

The Shot Peener's Corner



Nº 22

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.

Optimización de la cobertura en Shot Peening

por el Dr. David Kirk de la Universidad de Coventry (Texto traducido por Eduardo Vázquez—IPAR-BLAST, S.L.)

INTRODUCCION

Por supuesto, en el shot peening, la cobertura en las piezas es muy importante. En la norma SAE J2277 se hace énfasis en la importancia de la optimización de la cobertura con: "... la efectividad del shot peening depende directamente de la cobertura. Una cobertura inadecuada o excesiva podría resultar perjudicial para la fatiga."

Desafortunadamente, muchos usuarios todavía creen en el "Cuanto más, mejor" y requieren tasas de cobertura enormes, p.e. 300%. Este enfoque ignora la importancia de otros factores que gobiernan la cobertura óptima.

La optimización de las propiedades, está normalmente relacionada con la vida a fatiga. La variación de la vida a fatiga en relación a la cobertura, depende del diseño, material y cargas. Para cada combinación, nos encontraremos la correspondiente curva cobertura vs mejora de propiedades. La Fig. 1 muestra una curva simple de cobertura vs mejora de propiedades e ilustra dos importantes propiedades. La primera, que la máxima mejora de propiedades se da, normalmente, con una cobertura inferior al 100%. y segundo, que la mejora de propiedades varía muy levemente a cualquiera de los lados de la cobertura óptima - según lo indica la doble flecha. Si podemos controlar las variables de shot peening entorno a ese óptimo, entonces la mejora de propiedades variará muy poco.

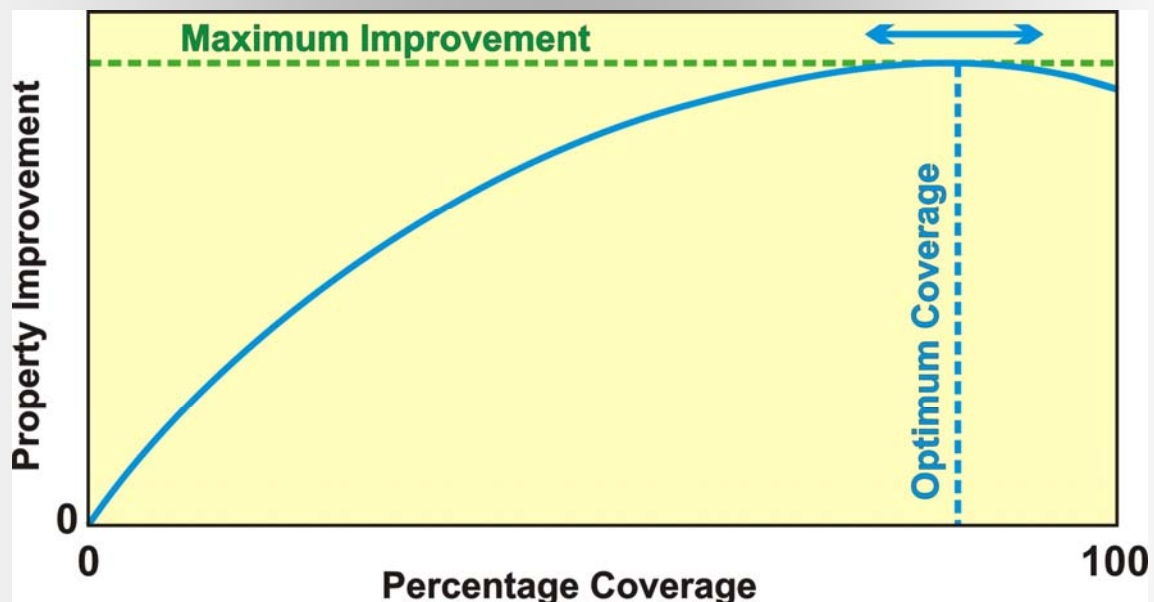


Fig.1. Ejemplo de una curva de optimización de propiedades.

El control de cobertura en el proceso, solo podrá ser conseguido si la cobertura se puede medir con cierto grado de precisión. El 98%, es el máximo grado de cobertura, reconocido como medible con cualquier grado de precisión. Así pues, se entiende que se debería de especificar menos de un 98% de cobertura en el caso de querer que esta sea obtenida de manera consistente.

El shot peening, produce indentaciones en superficie, compacta esta y genera tensiones residuales de compresión en ella. Por lo tanto, decimos que se pueden identificar tres tipos de cobertura:

- Cobertura de indentaciones**
- Cobertura de compactación**
- Cobertura de tensiones**

Las indentaciones per sé, no generan una mejora en el rendimiento en la pieza. Por otro lado, la compactación y las tensiones residuales de compresión, si lo hacen. En la Fig.2, se ilustran los tres tipos de cobertura.

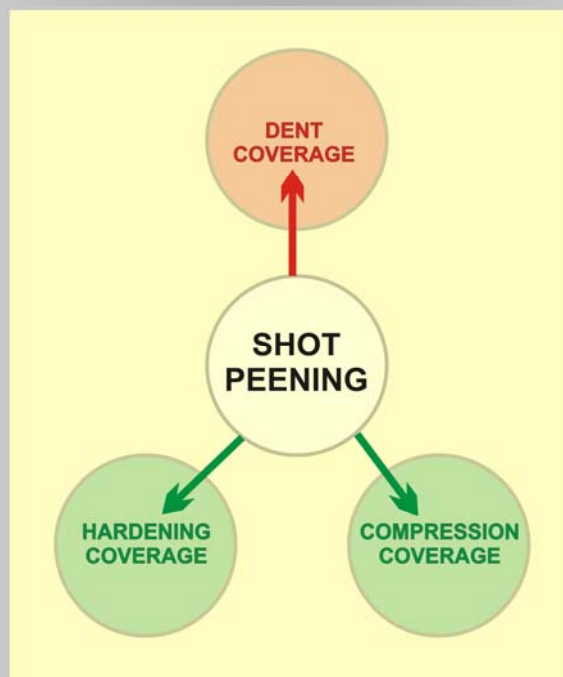


Fig.2. Generación de diferentes tipos de cobertura por shot peening.

Los tres tipos de cobertura, se generan a ritmos diferentes durante el shot peening. Este artículo analiza cada tipo por separado e indica sus efectos en la optimización de la cobertura. La cobertura es una cantidad, y por lo tanto debe tener medios para cuantificarla. Se han incluido varias ecuaciones en el artículo, pero no hace falta ser un matemático para utilizarlas. Programas como excel, hacen ese trabajo.

COBERTURA DE LAS INDENTACIONES

La cobertura por indentaciones es la más popular en el mundo del shot peening. Su mayor ventaja es que es una indicación visual de la cantidad de shot peening. La definición de la SAE J2277 para la cobertura por indentaciones es: "El porcentaje de una superficie que ha sido impactada al menos una vez.". Esta definición, conlleva dos importantes características:

- La cobertura por indentaciones crece con la cantidad de shot peening**
- La probabilidad de múltiples impactos**

La definición citada va, por desgracia, seguida de la siguiente afirmación: "El tiempo mínimo necesario para obtener el 100% de cobertura, se determina por incrementos graduales del tiempo de shot peening hasta que toda la superficie tratada muestre indentaciones superpuestas. Esta afirmación es engañosa ya que implica que con una cantidad suficiente de shot peening se puede asegurar un 100%de cobertura por indentaciones. también implica que una cobertura de un 100% puede ser ventajosa. Ambas, son incorrec-

tas.

Predicción del incremento de la cobertura por indentaciones con el incremento de la cantidad de shot peening.

La predicción del incremento de la cobertura por indentaciones con el incremento de la cantidad de shot peening está bien documentada. Las técnicas de predicción, si embargo, se basan asumiendo dos simplificaciones. Una, que todas las indentaciones son circulares y dos, que todas ellas tienen el mismo radio. Dadas estas asunciones, tenemos una curva cobertura/tiempo con un patrón simple. Este patrón, ha sido analizado y discutido en anteriores artículos de TSP y en ICSP y está incluida en la SAE J2277.

La ecuación matemática que describe el patrón de la curva convencional de la cobertura por indentaciones es:

$$C\% = 100(1 - \exp(-\pi \cdot r^2 \cdot R \cdot t)) \quad (1)$$

Donde **C** es la cobertura, **r** es el radio fijo de las Indentaciones, **R** es el ritmo de la creación de indentaciones por unidad de área y **t** es el tiempo de shot peening.

Como ejemplo, considérese 14 indentaciones por segundo de media generándose en un cuadrado de 10mm por 10mm con indentaciones de radio 1mm. Así, r^2 es 1mm^2 , **R** es 0,14 por mm^2 por segundo y **t** es en segundos. Las unidades en la ecuación (1) se cancelan unas a otras. El producto $\pi \cdot r^2 \cdot R$ es el factor de ritmo de cobertura. En este ejemplo, el factor es de 0,44. La Fig.3, utiliza el factor 0,44. Así, después de 1 segundo, un área de 100mm^2 habrá recibido 14 indentaciones. Por lo que la ecuación (1) predecirá una cobertura media del 36%.

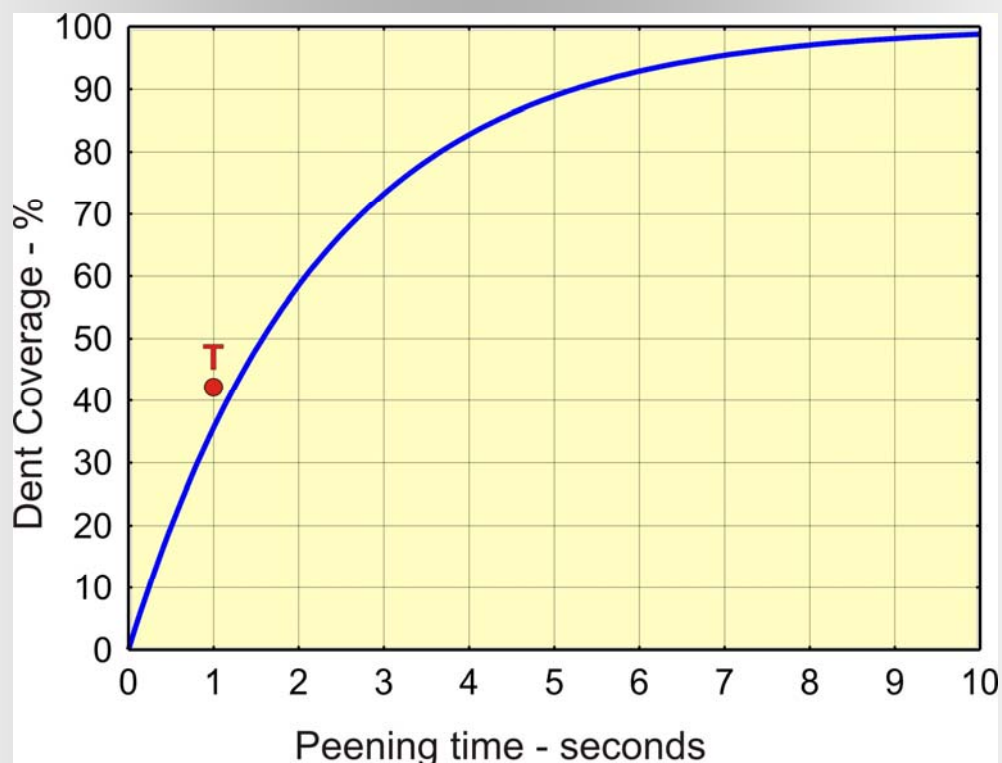


Fig.3. Curva teórica de cobertura media por indentación para impactos de 1mm de radio, generados a un ritmo de 14 por 100mm^2 por segundo.

La curva teórica, mostrada en la Fig.3, tiene exactamente la misma forma que la del ejemplo de la SAE J2277. Es importante resaltar que estas curvas se pueden considerar precisas solo para coberturas, por indentación, promedio. Este hecho se ilustra en la Fig. 4 que contiene 14 indentaciones idénticas de 1mm de radio - equivalentes al shot peening durante 1 seg. Estas indentaciones han sido colocadas aleatoriamente en un cuadrado de 10mm por 10mm - sus centros, han sido posicionados utilizando números generados aleatoriamente por ordenador.. en el ejemplo de la Fig.4, la cobertura por indentación, dentro del cuadrado amarillo y contemplando la medición por varias técnicas que arrojaron el mismo valor, es del 42%, se muestra como "T" en la gráfica. En cambio, la ecuación (1) predijo una cobertura del 36%. La diferencia entre el 42% y el 36%, es debida a la variación estadística. Se ha incluido el valor del 42% en la Fig.3 para enfatizar la desviación estadística. Por lo tanto, deberemos tener en cuenta que existe una diferencia entre la cobertura estadística para un área restringida y la cobertura promedio de un área grande.

Curvas de cobertura del tipo a la mostrada en la Fig.3 (y en la SAE 2277) son muy útiles para la predicción de la cobertura media por indentación. En cualquier caso, la optimización de la cobertura requiere que se tengan en cuenta tanto la cobertura obtenida como el tiempo de shot peening necesitada para alcanzar dicha cobertura.

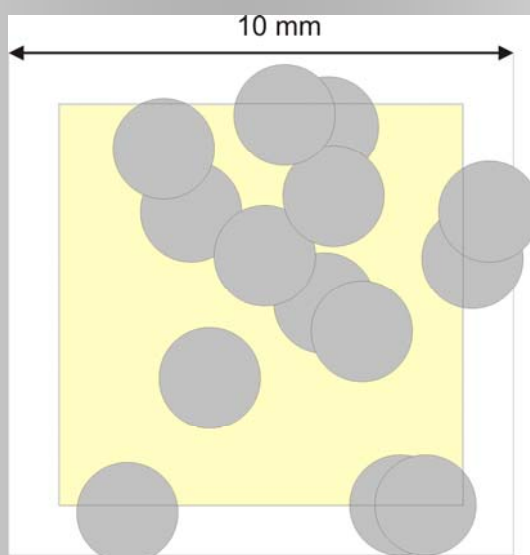


Fig.4. Detalle de 14 impactos circulares distribuidos aleatoriamente con sus centros contenidos en un cuadrado de 100 mm² de área.

La Fig.5 utiliza tres tipos diferentes de ratio de cobertura, $\pi \cdot r^2 \cdot R$, e invierte los ejes comunmente utilizados en cobertura. Esta inversión en los ejes está pensada para enfatizar y dar otro punto de vista acerca de la obtención de diferentes niveles de cobertura deseados. Al ritmo más bajo de cobertura (mostrado en negro) se estima que se alcanzará una cobertura del 86% en la mitad del tiempo necesario para obtener una cobertura del 98%. Para una cobertura objetivo del 98%, pequeños cambios en el tiempo de shot peening provocarán solo pequeños cambios en la cobertura por indentación. En cambio, si la cobertura deseada es del 86%, pequeños cambios en el tiempo de shot peening provocarán cambios mucho mayores en la cobertura por indentación.

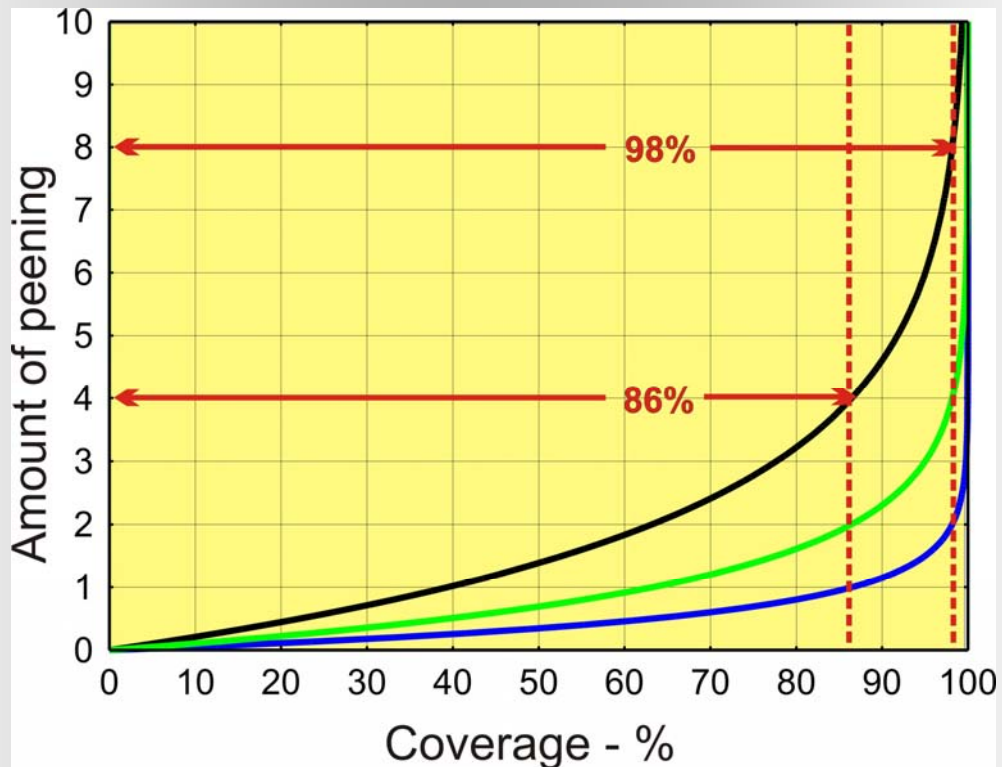


Fig.5. Curvas de cobertura utilizando ejes inversos.

Predicción de múltiples impactos con el incremento del tiempo de shot peening

Se define como impacto múltiple, como una parte de la superficie en el que haya dos o varios impactos superpuestos. La Fig.6 muestra un doble impacto en A y uno triple en B

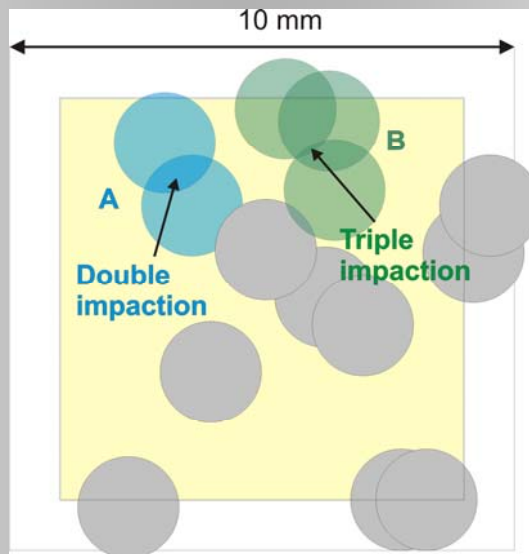


Fig.6. Ejemplos de impactos múltiples con solo un 42% de cobertura.

La probabilidad de múltiples impactos, aumentará conforme aumente la cobertura. La ecuación matemática que describe la contribución a la cobertura de n impactos superpuestos es:

$$C_n\% = 100[(\pi \cdot r^2 \cdot R \cdot t)^n / n!] \cdot \exp(-\pi \cdot r^2 \cdot R \cdot t) \quad (2)$$

Donde C_n es la contribución a la cobertura total de áreas n -impactadas, r es el radio de los Impactos, R es el ritmo de creación de impactos por unidad de área, n es el número de Impactos que un area en concreto ha recibido, t es el tiempo de shot peening y $n!$ es el factorial de n . El factorial n es $1 \cdot 2 \cdot 3 \dots \cdot n$, de modo que, por ejemplo, cuando $n = 4$ entonces factorial $n = 24$ ($1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4$).

La Fig7. utiliza las ecuaciones (1) y (2) para representar la contribución a la cobertura total de impactos múltiples. Las graficas son para valores de n de 1 a 9, r igual a 1 mm y R igual a 0,14 impactos por mm^2 por segundo (como en fig.3).

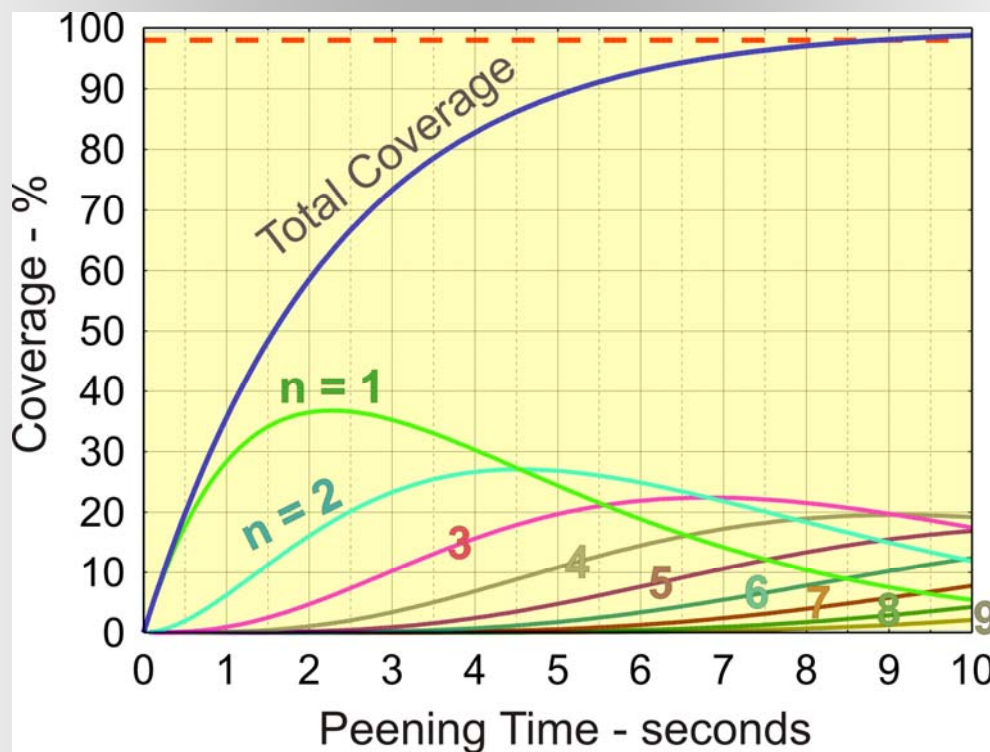


Fig.7. Contribución a la cobertura total de múltiples superposiciones.

La Tabla 1 presenta cálculos -hechos con las ecuaciones (1) y (2)- de la contribución en porcentajes de cobertura de cada una de las curvas de impactos múltiples para diferentes tipos de tiempo de shot peening.

Tabla 1. Efecto del tiempo de shot peening en la contribución a la cobertura de impactos múltiples.

Time - s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n = 1	28.34	36.50	35.26	30.28	24.38	18.84	14.16	10.42	7.55	5.40
n = 2	6.23	16.06	23.27	26.65	26.81	24.87	21.80	18.34	14.95	11.88
n = 3	0.91	4.71	10.24	15.63	19.66	21.88	22.38	21.52	19.73	17.43
n = 4	0.10	1.04	3.38	6.88	10.82	14.44	17.23	18.93	19.53	19.17
n = 5	0.01	0.18	0.89	2.42	4.76	7.63	10.62	13.33	15.47	16.87
n = 6	6.49E-04	0.03	0.20	0.71	1.74	3.36	5.45	7.82	10.21	12.37
n = 7	4.08E-05	3.36E-03	0.04	0.18	0.55	1.27	2.40	3.93	5.78	7.78
n = 8	2.24E-06	3.70E-04	0.01	0.04	0.15	0.42	0.92	1.73	2.86	4.28
n = 9	1.10E-07	3.62E-05	8.96E-04	0.01	0.04	0.12	0.32	0.68	1.26	2.09
>9	5.03E-09	3.46E-06	1.34E-04	1.61E-03	0.01	0.04	0.13	0.34	0.76	1.49
TOTAL	35.60	58.52	73.29	82.80	88.92	92.86	95.40	97.04	98.09	98.77

Como ejemplos: A un 35,6% de cobertura, los Impactos simples predominan a pesar de que el 1% de la superficie ha recibido al menos tres impactos. A un 88,9% de cobertura, la mayor contribución a esta se da con impactos dobles, seguidos de impactos simples, pero también con más de un 2% de la superficie con al menos 6 impactos.

COBERTURA DE COMPACTACION

La compactación es uno de los dos efectos beneficiosos del shot peening - siendo el otro la creación de tensiones residuales de compresión. Alrededor de cada impacto, se crea una zona compactada tal y como esquematiza la sección visualizada en la Fig.8.

En vista en planta, el diámetro de la zona compactada, $2d$, será prácticamente el doble del diámetro del impacto, d . La compactación necesita forzosamente que el estrés aplicado supere el límite elástico. Esto significa que la zona tiene un límite definible.

La ecuación que define la forma de la curva de cobertura por compactación es:

$$WH\% = 100(1 - \exp(-\pi \cdot r^2 \cdot R \cdot t)) \quad (3)$$

Donde **WH** es la cobertura por compactación, r es el radio fijo de las zonas circulares de compactación, **R** es el ritmo de creación de zona compactada por unidad de area y **t** es el tiempo de shot peening.

Duplicando el radio, r , de cualquier zona, se multiplica por cuatro el factor de ritmo de cobertura, $\pi \cdot r^2 \cdot R$, (p.ej., hasta 1.76 cuando la cobertura por indentación tiene un factor de 44). Nótese que **R** es el mismo para ambos tipos de cobertura para un ritmo determinado de impactos. La cobertura de compactación aumenta a un ritmo mayor que el de la cobertura por Indentación. Al final del artículo, en el apartado discusión, hay unas comparativas.

Las ecuaciones (1) y (3) pueden ser utilizadas para cuantificar la diferencia entre ambos tipos de cobertura. La ecuación (1) predice que se obtendrá una cobertura del 98% en 8,9 segundos en el caso de utilizar un factor de 0,44. Sustituyendo 8,9 y 1,76 en la ecuación (3) la predicción de cobertura por compactación se torna en un 99,99999%. Esto significa que tendremos una cobertura virtualmente completa por compactación - algo muy deseable - cuando la cobertura por indentación haya alcanzado un 98%.

Las zonas de compactación, se superponen de la misma manera que los impactos. el efecto de multiples superposiciones es que habrá multiples compactaciones. En general, mucha compactación es buena. La excepción viene cuando la ductilidad del material es superada. La ecuación matemática que describe la contribución a la cobertura por compactación de n múltiples impactos es:

$$WH_n\% = 100[(\pi \cdot r^2 \cdot R \cdot t)^n / n!] \cdot \exp(-\pi \cdot r^2 \cdot R \cdot t) \quad (4)$$

Donde **WH_n** es la contribución a la cobertura total por compactación de areas n -impactadas, r es el radio de las zonas compactadas, **R** es el ritmo de creación de zonas compactadas por unidad de area, **n** es el número de impactos que ha recibido un area en particular, **t** es el tiempo de shot peening y **n!** es el factorial de **n**.

La ecuación (4) se puede usar para hacer una tabla equivalente a la de cobertura por indentación. Por motivos de comparativa, en la Tabla 2 solo se muestran valores de cobertura por compactación a un 98% de cobertura por indentación.

Tabla 2. Comparación de las contribuciones a la cobertura cuando la cobertura por indentación es del 98%.

Tiempo - s	Contribución	Contribución	Contribución
	Compactación Multiple	Indentación Multiple	Stress Multiple
	9	9	9
n = 1	0.00	7.55	1,00E-35
n = 2	0.00	14.95	4,96E-34
n = 3	0.01	19.73	1,64E-32
n = 4	0.03	19.53	4,05E-31
n = 5	0.11	15.47	8,01E-30
n = 6	0.29	10.21	1,32E-28
n = 7	0.66	5.78	1,87E-27
n = 8	1.30	2.86	2,31E-26
n = 9	2.28	1.26	2,55E-25
>9	95.32	0.76	100
TOTAL	100.00	98.09	100

Los valores de la tabla 2, sustentan el comentario previo: " tendremos una cobertura virtualmente completa por compactación - algo muy deseable - cuando la cobertura por indentación haya alcanzado un 98%". Cuando la cobertura por indentación ha alcanzado el 98%, menos de un 1% de la superficie tendrá más de 9 superposiciones. Comprárese que el 95% de la superficie tendrá más de 9 superposiciones de zonas compactadas. También se ha Incluido una columna con la contribución de las zonas multiestresadas, y se discutirá en la siguiente sección.

COBERTURA POR ESTRÉS

So riego de ser repetitivo, "Las indentaciones en superficie normalmente no suelen mejorar el rendimiento en servicio. La compactación y las tensiones residuales, al contrario, si lo hacen." La compactación por shot peening en superficie genera tensiones residuales de compresión beneficiosas en superficie. Cada impacto aislado, estará rodeado de una zona de material compactado y sometido a tensiones residuales de compresión. La Fig.9 muestra esta zona. Al contrario de los impactos y de la zona compactada, la tensión residual de compresión superficial inducida no tiene un límite claramente definido sólo sigue y sigue.

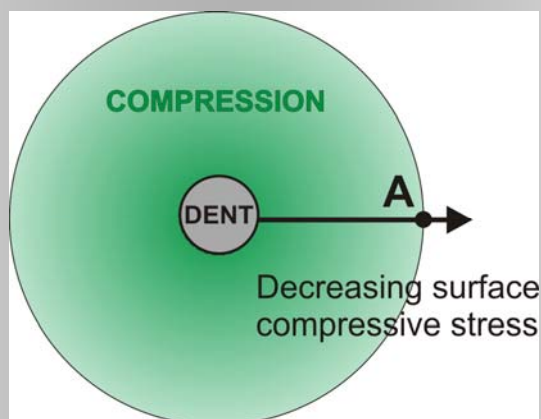


Fig.9. Representación esquemática de la zona circundante a un impacto afectada por la tensión de compresión.

El nivel de tensiones residuales de compresión decrece en función a la distancia desde el vértice del impacto. La Fig.9 muestra una zona de hasta cinco veces el diámetro del impacto. En el ICSP9, Kirk y Hollyoak presentaron un trabajo muy revelador acerca de la relación entre la cobertura y la tensión residual superficial, pags. 373 y 378. El trabajo, cuantificaba la variación de la tensión residual superficial con res-

pecto a la distancia del vértice del impacto. La Fig.10 muestra la medición de la tensión residual superficial para impactos de diámetro 0,67mm, en acero dulce. La tensión residual superficial generada, se añade a cualquier tensión superficial existente. En este ejemplo, la tensión superficial previa al shot peening era de 20 MPa. El punto a de la curva, a $1\frac{1}{3}$ mm del vértice del impacto, Indica que la tensión residual superficial está dentro de 20 MPa de su nivel máximo de -120 MPa. El punto a se corresponde con un diámetro cinco veces el del impacto, también representado en la Fig.9. Se podría considerar que el punto A representa el radio máximo para una cobertura efectiva por tensión residual de compresión.

La ecuación (5), presentada en ICSP9, es la ecuación que predice la variación de la tensión residual superficial (en las probetas de acero dulce que se estudiaron).

$$\sigma = -140 (\exp(-d^2)/10) + S \quad (5)$$

donde σ es la tensión residual en MPa, d es la distancia desde el borde del impacto y S es el nivel de estrés de la superficie no tratada.

La ecuación para la cobertura por tensión residual de zonas superpuestas es::

$$S_n\% = 100[(\pi \cdot r^2 \cdot R \cdot t)^n/n!] \cdot \exp(-\pi \cdot r^2 \cdot R \cdot t) \quad (6)$$

donde S_n es la contribución a la cobertura total por tensiones residuales de compresión de áreas n -impactadas, r es el radio de las zonas 'Point A', R es el ritmo de creación de zonas por unidad de área, n es el número de impactos recibidos en un área particular, t es el tiempo de tratamiento y $n!$ es el factorial de n .

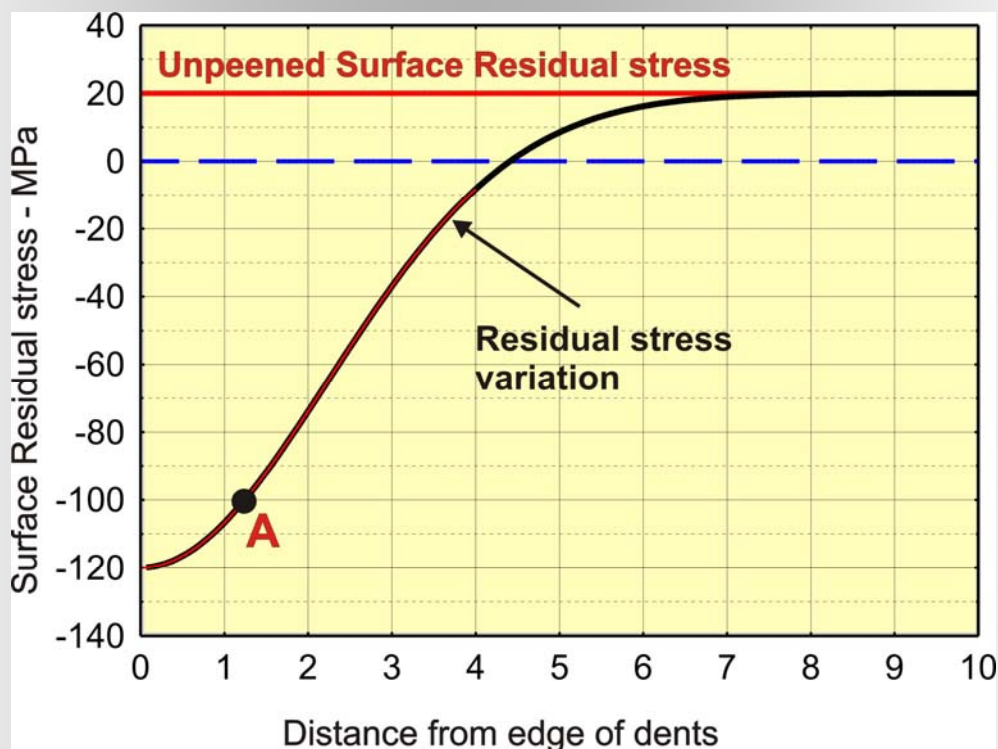


Fig.10. Variación de la tensión residual superficial vs la distancia de los impactos.

Las estimaciones basadas en la ecuación (6) cuantifican la cobertura por tensión residual de la misma manera que aquellas derivadas de la cobertura por indentaciones y aquella por compactación. Dichas

estimaciones, confirman que la cobertura por tensiones se aproxima al 100% muy, muy rápido - tal y como se ilustra en la Fig.12. Los valores mostrados en la tabla 2 son astronómicamente pequeños para cualquier zona que reciba menos de 9 superposiciones de tensión de compresión. En la Fig.11 se hace una pequeña representación gráfica donde solamente 4 impactos (de los catorce que generaron un 42% de cobertura en la Fig.4) han sido rodeados por zonas de tensión residual de compresión 5 veces mayores que el diámetro de cada impacto. Aquí, tenemos un 100% de cobertura con superposición generalizada de estas zonas de tensión residual de compresión beneficiosa (mostrada en verde).

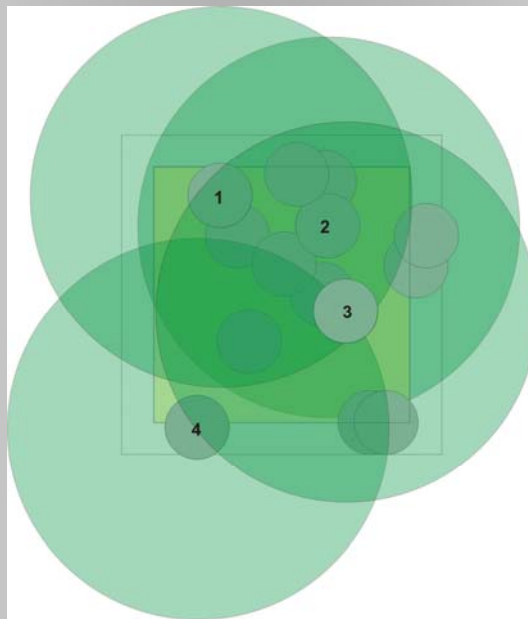


Fig.11. Cobertura por tensiones con solamente cuatro impactos.

DISCUSION

La cobertura ideal por indentaciones se da cuando las propiedades de servicio deseadas alcanzan su máximo. En cualquier caso, no son únicamente los impactos los que mejoran las características. La compactación y la generación de tensiones residuales de compresión son los factores principales que generan la mejora de las características. Los impactos, la compactación y las tensiones residuales actúan conjuntamente, pero a ritmos radicalmente diferentes, como se muestra en la Fig.12.

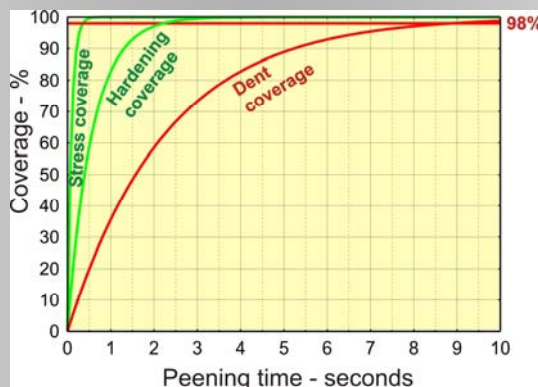


Fig.12. Ritmos de cobertura relativos para impactos, compactación y tensión residual superficial.

El análisis presentado en este artículo indica que no hay una justificación para intentar generar una cobertura del 100% por indentaciones. A la máxima cobertura medible del 98%, virtualmente, ninguna de las áreas tratadas habrá recibido menos de tres zonas compactadas superpuestas. Al 98% de cobertura por indentación, el área que haya recibido menos de nueve zonas de tensión residual, será astronómicamente pequeña (mucho menor que la marca de un alfiler respecto a la superficie total de la tierra, 510 millones de Km²)

Es delirante creer que al 98% de cobertura por indentación, una pieza tendrá un 2% de la superficie sin protección ya que ese 2% estará bien protegido por una combinación de compactación y tensión residual de compresión superficial. Algunos estudios prácticos han demostrado que la mejora óptima de las propiedades de algunos componentes se suele dar con frecuencia bastante por debajo de ese 98%. Como siempre, se deberían realizar pruebas concretas para cada componente de cara a confirmar el nivel de cobertura óptimo, evitando la máxima : "cuanto más, mejor".



IPAR-BLAST, S.L.
Pol. Ind. Ibur Erreka, 40 - bajo 1
20600 EIBAR (Guipúzcoa)
TEL. 943 820 516
FAX. 943 820 619
shot-peening@ipar-blast.com
www.ipar-blast.com



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