de cada 1000 mm<sup>2</sup> de superficie de pieza. La tasa de impacto, A, es entonces 0,5 por pasada. Con dos pasadas el tiempo t, se convierte en 2.

Si se escribe =100\*(1 - EXP(-0.5)) en la barra de fórmulas de una hoja de cálculo de Excel para una celda preseleccionada, obtendremos el valor de 39.3. Esa es la ecuación de Avrami en el trabajo, teniendo en cuenta la superposición de impactos que habrá ocurrido. La sustitución de 1.0 por el 0.5 en la barra de fórmulas daría la respuesta 63.2. Este ejemplo muestra que una cobertura del 39,3% habría resultado de aplicar una tasa de impacto de 0,5 para 1 pasada y 63,2% habría resultado de aplicar 2 pasadas.

#### 2) Cobertura basada en un valor medido de cobertura

La ecuación (1) es principalmente de interés académico - ya que la tasa de impacto, A, rara vez se mide durante la producción. Lo que se mide comúnmente es la cobertura que realmente se logró en 1 unidad de "tiempo", por ejemplo, 1 pasada. La ecuación (1) se puede escribir como:

$$A = -\ln[(100 - C1)/100] \quad (2)$$

donde ln significa logaritmo neperiano y C1 es el porcentaje de cobertura medido después de 1 pasada.

Usando el ejemplo anterior, escribir = -ln((100 - 39.2)/100) en la barra de fórmulas de una hoja de cálculo de Excel produciría 0.50 como el valor de A. La sustitución de 63,2 por el 39,3 arrojaría un valor de 1,0 para A. Esto simplemente muestra que obtenemos los mismos valores al trabajar a la inversa.

El gran valor de la ecuación (2) es que se puede utilizar para determinar la tasa de impacto, A, que se ha aplicado cuando se ha medido una cobertura C1. Este valor de A se puede sustituir en la ecuación (1) - lo que permite la predicción de la cobertura que surgiría para un número determinado de pasadas (o unida-

des de tiempo). Esta operación matemática en dos etapas está integrada en el "Programa predictor de cobertura" basado en Excel, del autor.

Cuando se publicó la SAE J443 en 1952, el acceso universal a los ordenadores no estaba disponible. Se incluyó una forma modificada de la ecuación (1) de modo que se necesitaba una operación matemática de una sola etapa para predecir la cobertura de varias pasadas basándose en una sola medición: C1. Incluso esa operación podría evitarse mediante el uso del "nomograma" incluido. Esta fue una relación directa lograda mediante el uso de papel logarítmico. La forma modificada de la ecuación (1) utilizada era la siguiente:

$$C2 = 1 - (1 - C1)^n \quad (3)$$

donde C1 = % de cobertura (decimal) después de 1 pasada y C2 = % de cobertura (decimal) después de n pasadas.

La ecuación (4) es simplemente la ecuación (3) escrita en formato no decimal y con n reemplazando el 2.

$$C_n = 100(1 - ((100 - C1)/100)^n) \quad (4)$$

donde C1 = % de cobertura después de 1 pasada y Cn = % de cobertura después de n pasadas. La sustitución del valor de 39,3% para C1 (obtenida anteriormente) y n a 2 en la ecuación (4) da una cobertura pronosticada (para 2 pasadas) del 63,2%. Ese es precisamente el mismo valor que se predijo utilizando la ecuación Original de Avrami. Esto no es inesperado porque las ecuaciones (1) y (4) son las mismas— simplemente se presentan de manera diferente. La prueba de esta equivalencia de las ecuaciones Avrami de 1939 y de la SAE J443 de 1952 es sólo de interés académico. A continuación, se aporta una prueba matemática de la equivalencia, porque la declaración debe pasar el rigor académico.

### Prueba de equivalencia de ecuaciones Avrami y J443

Trazabilidad de la conversión de la ecuación Avrami en la ecuación J443.

$$\text{Avrami } C_n = 100 (1 - \exp(-A^n)) \quad (a)$$

Pero  $\exp(-A^n) = (\exp(-A))^n$  por lo que (a) se puede escribir como:

$$C_n = 100 (1 - (\exp(-A))^n) \quad (b)$$

Cuando n = 1 la ecuación (b) se convierte en:

$$C1 = 100(1 - \exp(-A)) \text{ de modo que}$$

$$\exp(-A) = (100 - C1)/100 \text{ así que}$$

$$\exp(-A)^n = ((100 - C1)/100)^n = \exp(-A \cdot n)$$

sustituyendo  $((100 - C1)/100)^n$  por  $\exp(-A \cdot n)$  en la ecuación (a) da:

$$\text{J443 } C_n = 100(1 - ((100 - C1)/100)^n) \quad (c)$$

La ecuación (c) es exactamente la misma que la forma no decimal de la ecuación J443 dada como ecuación (4). Queda demostrado pues.

### PROGRAMA DE PREDICCIÓN DE COBERTURA Y SU APLICACIÓN

Se ha creado un sencillo programa de predicción de cobertura que está disponible de forma gratuita desde [www.shotpeener.com](http://www.shotpeener.com). La figura 4 muestra un ejemplo del programa con el primer punto de datos insertado, según las instrucciones. Se dan predicciones de valores de cobertura numérica, lo que ahorra tener

que leerlos desde el gráfico. El programa calcula el valor A utilizando la ecuación (2) y, a continuación, predice las coberturas utilizando la ecuación (1).

Como ejemplo de precisión de predicción de cobertura, considere la siguiente situación real. En el Cuadro 1 se indica un conjunto de coberturas medidas (no realizadas por el autor).

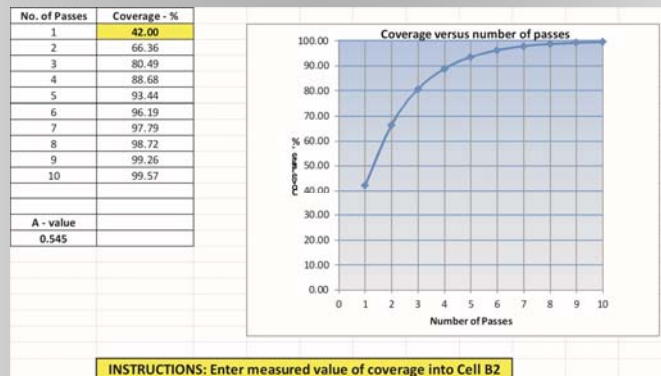


fig. 4 Ejemplo que muestra la aplicación del programa de predicción de cobertura.

La figura 5 muestra los puntos de datos del Cuadro 1 trazados junto con (a) una curva de predicción de cobertura utilizando el primer punto de datos como C1 en la ecuación (2) y (b) una curva Avrami que mejor se ajusta al conjunto de puntos de datos. Se puede ver que las curvas pronosticadas y reales están muy cerca unas de otras. Los puntos de datos reales no se encuentran exactamente en la curva que mejor se ajusta, como sería de esperar.

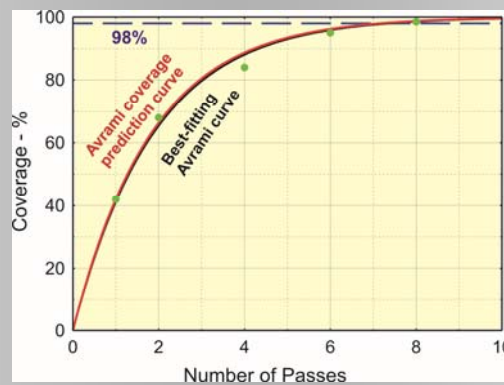


fig. 5. Predicción de cobertura de Avrami y curvas de "mejor ajuste" para los datos indicados en el Cuadro 1.

Es importante tener en cuenta que las ecuaciones descritas anteriormente se basan en el valor de la cobertura realmente medido después de un 'tiempo' conocido.

## PLANIFICACIÓN PREVIA FRENTE A UNA POSTERIOR

### Planificación previa

La sección anterior mostraba cómo se puede predecir la cobertura mediante la planificación previa. Con la planificación previa, la cobertura se mide para una unidad de tiempo de exposición aplicado (como la de una sola pasada) Esto se puede utilizar para calcular la cobertura que se alcanzará utilizando múltiplos de esa unidad de tiempo.

### Posterior

Una alternativa a la planificación previa es utilizar un enfoque posterior. Con este enfoque, el operario asume de antemano que la cobertura requerida se logrará en un número conocido de unidades de tiempo. Por ejemplo: se suponía que se alcanzaría una cobertura del 98% con 6 pasadas. En el examen se encontró que la cobertura era sólo 96%. La pregunta obvia entonces es "¿Cuántas pasadas adicionales serían necesarias para lograr una cobertura del 98%?"

La siguiente es una descripción de cómo se pueden hacer los cálculos "post ". Estos cálculos se pueden llevar a cabo utilizando una versión modificada del programa Predictor de Cobertura –sin necesidad de entender el procedimiento que sigue.

La ecuación (2) se puede modificar para permitir que la cobertura medida sea  $C_n$  y que se dé después de  $n$  pasadas:

$$A - \ln[(100 - C_n)/100]/n \quad (5)$$

A continuación, el valor derivado mediante la ecuación (5) se sustituye en la ecuación (1) utilizando  $t=1$  para derivar  $C_1$ . Este valor derivado de  $C_1$  para el 'valor requerido' se utiliza entonces en el programa Predictor de cobertura. Por ejemplo: si la cobertura después de 6 pasadas resultó ser de un 96% entonces la sustitución en (5) daría que  $A=0,536$ . La sustitución de ese valor en la ecuación (1) con  $t = 1$  daría ese  $C_1$  a 42 %. La sustitución de  $C_1 = 42\%$  en el programa Predictor de Cobertura produciría los resultados mostrados como fig.6

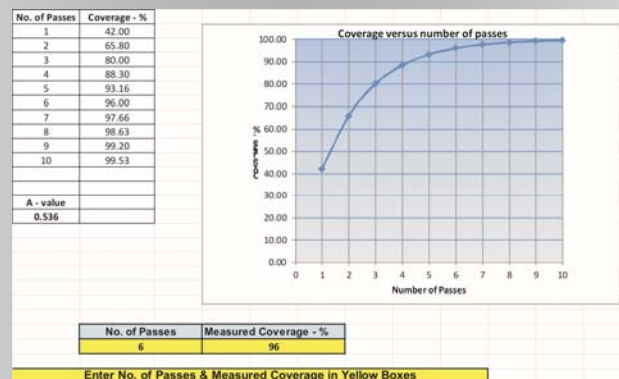


fig. 6. Predicción de cobertura después de una medición de cobertura a seis pasadas.

A partir de eso se pronostica que 8 pasadas darían 98% de cobertura – en lugar de las 6 pasadas que dieron 96%. En la figura 6 se muestra la Hoja 2 del programa Predictor de cobertura modificado que ha realizado los cálculos automáticamente.

## EFFECTO DE LA TASA DE IMPACTO EN LA COBERTURA

Por lo general, los clientes especifican el tipo granalla y la intensidad de tratamiento que se debe aplicar a sus componentes. El caudal de disparo y el tiempo del tratamiento aplicado son entonces los únicos factores de control de cobertura disponibles para el tratamentista. Duplicar el caudal de disparo duplicaría la tasa de impacto, pero solo si también se mantuviera la intensidad de tratamiento. La figura 7 ilustra el efecto de las diferentes tasas de cobertura en la evolución de la cobertura. El rango de tasas de cobertura mostrada no es enorme, simplemente diez a uno.

De la fig.7 se desprende que una tasa de impacto inferior a 0,4 va a ser poco práctica para la mayoría de los propósitos- se necesitan más de diez pasadas para lograr una cobertura del 98%. Un cliente iluminado que requiera una cobertura mínima del 85% podría ser acomodado con una tasa de impacto de sólo 0,2 siempre que se apliquen al menos 10 pasadas. Una segunda conclusión importante de la fig.7 es que el control del caudal es muy importante cuando se trata de controlar las coberturas. Por ejemplo, si una tasa de impacto alcanza una cobertura del 98% en 4 pasadas, entonces una caída del 10% en el caudal significaría que se requeriría una pasada adicional.



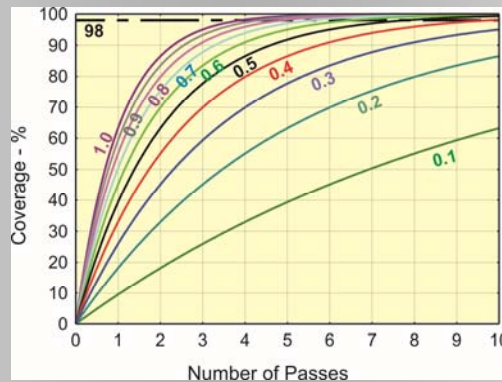


fig. 7. Efecto de la tasa de impacto en la evolución de la cobertura.

### EVALUACIÓN DE LA COBERTURA

La evaluación de la cobertura después de 1 pasada es fundamental para el control de cobertura pre-planificado. La evaluación del componente completamente granallado también es fundamental si se cumplen los requisitos del cliente. Cuanto más precisa sea la evaluación de la cobertura, más fácil será alcanzar ambos objetivos. Una premisa básica es que la evaluación de la cobertura es más precisa cuando la cobertura es del 50% - cuando hay cantidades iguales de áreas impactadas y no impactadas.

Existen una serie de métodos prácticos de evaluación de la cobertura. La combinación más simple es probablemente la de un operador que utiliza una lupa 10x y compara mentalmente las imágenes con las almacenadas en su memoria humana. Esto no debe ser subvalorado como un método. Los operadores experimentados pueden evaluar con precisión la cobertura, con precisión del 5% en coberturas bajas y del 2% en coberturas altas.

La captura de imágenes es vital si se va a conservar un registro de la cobertura. Hay muchos dispositivos aplicables, la mayoría de los cuales ahora implican la grabación de una imagen digital de la superficie impactada. La superficie puede ser fotografiada directamente utilizando la función de zoom de una cámara digital o puede implicar una combinación de cámara digital/ microscopio. De ello se deduce que cuanto mejor sea la óptica, mejor será la calidad de la imagen grabada.

Todos los métodos de evaluación de cobertura requieren algún tipo de referencia de imagen. Las imágenes de referencia se incluyen en la fig.3, pero un conjunto de imágenes digitalizadas es de mucha mejor practicidad. Las imágenes de referencia digitalizadas se pueden manipular por ordenador para que coincidan con las condiciones de iluminación y el comportamiento de reflexión de la superficie de los componentes tratados.

Un conjunto de referencia útil es el que se muestra como fig.8. Este conjunto de imágenes generadas por ordenador fue suministrado amablemente por Dale Lombardo de GE Energy. Las imágenes suministradas se muestran (en escala de grises) como la columna izquierda y después de informatizar la inversión de color (de blanco a negro) a la derecha.

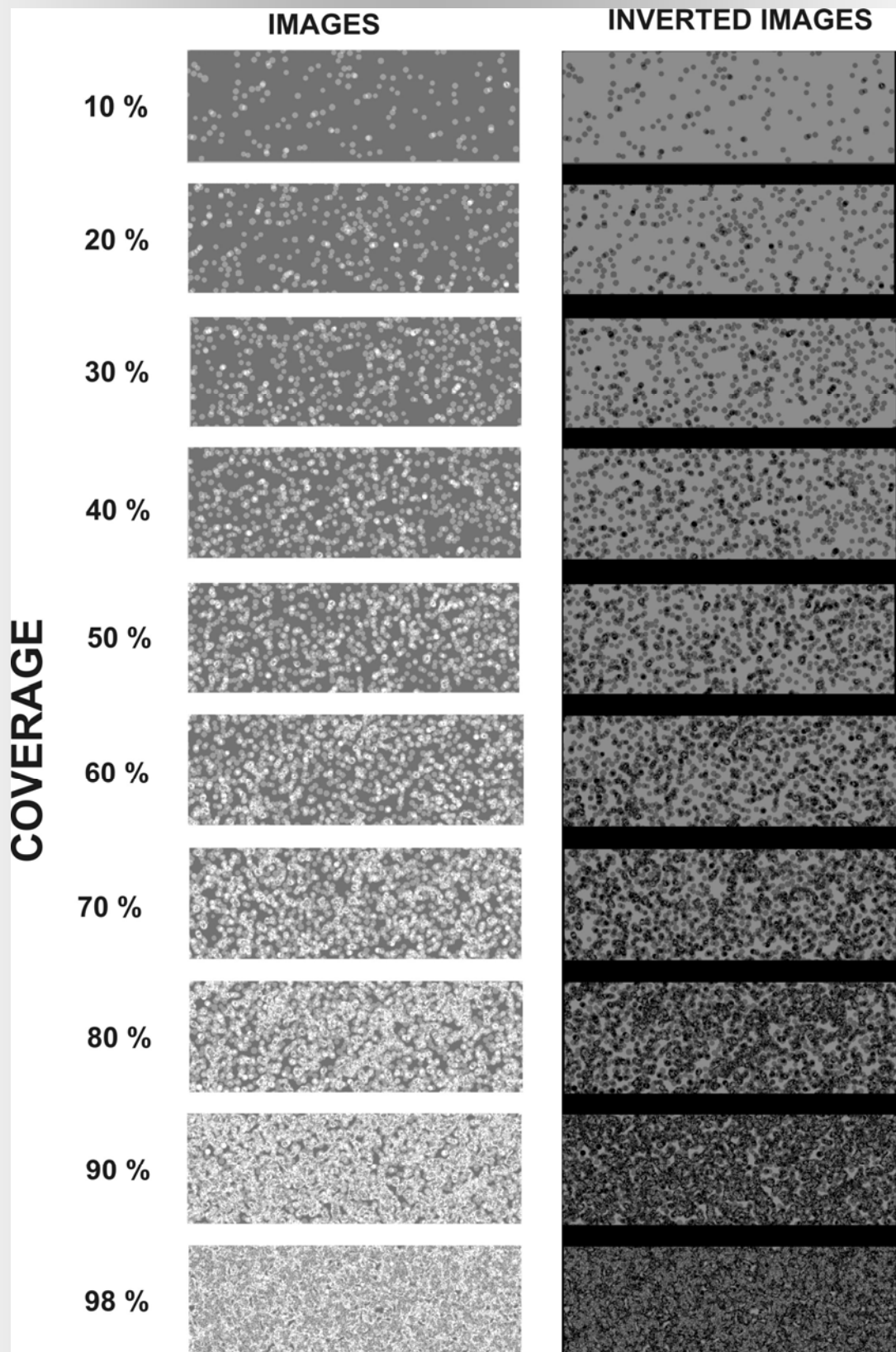


fig. 8. Imágenes de referencia generadas por ordenador. Cortesía de Dale Lombardo, GE Energy.

## DISCUSION

Satisfacer la cobertura de los clientes y los requisitos de intensidad de peening son los dos objetivos principales para los tratamentistas. Los procedimientos descritos en este artículo permiten optimizar la satisfacción de la cobertura. Las ecuaciones presentadas son robustas, bien probadas y están de acuerdo estrechamente con la evolución de la cobertura medida.

Los factores de control para el logro de la cobertura son la tasa de impacto y el tiempo de granallado. Las tasas de impacto se deducen y emplean fácilmente en la predicción de la cobertura. Las tasas de impacto deducidas son sorprendentemente constantes, siempre que el caudal en sí permanezca constante. Cambiar el caudal para cambiar la tasa de impacto tiene problemas: (1) el caudal puede afectar a la velocidad del haz de granalla y (2) los caudales excesivamente altos pueden dar lugar a un embotamiento en la superficie – granalla que rebota impactando sobre granalla que alcanza a la pieza. De ello se deduce que si se cambia el caudal, se debe realizar una nueva medición de cobertura.

Las coberturas pronosticadas que utilizan múltiplos de tiempo son precisas si se realiza una medición de cobertura cuando se ha aplicado aproximadamente un 40-60% de cobertura. Sin embargo, la confirmación de alcanzar un alto nivel de cobertura es difícil. Las imágenes de referencia son muy útiles, especialmente cuando se intenta evaluar los altos niveles de cobertura.



IPAR-BLAST, S.L.  
Parque Industrial Itziar-Deba  
Parcela 4 - Pabellón F2-5  
20829 ITZIAR (Guipúzcoa)  
TEL. 943 820 516  
FAX. 943 820 619  
shot-peening@ipar-blast.com  
www.ipar-blast.com



**Electronics Inc.**  
*Shot Peening Control*

ELECTRONICS INC.  
56790 Magnetic Drive  
46545 MISHAWAKA (Indiana )  
EE.UU.  
TEL: 574-256-5001 / 800-832-5653  
FAX: 574-256-5222  
www.electronics-inc.com