

SHOT PEENING

A P L I C A C I O N E S

O C T A V A E D I C I O N



METAL IMPROVEMENT COMPANY, INC.

Subsidiary of Curtiss-Wright Corporation

INDICE

Tabla de conversión	2,3
Introducción	5

CAPITULO 1: TEORIA

Proceso shot peening	6
Tensiones residuales del shot peening	7
Superposición de tensiones de servicio y residuales	8
Estudio de caso : <i>propagación de grieta, NASA Langley</i>	8
Profundidad de las tensiones residuales	9
Típos de bolas	9
Efecto de la dureza de las bolas	9

CAPITULO 2: COMPORTAMIENTO DE LOS METALES

Aceros con altas características	10
Aceros cementados	11
Estudio de caso : <i>Cigüeñas de altas potencias</i>	11
Decarburación	11
Estudio de caso : <i>Reducción de la tasa de austenita</i>	12
Fundición Nodular Austemplada	12
Las fundiciones	12
Aleaciones de aluminio	13
Estudio de caso : <i>Aluminio 7050 - T7651</i>	13
El titanio	14
El magnesio	14
Metales sinterizados	15
Estudio de caso : <i>Engrenajes sinterizados de alta densidad</i>	15

CAPITULO 3: PROCEDIMIENTOS DE FABRICACION

Efectos sobre la duración de vida	16
Soldeo	16
Estudio de caso : <i>Fatiga de estructuras offshores soldadas</i>	17
Estudio de caso : <i>Rotores de turbina de compresor HP</i>	17
Rectificación	18
Revestimiento metálicos	18
Anodización	19
Estudio de caso : <i>Corona de aluminio anodizado</i>	19
Proyección plasma	19
Electroerosión (EDM)	19
Mecanizado electroquímico (ECM)	20
Estudio de caso : <i>Láminas de acoplamiento</i>	20

CAPITULO 4: FATIGA DE FLEXION

Fatiga de flexión	21
Engrenajes	21
Bielas	22
Cigüeñas	23
Estudios de caso : <i>Cigüeñas de motores diesel</i>	23
Estudio de caso : <i>Discos de turbina de motor de avión</i>	23

CAPITULO 5: FATIGA DE TORSION

Fatiga de torsión	24
Muelles de compresión	24
Arbol de salida de potencia	25
Barras de torsión	25
Estudio de caso : <i>Barras de torsión automóvil</i>	25

CAPITULO 6: FATIGA AXIAL

Fatiga axial	26
Estudio de caso : <i>Eje de frenado de urgencia de tren</i>	26
Estudio de caso : <i>conducto de escape de APU</i>	26

CAPITULO 7: FATIGA DE CONTACTO

Fallo de fretting	27
Estudio de caso : <i>Aletas y álabes de turbinas</i>	27
Pitting	27
Gripado	28

CAPITULO 8: FALLO POR CORROSION

Rotura en corrosión	29
Corrosión bajo tensión (SCC)	29
Estudio de caso : <i>Instalación de producción química</i>	30
Fatiga corrosión	30
Estudio de caso : <i>Fragilización con hidrógeno</i>	30
Estudio de caso : <i>implantes quirúrgicos</i>	31
Corrosión intergranular	31

CAPITULO 9: FATIGA TERMICA Y EFECTOS TERMICOS

Efectos de la temperatura	32
Fatiga térmica	33
Estudio de caso : <i>Caldera de centrales térmicas</i>	33

CAPITULO 10: OTRAS APLICACIONES

Peenforming	34
Corrección de forma	35
Plastificación	35
Texturizado por Peentex sm	36
Optimización del estado de superficie	36
Estudio de caso : <i>Tubos de transporte neumático</i>	37
Estudio de caso : <i>Industria alimenticia</i>	37
Corrosión exfoliante	38
Compactado de porosidades	38

CAPITULO 11: PROCEDIMIENTOS Y SERVICIOS COMPLEMENTARIOS

Agujeros y superficies internas	39
Doble Shot Peening	39
El procedimiento C.A.S.E. sm	40
Shot peening en obra	41
Shot peening bajo tensión	41
Peentress sm - Modelización de la tensión residual	42
Lasershot sm Peening	43
Válvulas - Fabricación	43
Reproducción - Artículos técnicos	44
Tratamiento térmico	44

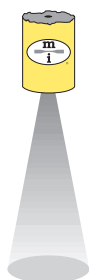
CAPITULO 12: CONTROL DEL PROCESO

Control del proceso	45
Control de las bolas	45
Control de intensidad	46
Control de cobertura	47
Equipo de Shot Peening automatizado	48
Estudio de caso : <i>El SPCO aumenta la duración de vida de las turbinas</i> ..	49
Especificar el Shot Peening	50

Articulos técnicos MIC	51-55
Lista de las fabricas MIC	Respaldo del manual

TABLA DE CONVERSION DE LA DUREZA CON RESISTENCIA A LA TRACCION DE LOS ACEROS

<i>Dureza Rockwell HRC</i>	<i>Dureza Brinell BHN</i>	<i>Dureza Vickers HV</i>	<i>Resistencia a la tracción ksi</i>	<i>Resistencia a la tracción MPa</i>
62	688	746	361	2489
61	668	720	349	2406
60	649	697	337	2324
59	631	674	326	2248
58	613	653	315	2172
57	595	633	305	2103
56	577	613	295	2034
55	559	595	286	1972
54	542	577	277	1910
53	525	560	269	1855
52	509	544	261	1800
51	494	528	253	1744
50	480	513	245	1689
49	467	498	238	1641
48	455	484	231	1593
47	444	471	224	1544
46	433	458	217	1496
45	422	446	211	1455
44	411	434	206	1420
43	401	423	201	1386
42	391	412	196	1351
41	381	402	191	1317
40	371	392	186	1282
39	361	382	181	1248
38	352	372	176	1214
37	343	363	171	1179
36	334	354	166	1145
35	325	345	162	1117
34	317	336	158	1089
33	309	327	154	1062
32	301	318	150	1034
31	293	310	146	1007
30	286	302	142	979
29	279	294	138	952
28	272	286	134	924
27	265	279	130	896
26	259	272	127	876
25	253	266	124	855
24	247	260	121	834
23	241	254	118	814
22	235	248	116	800
21	229	243	113	779
20	223	238	111	765



CONVERSIONES USUALES ASOCIADAS AL SHOT PEENING

<i>Del sistema métrico al sistema Anglosajón</i>		<i>Del sistema Anglosajón al sistema métrico</i>	
Longitud	1 mm = 0.0394 in	1 in = 25.4 mm	
	1 m = 3.281 ft = 39.37 in	1 ft = 0.3048 m = 304.8 mm	
Superficie	1 mm ² = 1.550 x 10 ⁻³ in ²	1 in ² = 645.2 mm ²	
	1 m ² = 10.76 ft ²	1 ft ² = 92.90 x 10 ⁻³ m ²	
Masa	1 kg = 2.205 lbm	1 lbm = 0.454 kg	
Fuerza	1 kN = 224.8 lbf	1 lbf = 4.448 N	
Tensión	1 MPa = 0.145 ksi = 145 lbf/in ²	1 ksi = 6.895 MPa	

ABREVIATURAS DIVERSAS & CONSTANTES

lbm = lb (masa)

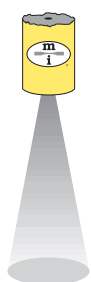
lbf = lb (fuerza)

k = kilo = 10³M = mega = 10⁶G = giga = 10⁹μ = micra = 10⁻⁶1 Pa = 1 N/m²lbf/in² = psi

ksi = 1000 psi

μm = micra = 1/1000 mm

Modulo de Young (E) para acero = 29 x 10⁶ lbf/in² = 200 GPaAceleración de la gravedad = 32.17 ft/s² = 9.81 m/s²Densidad acero = 0.283 lbm/in³ = 7.832 x 10⁻⁶ kg/mm³



METAL IMPROVEMENT COMPANY (MIC) es una filial al 100% de Curtiss Wright Corporation. Fundada en 1946, MIC se ha especializado en la subcontratación de aplicaciones industriales del Shot Peening como medio de prevención contra las roturas de materiales metálicos. MIC dispone de sitios de producción en Norteamérica y en Europa del Oeste y posee licencia de procesos a través del mundo entero. Además, MIC maneja una red de fábricas de tratamientos térmicos y también produce válvulas elásticas. Existe una lista completa de las unidades MIC en el respaldo de este manual.

Cada unidad MIC es capaz de tratar piezas de diversas formas, tamaños y materiales con controles operatorios muy estrictos. MIC no deja de desarrollar nuevos equipos de Shot Peening gracias a su experiencia única de más de 50 años.

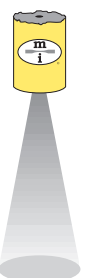
Metal Improvement Company, Inc es el líder mundialmente reconocido en desarrollo de aplicaciones y de controles utilizados en el Shot Peening. Este manual “las aplicaciones del Shot Peening”, cuya edición es la octava, se sustituye a la séptima como siendo el manual más pertinente sobre el proceso de Shot Peening controlado.

La traducción literal española de Shot Peening es “granallado de pretensión” pero su uso no se practica porque se puede confundir con el “granallado” tradicional (grit blasting). Es una técnica sencilla de preparación de superficie por proyección no controlada de abrasivos metálicos. El chorreado (sand blasting) utiliza, él, abrasivos no metálicos. Cada vez que se lee “pieza Shot Peenizada” en este manual, se deberá entender que la pieza fue tratada por Shot Peening.

MIC dispone de un soporte, el “Shot Peening Applications – The Video”. Es un instrumento idóneo para los grupos de trabajo y reuniones técnicas, y más particularmente cuando lo presenta uno de nuestros encargados de los servicios técnicos. Para más información, le invitamos a ponerse en contacto con la fabrica MIC más cercana, nuestra oficina central internacional o visitar nuestro nuevo sitio web www.metalimprovement.com. Esta edición existe también en francés, en alemán, en inglés, y en italiano.

MIC está encantada de compartir su experiencia y su tecnología en el asunto del Shot Peening para que los ingenieros y los metalúrgicos puedan estar informados de las ventajas de este tratamiento mecánico de superficie. Nuestros encargados de los servicios técnicos están dispuestos a ayudarles en la búsqueda de soluciones a numerosos problemas que puede resolver el Shot Peening.

Copyright © 2001
By
Metal Improvement Company, Inc.



EL PROCESO SHOT PEENING

El Shot Peening es un procedimiento de plastificación en frío que consiste en martillar la superficie de la pieza con pequeñas bolas esféricas. Cada bola deja un impacto sobre la superficie de forma redondeada como si fuese un minúsculo martillo. Para que se forme esa huella, es necesario que la capa esté deformada en superficie en tracción (FIGURA 1-1). Bajo la superficie, el material comprimido intenta volver a su volumen inicial, creando así tensiones de compresión de fuerte amplitud (FIGURA 1-2). El recubrimiento de las huellas permite obtener una tensión residual de compresión isotrópica y uniforme.

Se reconoce que las grietas no se inician ni se propagan en un volumen de compresión. Ya que la mayor parte de roturas por fatiga y corrosión bajo tensión tienen su origen en la superficie o la cercanía de la superficie, las tensiones residuales de compresión introducidas por Shot Peening aumentará sensiblemente la duración de vida de las piezas metálicas. La amplitud de las tensiones residuales producidas por Shot Peening es superior a la mitad del límite elástico del material Shot Peenizado.

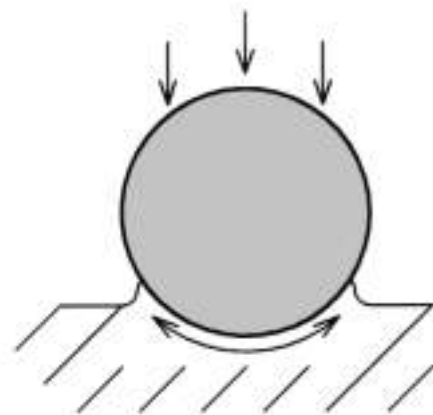


FIGURA 1-1 Deformación Plástica al Punto de Impacto



FIGURA 1-2 La Compresión se Opone a la Fisuración

El denominador común de la mayoría de los modos de rotura a largo plazo es la tensión de tracción. Esas tensiones pueden resultar de las solicitaciones externas o ser residuales, es decir permanentes, creadas por procesos de fabricación tal y como el soldeo, la rectificación y el mecanizado. Las tensiones de tracción tienden a estirar la superficie y pueden producir inicio de grietas (FIGURA 1-3). Las tensiones residuales de compresión aprietan las juntas de granos y retrasan o bloquean el inicio de grieta. Ya que la propagación de las grietas se modera por la capa de compresión, aumentando la profundidad de la compresión se aumenta la resistencia a la grieta. El Shot Peening es el método más económico y el más práctico para introducir tensiones residuales de compresión.

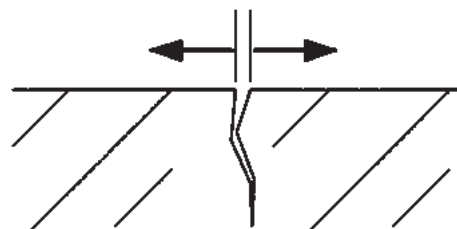
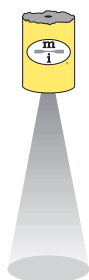


FIGURA 1-3 Iniciación de Grieta y Propagación Bajo Tensión de Tracción



Se utiliza el Shot Peening principalmente para luchar contra la fatiga de los materiales metálicos. Las indicaciones siguientes se basan en la fatiga de los metales y a su representación típica por curva de duración de vida con arreglo a la tensión aplicada representada en **FIGURA 1-4**.

- El cargamento a fatiga está formado de decenas de miles hasta millones de ciclos de sollicitaciones repetitivas. Las sollicitaciones crean tensiones de tracción aplicadas que estiran la superficie y tienden a desgarrarla.
- Una reducción lineal de la tensión de tracción aplicada induce un aumento exponencial de la duración de vida y de la cantidad de ciclos a fatiga. La curva (**FIGURA 1-4**) muestra que a 810 MPa la reducción del cargamento de un 32% ocasiona un aumento de la duración de vida de un 300% (+150 000 ciclos).

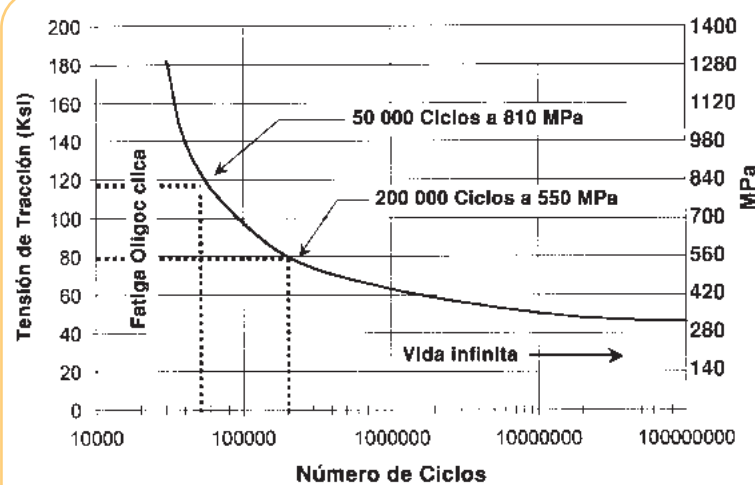


FIGURA 1-4 Duración de Vida en Función de la Tensión Aplicada

TENSIONES RESIDUALES DEL SHOT PEENING

Las tensiones residuales introducidas por Shot Peening son tensiones de compresión. Esas tensiones residuales de compresión se sustraen de las tensiones aplicadas y pueden hasta anularlas. De modo sencillo, mientras menos haya, más grande es la duración de vida. Un perfil típico de tensión residual de Shot Peening está representado en la **FIGURA 1-5**.

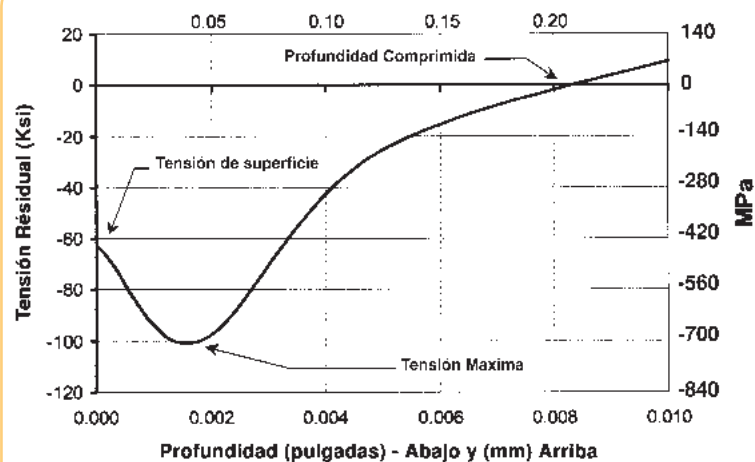


FIGURA 1-5 Perfil Típico de Tensiones Residuales de Shot Peening

Tensión Máxima – Es el valor de la amplitud de la tensión residual de compresión máxima. De costumbre se encuentra en primera capa, cerca de la superficie. Mientras más aumenta la tensión máxima, más resistente a la grieta por fatiga es el material.

Profundidad comprimida – Es la profundidad de la capa de compresión resistente a la propagación de grietas. La profundidad de la capa puede aumentar cuando se aumenta la energía del impacto de las bolas. Se busca en general una capa más profunda para una mejor resistencia a la propagación.

Tensión de superficie – En general su amplitud es más baja que la Tensión Máxima



SUPERPOSICION DE TENSIONES DE SERVICIO Y RESIDUALES

Cuando se realiza el Shot Peening sobre una pieza y que está sometida a solicitaciones exteriores, la superficie de esta pieza soporta solamente la resultante de la suma de la tensión residual y de la tensión aplicada. La FIGURA 1-6 presenta una barra en flexión sobre tres puntos lo que crea un momento de flexión cuyo máximo está en la superficie.

La diagonal de punteados representa la tensión de tracción producida por el cargamento exterior. La curva de rayas mixtas representa la tensión residual de compresión del Shot Peening. La curva continua, que es la curva resultando de las dos primeras, muestra una disminución sensible de la tensión de tracción en superficie.

El Shot Peening tiene muchas ventajas en los dos siguientes casos :

- Concentraciones de tensiones
- Materiales de altas características.

Las concentraciones de tensiones están localizadas en los radios, entalladuras, agujeros, intersección de agujeros, estriado, ranuras de chaveta, etc. El Shot Peening introduce una tensión local de compresión de gran amplitud para oponerse al factor de concentración de tensión que resultan de esos accidentes geométricos.

El Shot Peening es idóneo cuando se trata de materiales de altas características. La tensión de compresión depende directamente de la resistencia mecánica del material. Cuanto más sea el límite elástico, más fuerte será la amplitud de la tensión residual. Los materiales de altas características tienen estructuras cristalinas muy rígidas. Esa estructura cristalina puede resistir a grados de tensión muy importantes y así conservar más tensiones residuales.

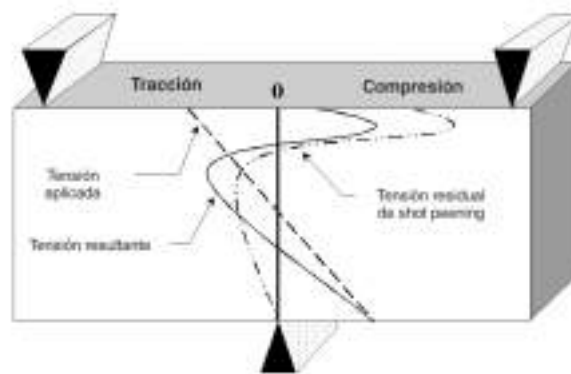


FIGURA 1-6 Tensión Resultante Sobre una Barra Shot Peenizada con una Carga Externa

ESTUDIO DE CASO

PROPAGACION DE GRIETA, NASA LANGLEY

Los ingenieros de la NASA estudiaron la propagación de grieta en aleación de aluminio 2024-T3 con y sin Shot Peening. Las probetas fueron sometidas a pruebas con un inicio de grieta de 1,3 mm y después sometidas a un ciclo de fatiga hasta rotura. Se puede anotar que en el ejército del aire Norteamericano se tolera una deterioración máxima de 1,3 mm.

Fue demostrado que la propagación de grieta se atrasa de manera sensible cuando las probetas están Shot Peenizadas. Como lo muestran los resultados siguientes, bajo una tensión resultante de 104 MPa la duración de vida restante aumenta en un 237%. Con 138 MPa, la duración de vida restante aumenta en un 81%.

Se volvieron más difíciles las condiciones de pruebas comparadas con las condiciones reales de utilización. No se encuentran, en regla general en condiciones reales, grietas iniciales y se supone que la duración de vida es aún más importante.

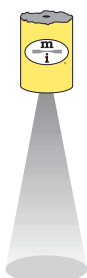
PROBETAS SIN SHOT PEENING

Tensión aplicada	Números ensayos	Media números ciclos
104 MPa	2	75 017
138 MPa	3	26 029

PROBETAS CON SHOT PEENING

Tensión aplicada	Números ensayos	Media números ciclos	Aumento
104 MPa	2	253 142	237%
138 MPa	3	47 177	81%

Anotación sobre la preparación de las probetas : Se hace una entalla en superficie por electroerosión. Después se someten las probetas a fatiga hasta que la grieta llegue a 1,3 mm. Las probetas se someten al Shot Peening después únicamente. Es el punto de partida de este estudio de caso. [Ref 1.1]



PROFUNDIDAD DE LAS TENSIONES RESIDUALES

La selección de los parámetros del Shot Peening y la dureza del material influyen sobre la profundidad de las tensiones residuales [Ref. 1-2]. La FIGURA 1-7 muestra la relación entre la profundidad de la superficie comprimida y la intensidad del Shot Peening sobre 5 tipos de materiales: Aceros de dureza 31 HRC, 52 HRC y 60 HRC, aleaciones de Aluminio 2024T351 y aleaciones de Titanio TA6V. Las profundidades obtenidas sobre aceros de varias durezas pueden ser interpoladas.

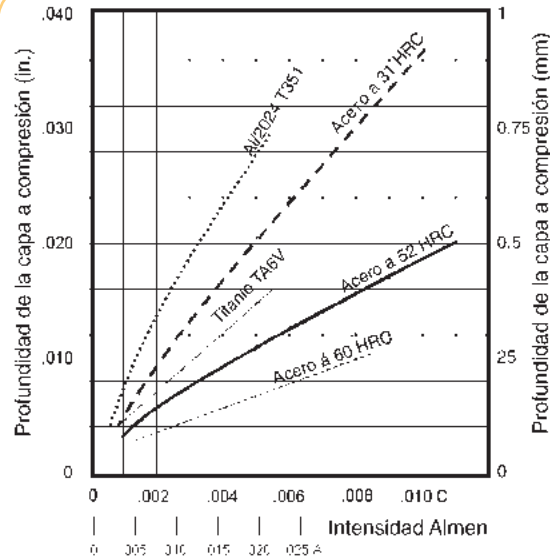


FIGURA 1-7 Profundidad de la Compresión en Función de la Intensidad Almen

TIPOS DE BOLAS

Las bolas que se utilizan para el Shot Peening (leer también el CAPÍTULO 12) son pequeñas esferas de acero colado, de alambre de acero cortado y redondeado (de acero ligeramente aleado y de acero inoxidable) de cerámica o de vidrio. La mayoría de la veces, se emplean bolas de acero colado o de alambre cortado y redondeado. Se utiliza el acero inoxidable para las aplicaciones en las cuales se tiene que evitar la contaminación de la superficie.

La bola de alambre de acero cortado y cuidadosamente redondeado para obtener una forma esférica, es cada vez más especificada a causa de la uniformidad de su diámetro, de su estado forjado y su longevidad. Se dispone de diferentes durezas y siguiendo una granulometría más apretada que la de la bola de acero colado.

Se seleccionan también las bolas de vidrio cuando hay riesgo de contaminación de la superficie. Generalmente, son más pequeñas y más ligeras que otro tipo de bolas y se pueden utilizar para tratar pequeños radios en fondo de las roscas así como para tratar piezas delicadas para las cuales se preconiza intensidades bajas.

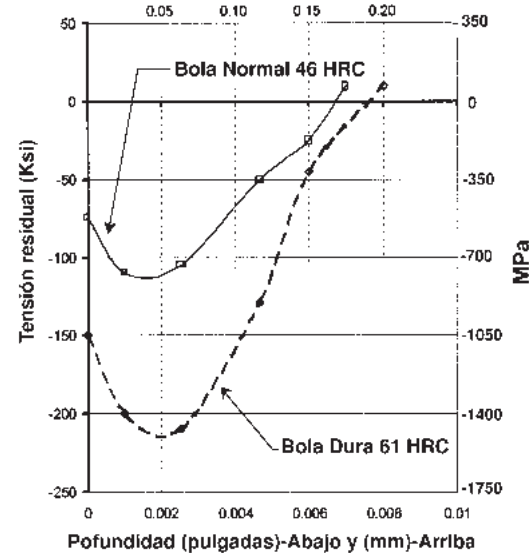


FIGURA 1-8 Shot Peening sobre Acero 1045 (50 HRC) Equivalente XC 45 o F-1140 Templado-Revenido [Ref 1.3]

EFFECTO DE LA DUREZA DE LAS BOLAS

Se reconoce ampliamente que la dureza de la bola influye sobre la amplitud de la tensión residual (FIGURA 1-8). La dureza de la bola debe ser por lo menos equivalente a la de las piezas que se tratan, excepto si el acabado de superficie es crítico. Para la mayoría de las piezas de acero y de metal sin hierro, se respeta este criterio con bola de acero de dureza normal (45-52 HRC).

El uso creciente de aceros de alta resistencia y de dureza importante (50 HRC y más allá) se ve en la selección de bolas duras (55-62 HRC).

REFERENCIAS:

- 1.1 Dubberly, Everett, Matthews, Prabhakaran, Newman; The Effects of Shot and Laser Peening on Crack Growth and Fatigue Life in 2024 Aluminum Alloy and 4340 Steel, US Air Force Structural Integrity Conference, 2000
- 1.2 Fuchs; Shot Peening Stress Profiles
- 1.3 Lauchner, WESTEC Presentation March 1974, Northrup Corporation; Hawthorne, California



ACEROS CON ALTAS CARACTERÍSTICAS

La amplitud de la tensión residual inducida por el Shot Peening es un porcentaje del límite de rotura y este aumenta con la resistencia/dureza del material. Los materiales los más resistentes/duros son también los más quebradizos y sensibles al efecto de entalla. Esos defectos pueden ser superados por el Shot Peening

autorizando el empleo de metales con muy altas características para aplicaciones de fatiga. Los trenes de aterrizaje aeronáuticos están concebidos a menudo de acero Shot Peenizado a 2000 MPa o más de resistencia. La **FIGURA 2-1** establece la relación entre el Shot Peening y el uso de materiales de varias características.

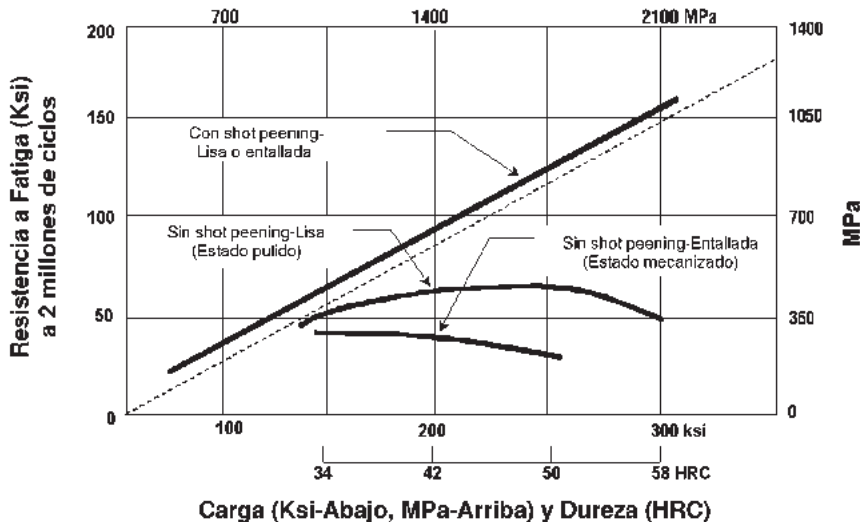
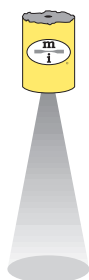


FIGURA 2-1 Resistencia a Fatiga en Función del límite de Rotura

Sin Shot Peening, la resistencia óptima a fatiga de los aceros mecanizados se sitúa a los alrededores de 30 HRC. A niveles de resistencias más importantes, los metales pierden resistencia a fatiga por causa de su gran sensibilidad a las entallas y de su fragilidad. Sumando las tensiones residuales de compresión, la resistencia a fatiga de los metales aumenta en proporción con el aumento de su resistencia/dureza. A 52 HRC, el límite de fatiga de las probetas Shot Peenizadas sube a 990 MPa o sea el doble del límite de probetas lisas/pulidas sin Shot Peening.[Ref 2.1].

Las aplicaciones típicas que toman ventaja de la óptima resistencia a la fatiga de los aceros con alta resistencia/dureza son los utillajes portátiles electroneumáticos y de percusión. Además, el comportamiento a fatiga de las piezas Shot Peenizadas no se encuentra afectado por las entallas pequeñas que tienen un efecto muy negativo sobre los aceros con altas características [Ref 2.2].



ACEROS CEMENTADOS

La cementación y la carbonitruración son tratamientos térmicos que crean capas primarias muy duras cerca de la superficie. Miden de manera corriente de 55 a 62 HRC. Las ventajas del Shot Peening sobre aceros cementados son las siguientes :

- Tensiones residuales de compresión de fuertes amplitudes del orden de -1400 MPa o más asegurando ganancias a fatiga.
- La influencia nefasta de defectos de cementación como la oxidación intergranular se encuentra reducida.

Se recomienda una dureza de bola de 55-62 HRC para los aceros cementados y carbonitrurados para obtener mejoras óptimas de resistencia a fatiga.

ESTUDIO DE CASO

CIGÜEÑALES CON ALTAS POTENCIAS

Cigüeñales de motores 4 cilindros con altas potencias se rompían antes de tiempo al cabo de algunas horas de funcionamiento a potencia máxima del motor. Las pruebas mostraron que se obtenían mejores resultados con cigüeñales cementados y Shot Peenizados (FIGURA 2-2). Los resultados sobre cigüeñales nitrurados y Shot Peenizados mostraron también buenas cualidades técnicas sin necesidad de aumentar el diámetro de los muñones. [Ref 2.3]

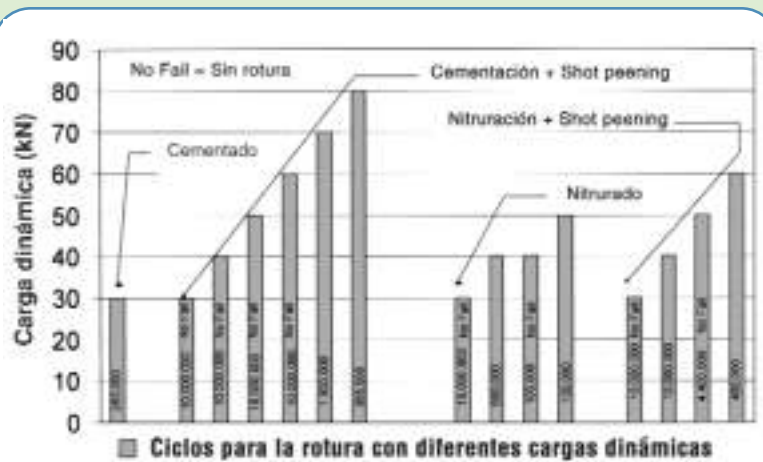


FIGURA 2-2 Comparación entre Muñones de Cigüeñales con Shot Peening, Nitruración y Cementación

DECARBURACION

La decarburación es la reducción de la tasa de carbono en superficie de un acero que ocurre durante el tratamiento térmico. Se ha mostrado que la decarburación puede reducir la resistencia a fatiga de los aceros con altas características (1650 MPa y más allá) de un 70 a un 80% y para aceros con características más blandas (1000 MPa) de un 45 a un 55% [Refs 2.4, 2.5 y 2.6].

La decarburación es un fenómeno de superficie que no tiene nada que ver con su profundidad. Una profundidad decarburada de 75 micras puede ser tan nefasta para la resistencia a fatiga como una profundidad decarburada de 750 micras [Ref 2.4, 2.5 y 2.6].



El Shot Peening ha demostrado ser eficaz para restaurar casi integralmente la pérdida de resistencia a fatiga debida a la decarburación [Ref 2.7]. Como la superficie decarburada no se detecta fácilmente, se puede volver fiable la resistencia de las piezas con el Shot Peening si se teme una decarburación. Si un engranaje que debe ser muy duro en superficie (58 HRC y más) muestra huellas de Shot Peening anormalmente profundas, entonces se debe sospechar una decarburación.

La decarburación se acompaña a menudo de una tasa de austenita residual sin averiguar. El Shot Peening reduce la tasa de austenita residual por plastificación en frío.

ESTUDIO DE CASO

REDUCCIÓN DE LA TASA DE AUSTENITA RESIDUAL DE UN ACERO 5120 CEMENTADO CON SHOT PEENING Y UNA INTENSIDAD 0,04IN. A/0,36 MM A

Profundidad (pulgadas)	Profundidad (mm)	Austenita residual (Volumen %)	
		Sin shot peening	Con shot peening
0.0000	0.00	5	3
0.0004	0.01	7	4
0.0008	0.02	14	5
0.0012	0.03	13	6
0.0016	0.04	14	7
0.0020	0.05	14	7
0.0024	0.06	15	8
0.0028	0.07	15	9
0.0039	0.10	15	10
0.0055	0.14	12	10

[Ref 2.8]

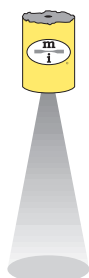
FUNDICION ESFEROIDAL AUSTEMPERIZADA

Los progresos obtenidos sobre la fundición Esferoidal Austemperizada (ADI), le han permitido sustituirse a aceros forjados, moldeados y soldados en las aplicaciones industriales.

La fundición ADI tiene una relación resistencia/peso importante y saca provecho de una excelente resistencia al desgaste. La fundición ADI se ha sustituido también al Aluminio en algunas aplicaciones específicas porque su resistencia es 3 veces más grande siendo solamente 2 veces y media más densa. Por intermedio del Shot Peening, el límite de fatiga por flexión de la fundición ADI puede ser aumentado hasta un 75%. Esto permite a algunos tipos de fundición ADI de igualar las resistencias de los aceros cementados en aplicaciones de tipo engranaje por ejemplo [Ref 2.9].

LAS FUNDICIONES

Se piden, más frecuentemente estos últimos años, fundiciones de grafito esferoidal que puedan resistir a cargamento en fatiga relativamente altos. Se utilizan, de manera general, las piezas en fundición sin mecanizado para aplicaciones donde la superficie bruta de fundición está sometida a tensiones de cargamento. La presencia de defectos en la superficie de la fundición como agujeritos, escorias o hojuelas de grafito pueden reducir bastante la resistencia a fatiga de fundiciones perlíticas con grafito nodular bruto de fundición. La resistencia a fatiga puede ser reducida en un 40% con arreglo a la importancia de los defectos de la superficie.



El Shot Peening puede mejorar las propiedades del material cuando existen pequeños defectos en superficie de la fundición. Con las intensidades las más fuertes durante el ensayo, el límite de fatiga era solamente de un 6% inferior a la de las probetas totalmente mecanizadas.

Eso tiene que ver con la caída de un 20% de la resistencia de las probetas brutas de fundición sin Shot Peening. Visualmente, el Shot Peening ofrece un aspecto pulido después del estado de superficie tradicional de la fundición bastante rugoso [Ref 2.10].

ALEACIONES DE ALUMINIO

Se utilizan las aleaciones tradicionales con altas características (series 2000 & 7000) desde décadas en la industria aeronáutica por su relación resistencia/peso importante y su buena reacción al Shot Peening.

Aparecieron nuevas aleaciones de Aluminio favorecidas por el aumento de su empleo en aplicaciones aeronáuticas y espaciales que también reaccionan muy bien al Shot Peening

- Aleaciones de Aluminio Litio (Al-Li)
- Aleaciones de Aluminio con Matriz Compuesta (MMC)
- Aleaciones de Aluminio con Silicio colado (Al-Si)

ESTUDIO DE CASO

ALUMINIO 7050-T7651

Las probetas de fatiga fueron preparadas a partir de barras de aleación 7050-T7651. Se Shot Peenizaron las cuatro caras de la parte central. Se realizaron las pruebas de fatiga en modo de flexión alterna ($R=-1$). La curva de fatiga de las probetas con y sin Shot Peening esta ilustrada en la **FIGURA 2-3**. El Shot Peening aumenta aproximadamente de una tercera parte la resistencia a fatiga. Incluso en las zonas donde la

solicitación se encuentra entre el límite elástico y la resistencia a fatiga, la carga admisible a fatiga se multiplica por 2,5 hasta casi por 4 [Ref 2.11]

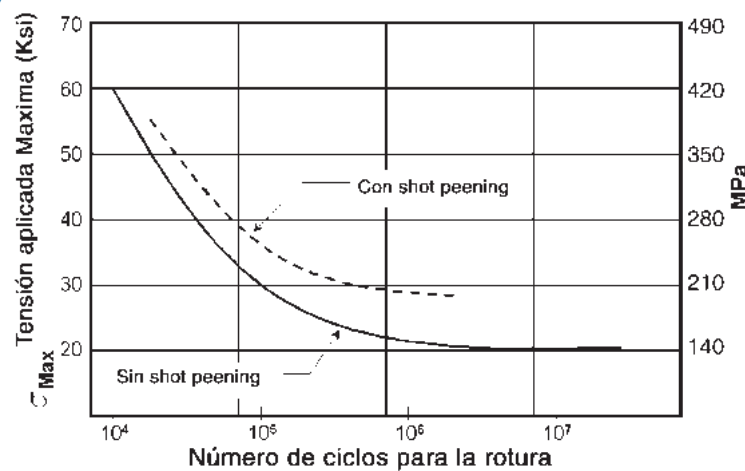


FIGURA 2-3 Curva de Fatiga del Aluminio 7050-T7651 con Shot Peening



TITANIO

Fatiga a numerosos ciclos (HCF) - La HCF del Titanio ilustrada por la **FIGURA 2-4** compara las resistencias de bielas de Titanio para motores de competición europeos. Las bielas están acabadas según diferentes procesos. Gracias al Shot Peening, el límite de fatiga aumenta en casi un 20% mientras que la masa de las bielas se reduce de un 40% comparadas con bielas de acero [Ref 2.12].

Fatiga Oligocíclica (LCF) - Como para otros materiales, la mejoría de la resistencia a la fatiga obtenida por Shot Peening aumenta con la cantidad de ciclos. La fatiga elástica está asociada con solicitaciones bajas cuando la fatiga oligocíclica está asociada con solicitaciones importantes. Se ve claramente en las curvas de fatiga de las **FIGURA 1-4** y **2-5**.

La **FIGURA 2-5** muestra los efectos del Shot Peening en las ranuras de encastre de los discos de turbina aeronáuticas [Ref 2.13]. Las dos curvas corresponden a estados mecanizados sin Shot Peening. Cuando se aplica el Shot Peening sobre probetas que soportan una gran cantidad de ciclos, la mejora es prácticamente la más fuerte. Recordemos que la expresión de la resistencia a fatiga se comprueba sobre curvas exponenciales.

La aplicación en fatiga oligocíclica de Titanio la más corriente se encuentra sobre las piezas giratorias de los motores aeronáuticos (discos, tambores y arboles) excepto álabes. Se Shot Peenizan estos componentes para aumentar su fiabilidad. Se consideran cada despegue y cada aterrizaje como un ciclo de cargamento.

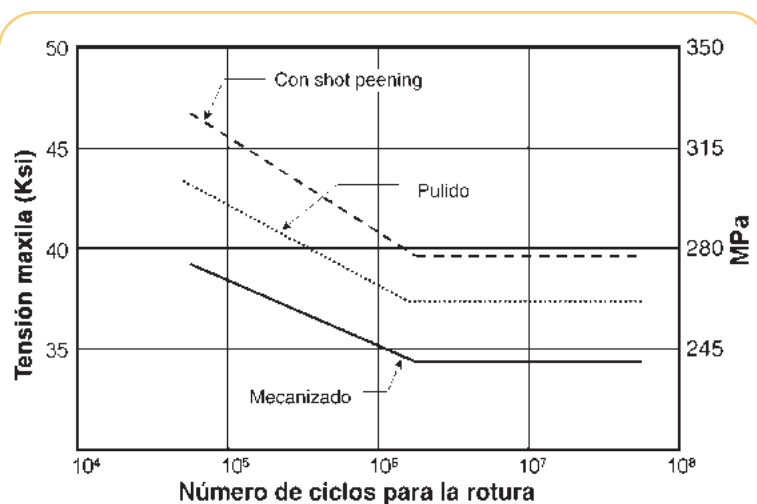


FIGURA 2-4 Resistencia a Fatiga de un Titanio Ti6Al4V Estado Pulido y con Shot Peening

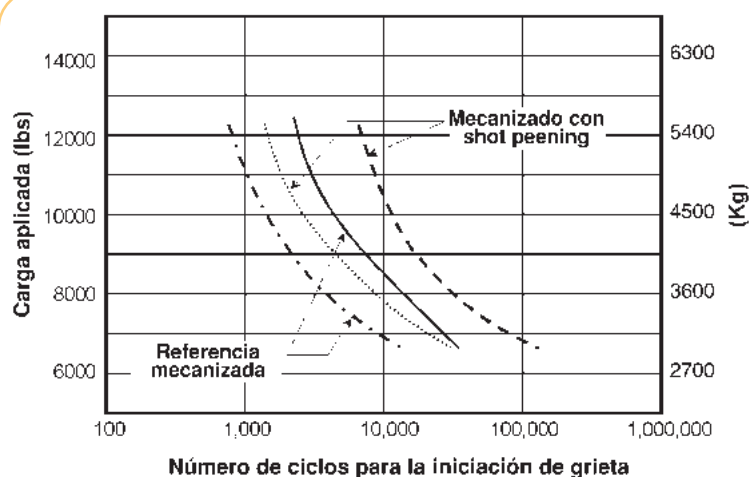
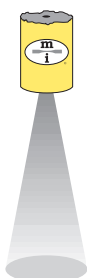


FIGURA 2-5 Efecto del Shot Peening sobre Titanio Ti8-1-1 Entallado

MAGNESIO

Las aleaciones de Magnesio no se utilizan corrientemente para las aplicaciones de fatiga. Sin embargo, cuando se escogen con arreglo de reducir la masa, se pueden utilizar técnicas específicas de Shot Peening para lograr ganancias de un 25 a un 35% en límite de fatiga.



METALES SINTERIZADOS

Se han desarrollado parámetros óptimos de Shot Peening para aumentar la resistencia a fatiga de aleaciones de aceros sinterizados en un 22% y la duración de vida por un factor de 10 [Ref 2.14]. Las aplicaciones automoviles como los engranajes y las bielas son excelentes candidatos para el Shot Peening. El Shot Peening es aún más eficaz sobre piezas de fuerte densidad como lo son las piezas forjadas y sinterizadas.

El aumento de la densidad después de la compactación por Shot Peening puede incrementar la resistencia a la fatiga de manera sensible, especialmente para las sollicitaciones en flexión. La compactación de la superficie permite cerrar las porosidades de las piezas sinterizadas para una estanqueidad superior.

ESTUDIO DE CASO

ENGRANAJES SINTERIZADOS DE ALTA DENSIDAD

Haciendo parte de un amplio proyecto patrocinado por el Ministerio de la Educación y de Investigaciones Alemán, se probaron aceros sinterizados resultantes de la metalurgia con polvos con objeto de introducirlos en la industria de los engranajes. Un acero sinterizado $\text{MSP}_{4.0}\text{Mo-0.1Nb}$ fue probado en comparación con un acero 20MnCr5 mecanizado y cementado. El cargamento al pie del diente permitió conseguir resultados a fatiga a 2 millones de ciclos siguientes. Nota : La referencia 100% corresponde al acero forjado.

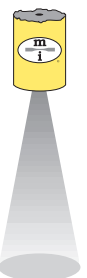
- Referencia : 20MnCr5 forjado sin Shot Peening : 100%
- $\text{MSP}_{4.0}\text{Mo-0.1Nb}$ sin Shot Peening : 82%
- $\text{MSP}_{4.0}\text{Mo-0.1Nb}$ con Shot Peening : 109%

Las pruebas han demostrado que el acero sinterizado y sin Shot Peening tiene un límite de fatiga un 18% inferior al del acero forjado cementado. La resistencia a fatiga del acero sinterizado con Shot Peening alcanzan un 9% superior al del acero forjado cementado [Ref 2.15].

La demanda de aceros sinterizados y forjados no deja de aumentar desde que la metalurgia con polvos ha permitido utilizar esos materiales para aplicaciones muy solicitadas. El Ancorsteel 1000B con un 2% de cobre y un 0,9% de grafito tiene una resistencia a fatiga 240 MPa sin Shot Peening. El Shot Peening permite aumentar esa resistencia a fatiga de un 16%, o sea 280 MPa [Ref 2.16].

REFERENCIAS:

- 2.1 Horger; *Mechanical and Metallurgical Advantages of Shot Peening – Iron Age Reprint 1945*
- 2.2 Hatano and Namitki; *Application of Hard Shot Peening to Automotive Transmission Gears, Special Steel Research Laboratory, Daido Steel Company, Ltd., Japan.*
- 2.3 Challenger; *Comparison of Fatigue Performance Between Engine Crank Pins of Different Steel Types and Surface Treatments, Lucas Research Center, Solihull, England, July 1986*
- 2.4 *Properties and Selection, Metals Handbook, Eighth Edition, Vol. 1, pp. 223-224.*
- 2.5 Jackson and Pochapsky; *The Effect of Composition on the Fatigue Strength of Decarburized Steel, Translations of the ASM, Vol. 39, pp. 45-60.*
- 2.6 Bush; *Fatigue Test to Evaluate Effects of Shot Peening on High Heat Treat Steel - Lockheed Report No. 9761.*
- 2.7 Gassner; *Decarburization and Its Evaluation by Chord Method, Metal Progress, March 1978, pp. 59-63.*
- 2.8 Internal Metal Improvement Co. Memo
- 2.9 Keough, Brandenburg, Hayrynen; *Austempered Gears and Shafts: Tough Solutions, Gear Technology March/April 2001, pp. 43-44.*
- 2.10 Palmer; *The Effects of Shot Peening on the Fatigue Properties of Unmachined Pearlitic Nodular Graphite Iron Specimens Containing Small Cast Surface Imperfections, BCIRA Report #1658, The Casting Development Centre, Alvechurch, Birmingham, UK.*
- 2.11 Oshida and Daly; *Fatigue Damage Evaluation of Shot Peened High Strength Aluminum Alloy, Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University, Syracuse, NY*
- 2.12 Technical Review, *Progress in the Application of Shot-Peening Technology for Automotive Engine Components, Yamaha Motor Co., Ltd., 1998.*
- 2.13 McGann and Smith; *Notch Low Cycle Fatigue Benefits from Shot Peening of Turbine Disk Slots.*
- 2.14 Sonsino, Schlieper, Muppmann; *How to Improve the Fatigue Properties of Sintered Steels by Combined Mechanical and Thermal Surface Treatments, Modern Developments in Powder Metallurgy, Volume 15 - 17, 1985.*
- 2.15 Link, Kotthoff; *Suitability of High Density Powder Metal Gears for Gear Applications; Gear Technology, January/February 2001.*
- 2.16 O'Brian; *Impact and Fatigue Characterization of Selected Ferrous P/M Materials, Annual Powder Metallurgy Conference, Dallas, TX. May 1987.*



EFFECTO SOBRE LA DURACION DE VIDA

Los procedimientos de fabricación tienen un efecto notable sobre la resistencia a fatiga de piezas metálicas. Sus efectos pueden ser benéficos o nefastos. Los procedimientos nefastos son el soldeo, la rectificación, el mecanizado basto, el conformado, etc. Estos procedimientos ponen la superficie en tracción. La superposición de las tensiones residuales de tracción y de las cargas aplicadas acelera las roturas a fatiga como lo muestra la **FIGURA 1-6**.

Los procedimientos de fabricación benéficos incluyen los endurecimientos de la superficie e inducen de manera general tensiones residuales de compresión en ella. El pulido por vibración, el pulido mecánico y el ruleado son procesos que mejoran la superficie eliminando los defectos y las microconcentraciones de tensiones aparecidos durante las operaciones de fabricación. El ruleado tradicional introduce tensiones residuales de compresión pero se limita su empleo para las geometrías cilíndricas. El Shot Peening se puede aplicar a todas las formas geométricas sin límite y es la solución la más económica.

El efecto de las tensiones residuales está demostrado en el ejemplo siguiente. Una prueba sobre fijación de ala aeronáuticas mostró que el principio de grieta ocurría a un 60% de la duración de vida valorada de la pieza. Se han eliminado los defectos y la superficie fue Shot Peenizada. La fijación fue después comprobada a fatiga hasta un 300% de su potencial de vida sin grieta a pesar de una reducción de espesor en la zona crítica [Ref 3.1].

SOLDEO

El soldeo crea tensiones de tracción porque la soldadura está alimentada por un metal añadido en fusión, es decir más caliente y más dilatado. Se junta después con el metal de base, que está un poco más frío. La soldadura se enfría rápidamente y tiende a encogerse durante el enfriamiento. El metal de base, estando más frío y entonces más resistente, impide al metal añadido de encogerse. El resultado es que el metal de base estira la soldadura enfriada. La zona afectada por el calor (ZAC) es el lugar el más afectado por las tensiones de tracción. Es lo que explica que las roturas empiezen muchas veces en ese lugar. Heterogeneidades en el cordón de soldadura, en su composición química y su geometría, etc, obran como concentraciones de tensiones cuyos efectos se suman a las tensiones residuales y a las cargas aplicadas para iniciar grietas de fatiga.

Como se ve en la **FIGURA 3-1**, el Shot Peening es sumamente eficaz para invertir las tensiones de tracción que inducen grietas de fatiga en tensiones benéficas de compresión.

La **FIGURA 3-1**, también muestra las variaciones de tensiones residuales de soldeo, antes y después el alivio de la tensión y el Shot Peening [Ref 3.2]. Las tensiones introducidas por el soldeo se añaden a las solicitaciones externas. La combinación de esas tensiones acelera la aparición de grietas de fatiga en las juntas soldadas.

Cuando se alivia la soldadura durante una hora a 620°C, las tensiones residuales se alivian también. Esta disminución de las tensiones de tracción ocasiona una mejoría del comportamiento en fatiga.

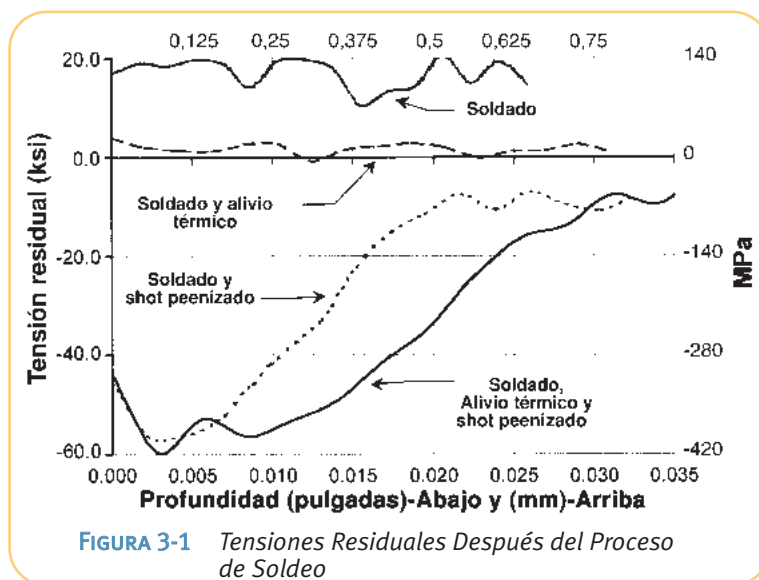
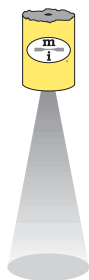


FIGURA 3-1 Tensiones Residuales Después del Proceso de Soldeo



Si se aplica el Shot Peening sobre la soldadura en vez de solamente aliviar la tensión, entonces se produce una nueva distribución de las tensiones en compresión. Esto produce una resistencia más importante al inicio y a la propagación de grietas.

La **FIGURA 3-1** muestra que la secuencia de producción óptima para el soldeo es el alivio de tensión seguido por un Shot Peening. El alivio de las tensiones induce un adulado de la soldadura y así se pueden lograr tensiones residuales más profundas tras el Shot Peening.

ESTUDIO DE CASO

FATIGA DE ESTRUCTURAS OFFSHORES SOLDADAS

Un programa de investigaciones Noruego concluyó que la combinación del amolado del pie del cordón y del Shot Peening ofrece las ganancias a fatiga las más importantes. Corresponde a más de un 100% de aumento del límite de fatiga de la soldura

después de 1 millón de ciclos [Ref 3.3]. Otras pruebas muestran que la mejora de la resistencia a fatiga aumenta con el límite elástico del material de base.

Condiciones	Resistencia a Fatiga a 1 millón de Ciclos
Material de Base	340 MPa
Soldado, Amolado y Shot peening	300 MPa
Soldado y Amolado	180MPa
Soldeo solo	140MPa

El manual publicado por la Sociedad Norteamericana de Soldero (AWS) advierte los lectores de tener en cuenta las tensiones residuales de tracción del soldeo en el caso en el que la estructura soldada este sometida a sollicitaciones de fatiga como las descritas siguientemente : “Las tensiones locales en una estructura pueden ser el resultado exclusivo de cargas externas o bien ser la combinación de tensiones externas y residuales. Las tensiones residuales no son cíclicas, pero se suman o se substraen de las tensiones de servicio según sus signos. Por eso, puede que sea ventajoso introducir tensiones residuales de compresión en conjuntos soldados cuando se supone un cargamento cíclico externo”.

El empleo del Shot Peening para aumentar la resistencia a la fatiga y a al corrosión bajo tensión de los conjuntos soldados está reconocido con caracter oficial por organizaciones como :

- American Society of Mechanical Engineers [Ref 3.4]
- American Bureau of Shipping [Ref 3.5]
- American Petroleum Institute [Ref 3.6]
- National Association of Corrosion Engineers [Ref 3.7]

ESTUDIO DE CASO

ROTORES DE TURBINA DE COMPRESOR HP

Dos empresas líder en la producción de motores de reacción aeronáuticos producen también rotores de compresores de alta presión. Se mecanizan por separado las piezas a partir de Titanio forjado TA6V y después juntadas por soldeo. Las pruebas tuvieron los resultados siguientes :

Soldeo sólo	4 000 ciclos*
Soldeo y pulido	6 000 ciclos
Soldeo y shot peening	16 000 ciclos

* En la terminología de los motores aeronáuticos, un ciclo es igual al cargamento que corresponde a un despegue del avión para el cual estuvo configurado.

Al principio, se utilizaba el Shot Peening como una seguridad suplementaria contra las averías. Después de muchos años de servicio sin fallo, y acoplado con inovaciones en los controles del procedimiento, se incorporo el Shot Peening como instrumento de diseño para las definiciones avanzadas de turbinas [Ref 3.8].



RECTIFICACION

La rectificación y el amolado introducen de manera natural tensiones residuales de tracción con motivo de altas temperaturas locales generadas durante su ejecución. El metal que está en contacto con los granos abrasivos se calienta localmente y se dilata. El metal sobrecaliente es más delicado que el metal alrededor y se plastifica a compresión. Al enfriarse, el metal se encoge. El metal alrededor impide en parte ese encogimiento y crea una tensión residual. Cualquiera que sea su amplitud, esas tensiones tendrán un efecto nefasto sobre la resistencia a la fatiga y a la corrosión bajo tensión.

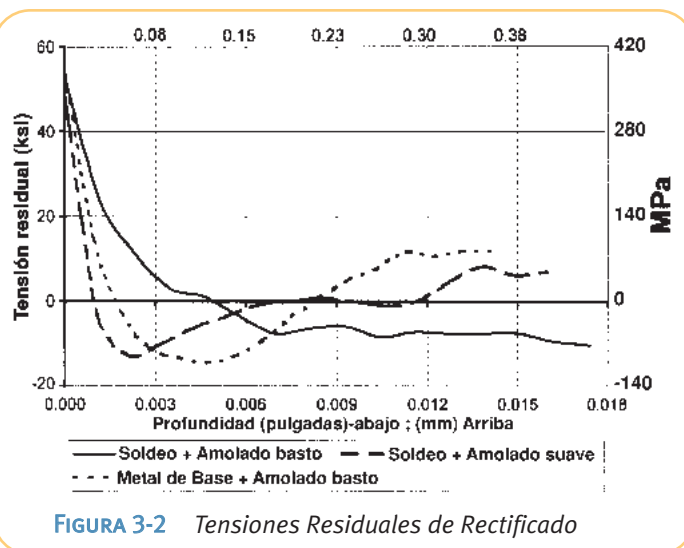


FIGURA 3-2 Tensiones Residuales de Rectificado

La FIGURA 3-2 ilustra las tensiones residuales de tracción generadas por diferentes procedimientos de rectificación [Ref 3.9]. Un acero bajo aleado 1020, equivalente al XC18 (F1120), tratado a 500–600 MPa, con y sin soldadura, fue sometido a dos tipos de amolado, basto y suave. La FIGURA 3-2 muestra que los procedimientos de amolado provocan tensiones de fuerte amplitud en la superficie, con una profundidad más importante cuando se trata del amolado basto.

Usando el Shot Peening después de haber amolado o rectificado, se cambian las tensiones residuales en tensiones de compresión, con el mismo beneficio con o sin soldadura.

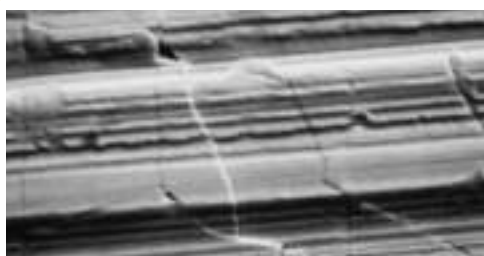


FIGURA 3-3 Microgrietas sobre Cromo Duro

REVESTIMIENTOS METALICOS

Numerosas piezas están Shot Peenizadas antes de ser cromadas y níqueladas para oponerse a sus efectos nefastos sobre la resistencia a fatiga. La caída de la resistencia a fatiga por esos revestimientos se explica por la microfisuración de la capa frágil en la superficie, y por la fragilización por hidrógeno o por las tensiones de tracción residuales.

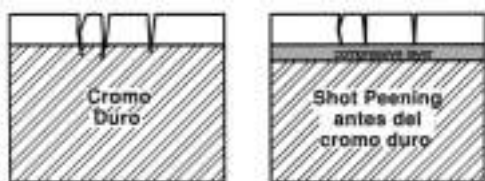


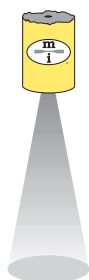
FIGURE 3-4 Bloqueo de las Microgrietas por la Tensión de Compresión

La FIGURA 3-3 es una micrografía con amplificación x 1200 que muestra una red de grietas finas que aparecen de manera típica sobre un cromo duro [Ref 3.10]. Bajo sollicitaciones, estas pequeñas grietas pueden propagarse al interior del metal y llevarlo hasta rotura de fatiga.

Cuando se Shot Peeniza el metal, el riesgo de ver esas grietas propagarse en el metal de base se reduce claramente. La FIGURA 3-4 esquematiza este concepto bajo cargamento dinámico externo supuesto.

El esquema de izquierda muestra las pequeñas grietas que se propagan al interior del metal de base. El esquema a la derecha muestra que las tensiones de compresión bloquean la propagación de las grietas cuando la superficie está Shot Peenizada.

Se recomienda el Shot Peening antes del revestimiento sobre las piezas solicitadas de manera dinámica a fatiga. Para las piezas que necesitan una duración de vida sin límite bajo sollicitaciones dinámicas, las especificaciones americanas QQ-C6320 y MIL-C-26074 recomiendan el Shot Peening antes de aplicar el revestimiento de cromo o de níquel. Otros tipos de revestimientos duros como el níquel electrolítico pueden también tener un efecto nefasto sobre la resistencia a fatiga.



ANODIZACION

La anodización dura es otra aplicación para la cual el Shot Peening mejora la resistencia a fatiga. Los beneficios son similares a los que se obtienen para los revestimientos duros en la medida en que este se realice antes de la anodización.

ESTUDIO DE CASO

CORONA DE ALUMINIO ANODIZADO

Se probaron coronas de aleación de aluminio AlZnMgCu 0.5 con dientes al exterior con el fin de comparar la anodización con y sin Shot Peening. El diámetro de la corona dentada era de 612 mm y su límite elástico de 490 MPa. El espesor de la anodización dura era de 20 micras.

Se dirigieron las pruebas en flexión plana para determinar la carga correspondiente a una probabilidad en un 10% de rotura después de un millón de ciclos. El cuadro que sigue muestra los resultados obtenidos [Ref 3.11].

Shot peenizado	Anodización Cromica	Carga (10% de rotura)
No	No	30 KN
Si	No	41 KN
No	Si	20 KN
Si	Si	48 KN

PROYECCION PLASMA

Se utiliza principalmente la proyección plasma para las aplicaciones que necesitan una excelente resistencia al desgaste. El Shot Peening a mostrado ser eficaz en calidad de preparación de superficie antes de la proyección plasma en aplicaciones sobre piezas trabajando a fatiga. Se ha utilizado también el Shot Peening tras del revestimiento plasma para mejorar el estado de superficie y comprimir las porosidades cercanas de la superficie.

ELECTROEROSION (EDM)

La electroerosión es esencialmente un procedimiento de eliminación de material por chispeado sin trabajo de corte. La temperatura producida por el arco para disolver el metal crea una capa de fusión que se solidifica sobre el metal de base. Esa capa es frágil y presenta tensiones importantes comparables a las que se producen durante el soldeo. El interés del Shot Peening es de devolver las propiedades de resistencia inicial a fatiga borrando así los efectos nefastos de la electroerosión. La

FIGURA 3-5 muestra los efectos del Shot Peening sobre el mecanizado electroquímico, la electroerosión y el electropulido [Ref 3.12]. Para que su lectura sea fácil, se debe leer este diagrama en el sentido de las agujas del reloj. Las resistencias a fatiga de estos tres procedimientos están comparados con y sin Shot Peening.

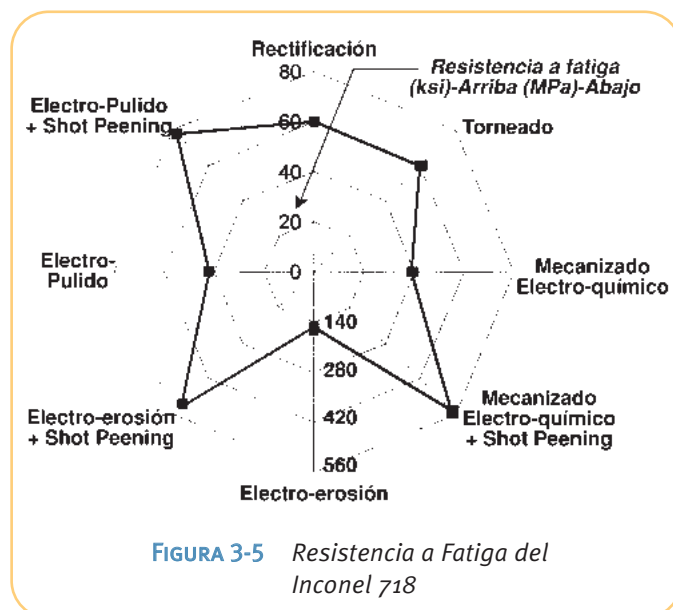


FIGURA 3-5 Resistencia a Fatiga del Inconel 718



MECANIZADO ELECTROQUIMICO (ECM)

Se basa el principio del mecanizado electroquímico sobre la disolución controlada del material por contacto con un agente químico potente al interior de un campo eléctrico. Se atribuye de manera general al adelgazado la reducción de las propiedades en fatiga y se crean defectos en la superficie por ataques con preferencia en las juntas de granos. Realizando un Shot Peening tras este mecanizado, puede que se devuelvan aún más que las propiedades a fatiga como se ve ilustrado en la [FIGURA 3-5](#) [Ref 3.12].

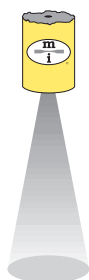
ESTUDIO DE CASO

LAMINAS DE ACOPLAMIENTOS

Las láminas de acoplamientos metálicos se utilizan muy a menudo para las turbo-máquinas. Esos acoplamientos compensan el no alineamiento de los árboles, por el juego de flexión de la láminas. Esa flexión rotativa, que no es más que una sollicitación cíclica, plantea problemas de resistencia a fatiga. Algunos investigadores concluyeron que el mecanizado electroquímico puede producir piezas cerca de la perfección. Sin embargo, descubrieron gracias a observaciones bajo microscopio de barrido electrónico que minúsculas cavidades podían aparecer tras el mecanizado electroquímico. Por lo visto, esas cavidades producen microconcentraciones de tensiones que llevan a roturas precoces. El Shot Peening tras el mecanizado electroquímico mejora muy claramente la resistencia a fatiga de esas láminas [Ref 3.13 & 3.14].

REFERENCIAS:

- 3.1 Internal Metal Improvement Co. Memo
- 3.2 Molzen, Hornbach; Evaluation of Welding Residual Stress Levels Through Shot Peening and Heat Treating, AWS Basic Cracking Conference; Milwaukee, WI; July 2000
- 3.3 Haagensen; Prediction of the Improvement in Fatigue Life of Welded Joints Due to Grinding, TIG Dressing, Weld Shape Control and Shot peening." The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
- 3.4 McCulloch; American Society of Mechanical Engineers, Letter to H. Kolin, May 1975.
- 3.5 Stern; American Bureau of Shipping, Letter to G. Nachman, July 1983.
- 3.6 Ubben; American Petroleum Institute, Letter to G. Nachman, February 1967.
- 3.7 N.A.C.E Standard MR-01-75, Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Material for Oilfield Equipment, National Association of Corrosion Engineers.
- 3.8 Internal Metal Improvement Co. Memo
- 3.9 Molzen, Hornbach; Evaluation of Welding Residual Stress Levels Through Shot Peening and Heat Treating, AWS Basic Cracking Conference; Milwaukee, WI; July 2000
- 3.10 Metallurgical Associates, Inc; "Minutes" Vol.5 No.1, Winter 1999; Milwaukee, WI
- 3.11 Internal Metal Improvement Co. Memo
- 3.12 Koster, W.P., Observation on Surface Residual Stress vs. Fatigue Strength, Metcut Research Associates, Inc., Cincinnati, Ohio. Bulletin 677-1, June 1977
- 3.13 Calistrat; Metal Diaphragm Coupling Performance, Hydrocarbon Processing, March 1977
- 3.14 Calistrat; Metal Diaphragm Coupling Performance, 5th Turbomachinery Symposium, Texas A&M University, October 1976



FATIGA DE FLEXION

La fatiga de flexión es el modo el más corriente de rotura por fatiga. Se acomoda bien el Shot Peening con ese tipo de sollicitación porque las tensiones de tracción las más importantes se encuentran en la superficie. La **FIGURA 4-1** representa una viga empotrada cargada a flexión. La flexión de la viga genera un estiramiento de la superficie superior induciendo tensiones de tracción. Cualquier radio o cambio de geometría generaría concentraciones de tensiones.

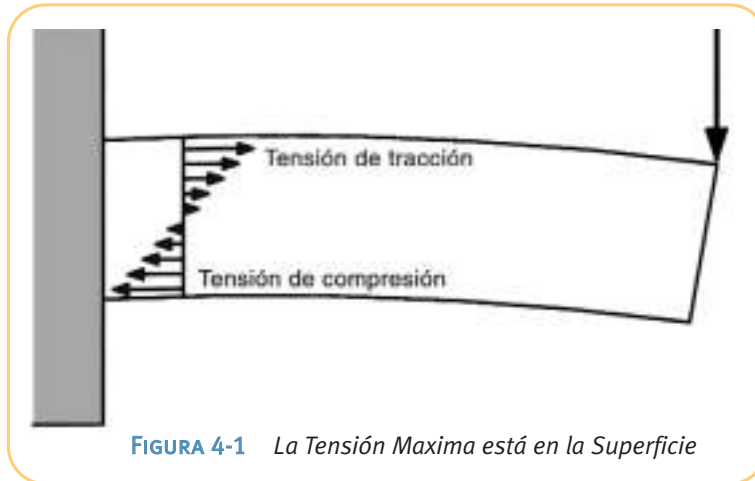


FIGURA 4-1 La Tensión Maxima está en la Superficie

La flexión alterna origina ciclo de cargamento en tracción-compresión. Es el modo de cargamento a fatiga el más destructor. Se inician las grietas de fatiga y se propagan durante la fases de tracción del ciclo.



FIGURA 4-2 Montaje Corona y Piñon

ENGRANAJES

El Shot Peening de los engranajes es una aplicación muy corriente. Se Shot Peenizan muy a menudo los engranajes de diferentes tamaños y diferentes diseños para aumentar la resistencia a la fatiga de flexión en pies de dientes. El endentamiento de un diente de engranaje es equivalente al ejemplo de la viga empotrada. El cargamento originado por el contacto de los dientes crea una tensión de flexión en pies del diente debajo del punto de contacto (**FIGURA 4-3**).

Se Shot Peenizan los engranajes de manera corriente tras el temple o después endurecimiento

superficial. El aumento de la dureza induce un aumento de manera proporcional de las tensiones residuales. La amplitud de tensión residual máxima tras el Shot Peening sobre el piñón cementado puede situarse entre 1200 y 1600 MPa con arreglo a los parámetros de cementación y con los del Shot Peening (**FIGURA 4-4**). De manera general, se utilizan bolas de acero duro (55-62 HRC) para el Shot Peening de piñones cementados. Sin embargo, se pueden utilizar bolas de dureza menor (45-52 HRC) cuando las superficies cementadas necesitan menos modificaciones en la superficie de flancos de dientes.



FIGURA 4-3 Imagen Polarizada de las Tensiones Aplicadas



La amplitud de las tensiones residuales sera aproximadamente mitad menos que la que introducen las bolas duras.

El medio óptimo para mejorar la resistencia al Pitting de los flancos de dientes es de introducir tensiones residuales de compresión y a continuación un lapeado, un pulido por vibración o un acabado de superficie isotrópico (Isotropic Finishing). Hay que estar muy atento de no quitar más de un 10% de la capa de compresión. Los procedimientos que eliminan las huellas de Shot Peening permiten repartir los esfuerzos de contactos sobre una superficie más importante y de disminuir las presiones de contactos.

Metal Improvement Co. propone un doble procedimiento de Shot Peening y un superacabado llamado C.A.S.E.SM que permite aumentar en un 500% la resistencia al pitting de los engranajes. Les invitamos a que se refieran al Capitulo 11 para informaciones complementarias y fotografías micrograficas sobre este procedimiento.

Los aumentos de la resistencia a fatiga en un 30% o más a un millón de ciclos son corrientes sobre varios tipos de engranajes. Los organismos y especificaciones siguientes autorizan el aumento de la carga admisible a fatiga por flexión de dientes tras un Shot Peening controlado.

- Lloyds Register of Shipping : un 20% de aumento [Ref 4.2]
- Det Norske Veritas : un 20% de aumento [Ref 4.3]
- ANSI/AGMA 6032-A94 Marine Gearing Specification: 15% de aumento.

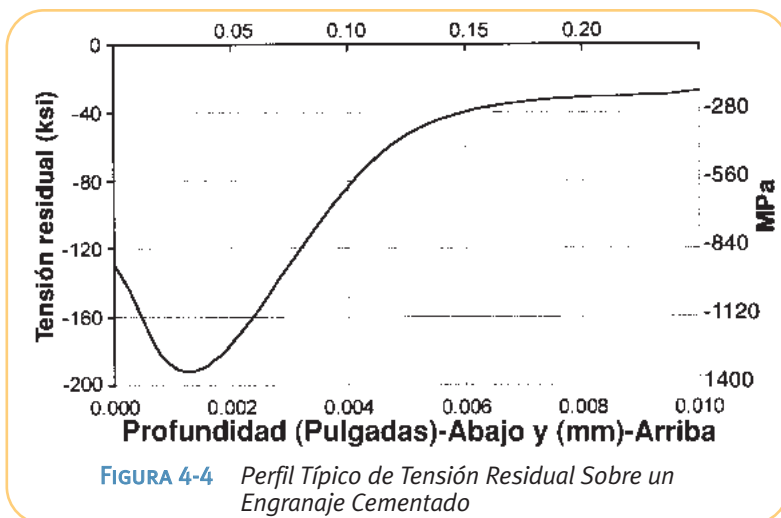


FIGURA 4-4 Perfil Típico de Tensión Residual Sobre un Engranaje Cementado

BIELAS

Las bielas son ejemplos perfectos de componentes metálicos que trabajan a fatiga, ya que cada revolución de motor corresponde a un ciclo de cargamento. Las zonas críticas de fallo de la mayoría de las bielas son los radios adyacentes a la cabeza de biela de parte y de otra del cuerpo. La **FIGURA 4-5** muestra un análisis de tensiones por elementos finitos, con el máximo de tensiones señalado de rojo.

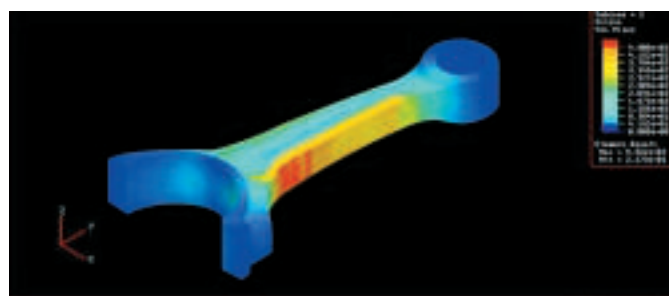
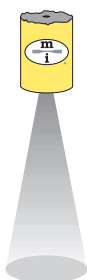


FIGURA 4-5 Concentración de Tensiones por Elementos Finitos Sobre Biela

El método de Shot Peening el más económico es el que se hace sobre las piezas brutas de forja, de fundición, o salidas de metales sinterizados antes de algún mecanizado de agujeros o de caras. Así se puede evitar las operaciones de protecciones que aumentarían el coste. Una superficie rugosa en compresión tiene mejores propiedades a fatiga que una superficie lisa en tracción (o sin tensión residual), de manera que la mayoría de las superficies Shot Peenizadas no necesitan ni preparación, ni operación posterior.



CIGUENALES

En la mayoría de los casos, se Shot Peenizan todos los radios del cigüeñal. Eso incluye los apoyos y los muñones como representado en la FIGURA 4-6. La zona que soporta las tensiones las más importantes de un cigüeñal es el radio de acuerdos de los muñones. La zona la más cargada de un cigüeñal de motor es la parte baja del radio de muñon. La tensión llega al máximo en esta zona durante el ciclo de explosión de los gases cuando el muñon está en el punto muerto alto FIGURA 4-6. Las grietas de fatiga se inician de manera corriente en los radios de acuerdo y se propagan a través de la sección del cigüeñal hasta el radio de acuerdo adyacente del muñon, ocasionando fallos brutales.

El experimento mostró la eficacia del Shot Peening sobre los cigüenales de aceros forjados, de aceros colados, de fundiciones nodulares, de fundiciones ADI. El Det Norske Veritas autoriza aumentos de resistencia a fatiga en un 10 a un 30%, cuando se Shot Peenizan los radios de acuerdo bajo condiciones controladas [Ref 4.5].

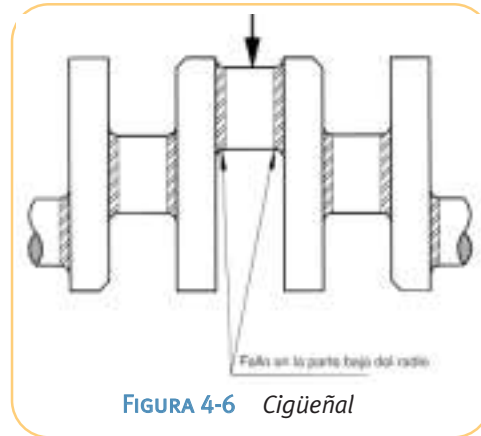


FIGURA 4-6 Cigüeñal

ESTUDIO DE CASO

CIGUENALES DE MOTORES DIESEL

Se realizaron pruebas de flexión cuatro puntos sobre una muestra que provenia de un cigüeñal de motor diesel. El material era un acero inoxidable Armco 17-10 Ph. La exigencia era de superar cien millones de ciclos sin rotura. Las resistencias a fatiga de las muestras con o sin Shot Peening se midieron a 10 mil millones de ciclos. La carga a fatiga sin Shot Peening era de 293 MPa contra 386 MPa para el material con Shot Peening, o sea un aumento del orden de un 30% [Ref. 4.6].

ESTUDIO DE CASO

DISCOS DE TURBINA DE MOTOR DE AVION

En 1991, las Autoridades Federales Aeronáuticas Americanas (FAA) emitieron una directiva de navegación que imponía la inspección de las grietas en los discos de soplante baja presión. Más de 5000 motores estaban en servicio sobre aviones de negocio en Estados Unidos y en Europa.

La FAA impuso la inspección de los motores para los cuales las ranuras de encastre de los discos de soplante no habían sido Shot Peenizadas por boquilla tipo lanza tras el mecanizado. Esos motores debían reducir su duración de vida en servicio de 10 000 ciclos a 4 100 ciclos de despegues y de aterrizajes. Los discos que, antes de haber alcanzado los 4 100 ciclos, fueron Shot Peenizados con boquilla lanza según l'AMS 2432 (Shot Peening controlado por ordenador), se vieron consentir una extensión de su potencia de 3 000 ciclos [Ref. 4.7]. Una operación típica de Shot Peening con lanza sobre disco de soplante está representada en la FIGURA 4-7. Vease también el Capítulo 11 "Agujeros y superficies internas".



FIGURA 4-7 Shot Peening con Lanza Sobre Disco Fan

REFERENCIAS:

- 4.1 Figure 4-2, Unigraphics Solutions, Inc. website (www.ugsolutions.com/www.solid-edge.com), June 2000
- 4.2 Letter to W.C. Classon, Lloyds Register of Shipping, May 1990
- 4.3 Sandberg; Letter to Metal improvement Company, Det Norske Veritas, September 1983
- 4.4 Figure 4-5, Unigraphics Solutions, Inc. website (www.ugsolutions.com/www.solid-edge.com), June 2000
- 4.5 Sandberg; Letter to Metal improvement Company, Det Norske Veritas, September 1983
- 4.6 Internal Metal Improvement Co. Memo
- 4.7 FAA Issues AD on TFE73, Aviation week & Space Technology; April 22, 1991



FATIGA POR TORSION

Se adapta muy bien el shot peening a la fatiga por torsión ya que la tensión de servicio está en su máximo sobre la superficie. La carga en torsión crea tensiones en las dos direcciones, longitudinal y tangencial, de tal manera que la tensión máxima está inclinada a 45° en referencia al eje longitudinal de la pieza. La **FIGURA 5-1** representa una barra sólida cargada en torsión y con grietas características de una carga en torsión alternada.

Los materiales de bajas características mecánicas tienden a romperse en torsión en el plano de cizallamiento perpendicular al eje longitudinal, porque son menos resistentes al cizallamiento que a la tracción. Los materiales de altas características mecánicas tienden a romperse a 45° en referencia al eje longitudinal porque son menos resistentes a la tracción que al cizallamiento.

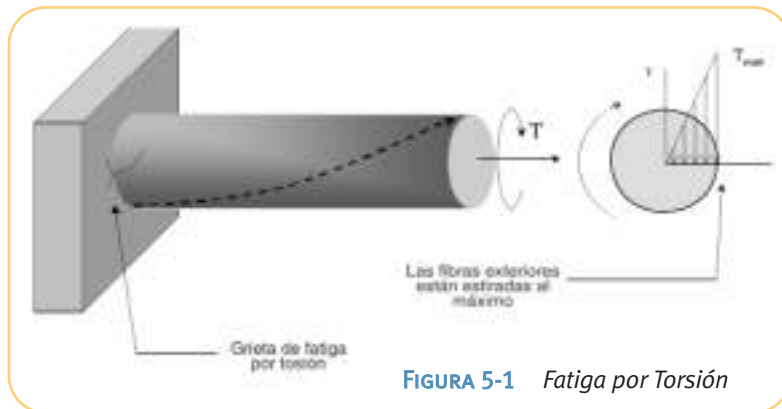


FIGURA 5-1 Fatiga por Torsión



FIGURA 5-2 Montaje de Muelles de Compresión

MUELLES DE COMPRESION

Los muelles de compresión están sometidos a muchísimos ciclos de fatiga y son una de las aplicaciones las más usuales del shot peening. El hilo del muelle se enrosca cuando el muelle está comprimido, lo que tiene por resultado de crear tensiones de torsión. Además de la sollicitaciones a fatiga, el trefilado en espiral genera tensiones residuales de tracción nefastas sobre el diámetro interior del muelle. La **FIGURA 5-3** muestra los perfiles de tensiones residuales después del conformado del muelle y después del shot peening.

El hilo del muelle de acero con cromo-silicio de diámetro 6,25 mm analizado en la **FIGURA 5-3** tiene un límite de rotura de 1800 MPa. La tensión residual de tracción generada por el enrollamiento sobre la superficie interna es de +480 MPa y es la causa primera de rotura a 80 000 ciclos de carga. [Ref 5.2].

El shot peening sustituyó la tensión residual de tracción con una tensión residual de compresión de -1050 MPa. Equivale a un 60% del límite de rotura del hilo, y provoca una duración de vida suplementaria de 500 000 ciclos sin rotura.

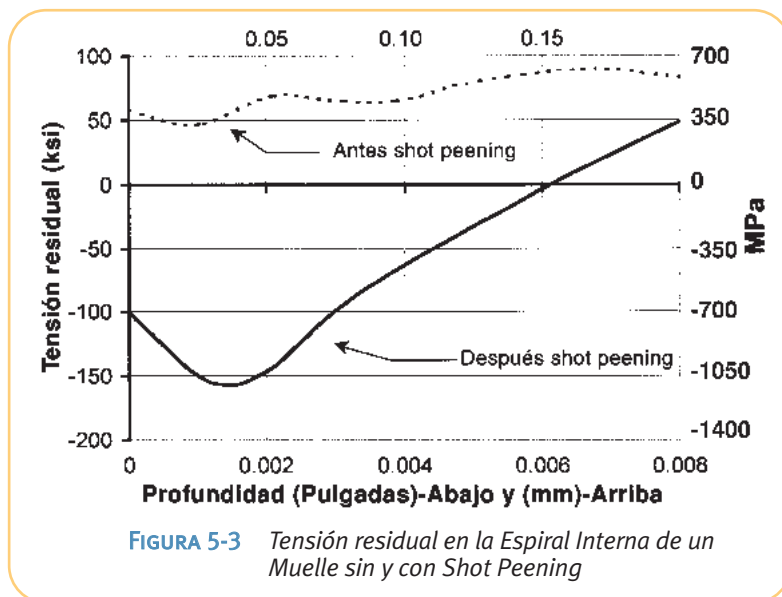
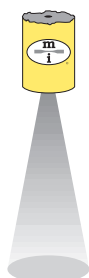


FIGURA 5-3 Tensión residual en la Espiral Interna de un Muelle sin y con Shot Peening



Se suele realizar una operación de revenido después del shot peening sobre los muelles. El revenido desempeña un papel estabilizador sobre el proceso de fabricación del muelle, eliminando problemas potenciales de calibrado que pueden sobrevenir sobre algunos muelles shot peenizados. Se opera el revenido a aproximadamente 200°C durante 30 minutos sobre los muelles de acero al carbono, es decir debajo de la temperatura de revenido del hilo. A más de 230°C las tensiones residuales de shot peening empiezan a aliviarse.

Otros tipos de muelles y resortes responden bien al shot peening. La rotura a fatiga se inicia en el punto donde la superposición de las tensiones aplicadas y de las tensiones residuales es máxima. Los muelles de torsión suelen romperse en la superficie exterior cerca del enlace a la cabeza, mientras que los muelles de tracción suelen romperse al interior del gancho. Los otros tipos de resortes que pueden mejorarse con shot peening son las ballestas, resortes espirales, resortes planos, etc...

ARBOL DE SALIDA DE POTENCIA

Los arboles de salida de potencia se emplean para transmitir una potencia en salida de caja sobre un órgano externo por rotación. Eso crea una carga por torsión sobre el elemento en rotación. Como la mayoría de los arboles de salida soportan también cargas de rodamientos, son muy buenos candidatos para el shot peening. La FIGURA 5-4 presenta las zonas clásicas de roturas sobre los arboles de salida que son las estrias, ranuras, radios de acuerdo y ranuras de chaveta.

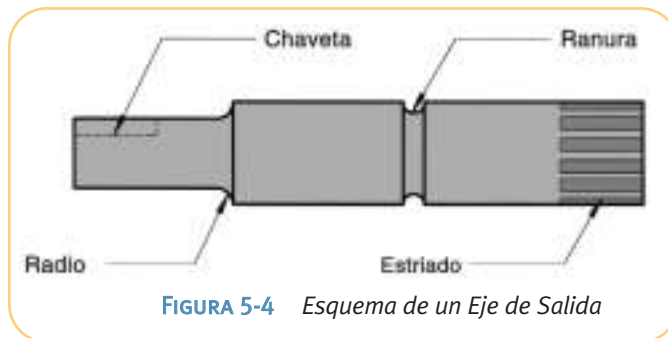


FIGURA 5-4 Esquema de un Eje de Salida

BARRAS DE TORSION

Las barras de torsión y las barras estabilizadoras son elementos utilizados a menudo en los sistemas de suspensión, y otros sistemas similares. Permiten conseguir una mejor estabilidad al oponerse a los movimientos de balance. Cuando están sometidas a esfuerzos repetidos como las suspensiones de vehículos, el shot peening permite reducción de peso y aumento de duración de vida.

ESTUDIO DE CASO

BARRA DE TORSION AUTOMOVIL

La industria automóvil utiliza barras de torsión de tubo como medio de reducción de peso. El shot peening se aplica sobre la superficie exterior, donde las tensiones están al máximo. Sobre las aplicaciones muy cargadas (camiones utilitarios, Vehículos 4x4, y de turismo, etc...) las grietas pueden también iniciarse sobre el diámetro interior que está también solicitado por torsión.

MIC es capaz de shot peenizar diámetros interiores utilizando sus tecnologías de shot peening con lanzas. Eso permite conseguir las tensiones residuales necesarias sobre toda la longitud de las barras de torsión y estabilizadoras.

REFERENCIAS:

- 5.1 Figure 5-2, Unigraphics Solutions, Inc. website (www.ugsolutions.com / www.solid-edge.com), June 2000
- 5.2 Lanke, Hornbach, Breuer; Optimization of Spring Performance Through Understanding and Application of Residual Stress; Wisconsin Coil Spring Inc., Lambda Research, Inc., Metal Improvement Co. Inc.; 1999 Spring Manufacturer's Institute Technical Symposium; Chicago, IL May 1999



FATIGA AXIAL

La fatiga axial es menos frecuente que los otros mecanismos de rotura por fatiga. Una probeta lisa bajo carga axial está sometida a tensiones uniformes sobre toda su sección. De este hecho, los resultados a fatiga de probetas lisas shot peenizadas y cargadas axialmente no suelen presentar mejoras significantes de la resistencia a fatiga, al contrario de la flexión y la torsión para las cuales las tensiones están al máximo sobre la superficie.

La carga axial pura es escasa porque está asociada a menudo con una flexión. El shot peening es eficaz sobre los componentes solicitados axialmente cuando hay cambios de geometría que provocan concentraciones de tensiones. Ranuras, marcas de mecanizado, agujeros y radios de acuerdos son ejemplos típicos de sitios potenciales de inicio de grietas.

ESTUDIO DE CASO

EJE DE FRENADO DE URGENCIA DE TREN

La **FIGURA 6-1** representa un elemento de freno del Metro. Las ranuras cercas de la extremidad con chaflán fueron diseñadas para romper en caso de sobrecarga axial. Roturas prematuras evidenciaron la presencia de una carga de flexión adicional. La simulación experimental de carga a tracción y de flexión presentaron duraciones de vida entre 150 000 ciclos y 2,6 millones de ciclos. El shot peening de este eje permitió a todas las piezas ensayadas de pasar 6 millones de ciclos sin ninguna rotura. [Ref 6.1].



FIGURA 6-1 Esquema de un Eje de Freno

ESTUDIO DE CASO

CONDUCTO DE ESCAPE DE UN APU

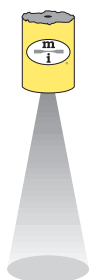
El APU (Unidad Auxiliar de Potencia) se utiliza para suministrar la potencia al avión al suelo cuando los motores principales están parados. Los conductos de escape tubulares de aluminio 8009 están compuestos de elementos soldados a tope y sometidos a altas temperaturas.

Ensayos de fatiga en tracción ondulada de probetas soldadas mostraron una resistencia a fatiga de 156 MPa a 3000 ciclos.

Un shot peening de las soldaduras con bolas de vidrio aumentó la resistencia a fatiga a 180 MPa o sea +13%. [ref 6.2]

REFERENCIAS:

- 6.1 RATP, Cetim; Saint Etienne, France, 1996
- 6.2 Internal Metal Improvement Co. Memo



FALLO POR FRETTING

Estos movimientos relativos, de amplitud microscópica, generan decoloramientos, micro-desconchados y eventualmente fatiga de superficie. Los pequeños óxidos abrasivos que se desarrollaron participan al mecanismo de deterioración de la superficie. Otros mecanismos como el fretting corrosión o el fretting fatiga suelen acompañar la rotura por fretting.

El shot peening se utiliza para impedir el fretting y eventualmente roturas por fretting con el texturizado producido que tiene una rugosidad no direccional. El proceso crea un aumento de dureza de superficie muy notable sobre algunos materiales y tensiones residuales de compresión. Esa capa a compresión protege la superficie contra la iniciación y la propagación de grietas por fretting fatiga que se desarrollan a partir de los defectos de superficie resultandos del fretting.

El fretting puede ocurrir cuando una pieza en rotación está fijada por prensa sobre un eje. Las vibraciones y/o los micro-desplazamientos del eje pueden hacer que las asperezas en la zona de contacto se solden y se desgaren. Las superficies en contacto se oxidan tomando un aspecto de “polvo oxidado” de los aceros en contacto después del fretting.

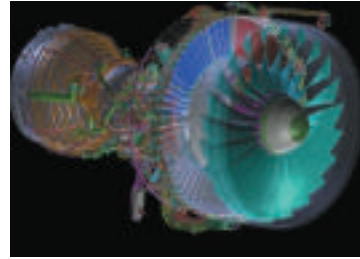


FIGURA 7-1 Turbina de Avión

ESTUDIO DE CASO

ALETAS Y ALABES DE TURBINAS

Un caso típico de fretting es el pie de álabe de turbina. El shot peening se suele utilizar en prevención de las roturas por fretting en las raíces de los álabes. Como lo presenta la FIGURA 7-2, el pie de álabe tiene a menudo una forma de abeto. El ajuste apretado combinado con las condiciones de carga necesita el shot peening de las superficies en contacto para evitar las roturas por fretting.

La mayoría de los pies de álabes de turbinas y de compresores están shot peenizados como piezas nuevas de origen y shot peenizado de nuevo en mantenimiento con el objetivo de restaurar el potencial de carga a fatiga perdido por fretting. Los discos y las ruedas que soportan los álabes deben estar también shot peenizados.

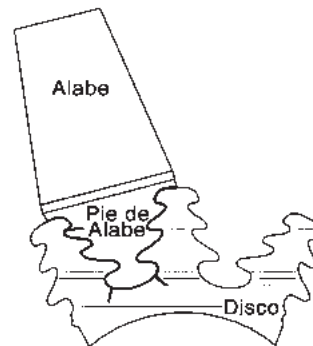
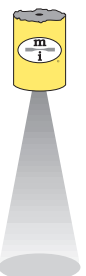


FIGURA 7-2 Conjunto Alabe Sobre Disco de Turbina

PITTING

La resistencia a la fatiga de contacto llamada pitting es de primera importancia para todos los que desarrollan engranajes y otras piezas con esfuerzo de contacto de rodamiento y/o de deslizamiento. La fatiga de contacto es un factor de limitación en la concepción de muchos engranajes. Aún que no sean deseables, los fallos por pitting ocurren gradualmente y sus consecuencias son menos catastróficas que las roturas por flexión de diente.



El pitting se inicia debido a la presión de contacto de Hertz y de la tensión de deslizamiento cerca del diámetro primitivo. Cuando las asperezas se ponen en contacto, la carga se convierte en una combinación compleja de tensión de Hertz y de tracción. Cuando el contacto se repite, una micro-grieta puede iniciarse. La grieta se propaga poco a poco hasta el desconchado y la creación de un pequeño cráter en la superficie.

Malas condiciones de lubricación aumentan el riesgo de rotura por pitting. Ocurre cuando la película del lubricante no es suficiente para separar las superficies en contacto y que los contactos se hacen entre las asperezas. La FIGURA 7-3 presenta un flanco de engranaje y el mecanismo que provoca el pitting [ref 7-2].

Fue demostrado que el shot peening tiene una gran eficacia cuando está seguido por un proceso de finición del estado de superficie. La eliminación de las asperezas de shot peening permite una distribución de los contactos sobre una superficie más grande. El espesor de la capa quitada no debe sobrepasar un 10 % de la profundidad de tensión de compresión. Le rogamos leer el parafo 11 para ver micrografías de superficies después del shot peening y después de una finición isotópica por el proceso C.A.S.E. SM.

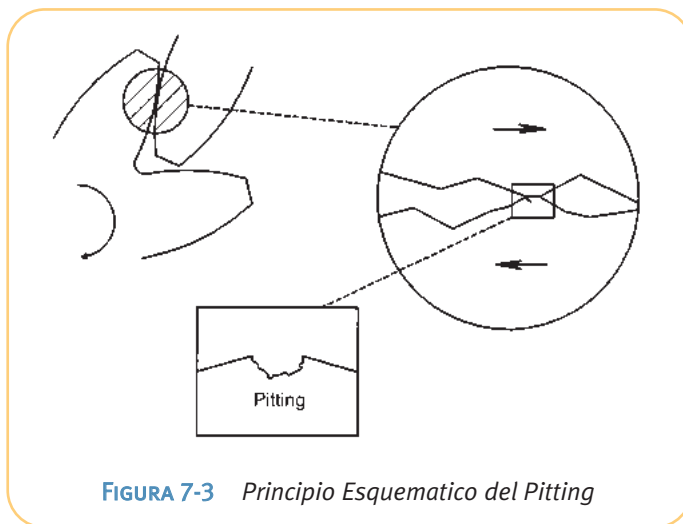


FIGURA 7-3 Principio Esquemático del Pitting

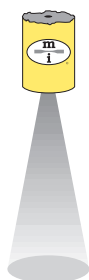
GRIPADO

El gripado es una forma avanzada de desgaste adherente que se produce sobre los materiales en contacto deslizante sin o con lubricación insuficiente. Durante las primeras etapas, parece ser desgaste (scuffing). Las fuerzas adhesivas en actuación deforman plásticamente y crean un soldeo en frío de las asperezas en contacto. Unas partículas metálicas se sueltan y se desplazan fragmentos entre las superficies. En casos severos, ocurre el gripado.

El shot peening puede ser eficaz sobre las superficies que se gripan, especialmente cuando los materiales se endurecen por martilleo. La superficie plastificada en frío por shot peening tiene también pequeñas huellas que actúan como depósitos de lubricante. El shot peening mostró su eficacia contra el gripado sobre los materiales siguientes: Inconel 718 & 750, Monel k-500 y aleaciones de aceros inoxidable, titanio y aluminio.

REFERENCIAS:

- 7.1 Figure 7-1, Unigraphics Solutions, Inc. website (www.ugsolutions.com / www.solid-edge.com), June 2000
- 7.2 Hahlbeck; Milwaukee Gear; Milwaukee, WI / Powertrain Engineers; Pewaukee, WI



ROTURA POR CORROSION

Las roturas por tracción asociadas a la corrosión pueden ocurrir por tensiones estáticas o cíclicas. En ambos casos, el medio ambiente contribuye a la rotura. Medios ambientes como el agua del mar y gases agresivos de pozos de petróleo son desafíos para los metalurgistas. En la mayoría de los casos, se aumenta la agresividad del medio ambiente con la temperatura.

CORROSION BAJO TENSION (CBT)

Las roturas por corrosión bajo tensión (CBT) suelen estar asociadas a tensiones de tracción estáticas. Esas tensiones estáticas pueden ser tensiones aplicadas como bridas atornilladas o tensiones residuales resultantes de procesos de fabricación (como el soldeo). Se necesitan 3 factores para la aparición de CBT.

- Tensiones de tracción
- Sensibilidad de los materiales
- Ambiente corrosivo

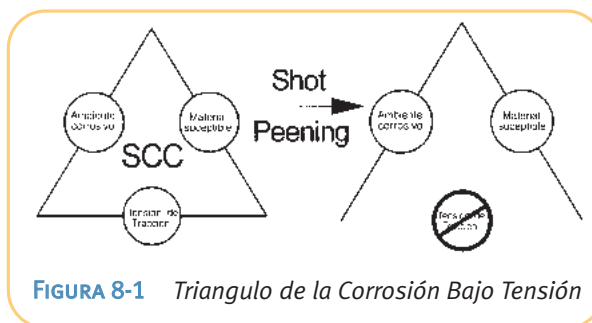


FIGURA 8-1 Triángulo de la Corrosión Bajo Tensión

La FIGURA 8-1 presenta el triángulo de la corrosión bajo tensión, en el cual cada lado debe estar presente para que la CBT aparezca.

La capa de compresión creada por el shot peening quita el lado “tensión de tracción” del triángulo de CBT. Sin tensión de tracción, los riesgos de rotura por CBT están eliminados. Aquí está una lista parcial de aleaciones susceptibles de roturas por CBT.

- Aceros inoxidables austeníticos
- Ciertas aleaciones de serie 2000 & 7000
- Ciertas aleaciones base níquel
- Ciertos aceros de altas resistencias
- Ciertas aleaciones de cobre



FIGURA 8-2 Rotura por Corrosión Bajo Tensión Sobre un Acero Inoxidable Austenítico

La FIGURA 8-2 muestra una grieta de CBT. Para los aceros de la serie 300, la representación en “brazos de río” es típica de la CBT. Se utiliza a menudo para análisis de fallos de materiales.



ESTUDIO DE CASO

INSTALACION DE PRODUCCION QUIMICA

El shot peening fue empleado para reducir costes de fabricación de equipos para la industria química. Cuando se utiliza amoniaco o soluciones con cloruros, un material económico, pero sensible a la CBT, puede ser seleccionado si está shot peenizado, más bien que un material más caro y no susceptible a la CBT. A pesar del coste adicional del shot peening, el coste de construcción queda más bajo que empleando una aleación más cara.

La tabla siguiente demuestra la eficacia del shot peening para combatir la corrosión bajo tensión para varias aleaciones de aceros inoxidable. La carga aplicada es equivalente a un 70% del límite elástico de los materiales. [Ref 8.2].

<i>Material</i>	<i>Shot Peening Si/No</i>	<i>Duración ensayo (horas)</i>
316 SS	no	11,3 horas para la rotura
316 SS	si	1000 horas sin grieta
318 SS	no	3,3 horas para la rotura
318 SS	si	1000 horas sin grieta
321 SS	no	5 horas para la rotura
321 SS	si	1000 horas sin grieta

FATIGA CORROSION

La fatiga corrosión es un modo de rotura en un ambiente corrosivo asociado a una carga cíclica. La resistencia a fatiga puede ser reducida de un 50% o más cuando aleaciones están utilizadas en ambientes corrosivos.

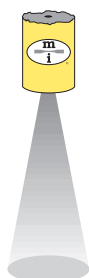
ESTUDIO DE CASO

FRAGILIZACION CON HIDROGENO

Se suele encontrar el hidrógeno sulfúrico (H₂S) en los pozos de sondeo de hidrocarburos. La resistencia a fatiga de ciertas aleaciones metálicas baja de forma tremenda en presencia de H₂S. Los resultados de la pruebas siguientes ilustran la respuesta de un acero inoxidable 17-4PH endurecido por precipitación, y expuesto al H₂S con y sin shot peening [Ref 8.3].

<i>% del límite elástico</i>	<i>Mecanizado (horas para la rotura)</i>	<i>Mecanizado más Shot Peening (horas para la rotura)</i>
30	29,8 horas	720 horas sin rotura
40	37,9 horas	561 horas
50	15,4 horas	538 horas
60	15,2 horas	219 horas

Ensayo en conformidad con Nace TM-01-77



ESTUDIO DE CASO

IMPLANTES QUIRURGICOS

La ciencia médica sigue su evolución reemplazando órganos humanos dañados o que faltan. Los implantes médicos y fijaciones asociadas deben ser ligeras y muy resistentes. Además, el cuerpo humano contiene fluidos corrosivos para la mayoría de los materiales técnicos.

Se utiliza el shot peening con éxito para combatir tanto la fatiga de metales como la fatiga corrosión de aleaciones de acero inoxidable y de titanio.

CORROSION INTERGRANULAR

Durante la operación del revenido de los aceros inoxidables austeníticos, los carburos de cromo se precipitan en las juntas de granos. De ello resulta un empobrecimiento en cromo en las zonas adyacentes a las juntas de granos. Entonces, la resistencia a la corrosión disminuye, y la aleación se vuelve sensible a la corrosión intergranular (sensibilización).

Cuando el shot peening se aplica antes la sensibilización, los granos se vuelven más pequeños y la cantidad de juntas de granos aumenta muchísimo. Eso produce numerosos sitios de nucleación para la precipitación de carburos de cromo. La precipitación aleatoria de los carburos de cromo no permite a la corrosión desarrollarse según un camino continuo.

Mejorías significantes de resistencia a la corrosión intergranular fueron documentadas gracias a la aplicación del shot peening antes sensibilización. No se nota ningún beneficio cuando se aplica el Shot Peening tras la sensibilización.

La FIGURA 8-3A es una imagen al microscopio electrónico de corrosión intergranular.

La FIGURA 8-3B muestra en oscuro una grieta primaria y una grieta secundaria que se propaga en las juntas de granos.

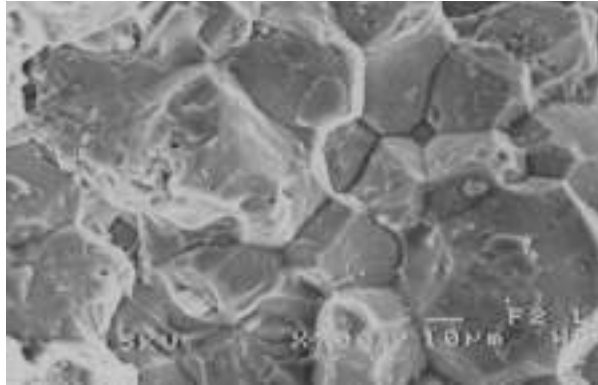


FIGURA 8-3A Micrografía de una Corrosión Intergranular

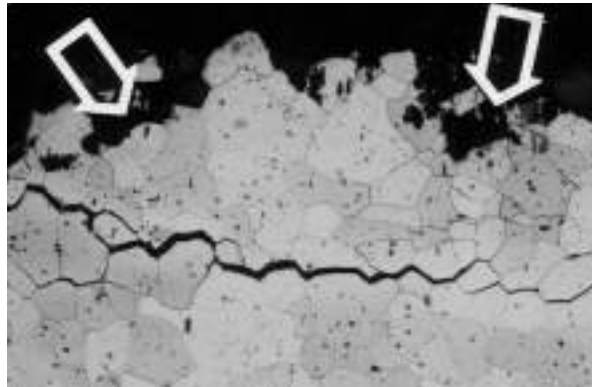


FIGURA 8-3B Grieta Primaria y Secundaria de Corrosión Intergranular

REFERENCIAS:

- 8.1 Figure 8-2, <http://corrosion.ksc.nasa.gov/html/stresscor.htm>, May 2001
- 8.2 Kritzler; *Effect of Shot Peening on Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels*, 7th International Conference on Shot Peening; Institute of Precision Mechanics; Warsaw, Poland, 1999
- 8.3 Gillespie; *Controlled Shot Peening Can Help Prevent Stress Corrosion*, Third Conference on Shot Peening; Garmisch-Partenkirchen, Germany, 1987
- 8.4 Figures 8-3A & 8-3B, <http://corrosion.ksc.nasa.gov/html/stresscor.htm>, May 2001



EFECTO DE LA TEMPERATURA

Calentar piezas después del shot peening necesita una atención particular. El nivel de tensión residual aliviado depende de la temperatura, del tiempo y del material.

La **FIGURA 9-1** muestra sobre un Inconel 718 [Ref 9.1] el efecto creciente del alivio de tensiones residuales cuando aumenta la temperatura. Se suele utilizar el Inconel 718 para aplicaciones a altas temperaturas en los motores de aviones.

La temperatura de alivio de tensiones es una propiedad física de cada material. La **FIGURA 9-2** presenta varios materiales y la temperatura a partir de la cual las tensiones empiezan a aliviarse. En muchas aplicaciones del shot peening contra la fatiga, la temperatura de servicio de las piezas es superior a estos límites bajos de temperaturas, aunque los aumentos a fatiga sean efectivos. En este caso la temperatura de servicio suele ser inferior a la temperatura de alivio completo de las tensiones residuales del material.

Se incorpora frecuentemente el shot peening seguido por un tratamiento térmico en la fabricación en los ejemplos siguientes.

- Muelles – Se suele aplicar una operación de revenido para mejorar las características de los muelles. Vease Capítulo 5 – Fatiga de torsión.
- Piezas cromadas o niqueladas – Se suele aplicar el shot peening antes del revestimiento. Se exige el Shot Peening para la resistencia a la fatiga y para resistir a la fragilización por hidrógeno. Vease Capítulo 3 – Procesos de fabricación. Los revestimientos galvano-plásticos suelen incluir una operación de revenido a 175-205°C durante algunas horas.

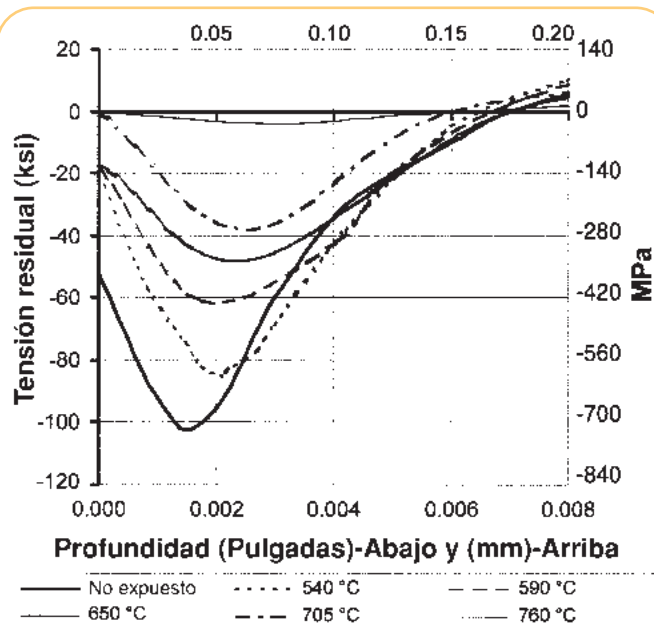


FIGURA 9-1 Perfil de Tensión Residual sobre Inconel 718 Después de 100 Horas de Exposición a Altas Temperaturas

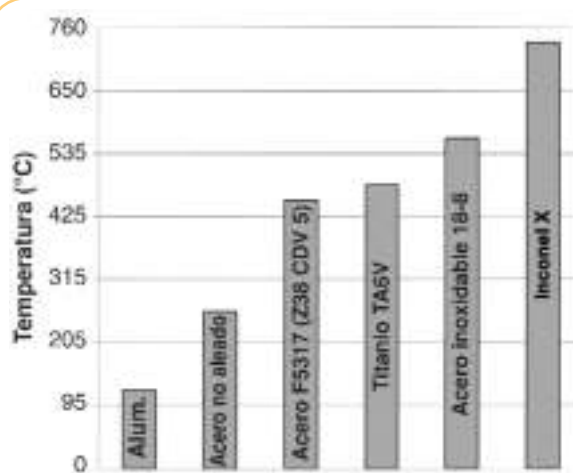
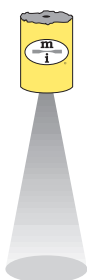


FIGURA 9-2 Temperaturas Aproximativas de Inicio de Alivio de Tensiones Residuales



FATIGA TÉRMICA

La fatiga térmica de los metales hace referencia a roturas generadas por ciclos de cargamentos térmicos con calentamientos y enfriamientos no homogéneos. El calentamiento o el enfriamiento rápido de una pieza metálica introduce fuertes gradientes térmicos en la sección de la pieza, provocando dilataciones y contracciones irregulares. Las tensiones generadas pueden ir hasta la plastificación del metal cuando una zona calentada se dilata y está bridada por otra sección más gruesa y más fría de la pieza.

La fatiga térmica se diferencia de la fatiga a temperatura por el modo de cargamento. Los cargamentos cíclicos en fatiga térmica aparecen por el gradiente de dilatación cuando en el caso de la fatiga a temperatura, las tensiones se generan por las cargas aplicadas. Los dos modos de cargamentos pueden estar superpuestos en caso de cargas aplicadas bajo choque térmico.

ESTUDIO DE CASO

CALDERA DE CENTRALES TÉRMICAS

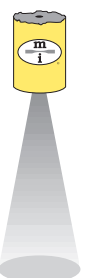
Importantes grietas por fatiga térmica fueron descubiertas sobre ocho calderas de vapor de centrales térmicas. Los componentes están sometidos a altas temperaturas y a fatiga térmica. Los arranques y paradas están a la origen de la fatiga térmica. La temperatura de uso continuo se sitúa entre 250-350°C.

Las grietas eran circunferenciales y se situaban sobre las zonas afectadas por el calor de las soldaduras entre la cámara y la placa de tubos. La fisuración por fatiga estaba atribuida a los años de funcionamiento y a los 747 arranques y paradas de la instalación. Eso era una preocupación para el resto de duración de vida de las centrales.

Las zonas agrietadas fueron amoladas y shot peenizadas. Inspecciones profundizadas mostraron que ninguna nueva grieta por fatiga se había iniciado después de cinco años de funcionamiento y 150 arranques y paradas [Ref 9.2].

REFERENCIAS:

- 9.1 *Surface Integrity, Tech Report, Manufacturing Engineering; July 1989*
- 9.2 *Gauchet; EDF Feedback on French Feedwater Plants Repaired by Shot Peening and Thermal Stresses Relaxation Follow-Up, Welding and Repair Technology for Fossil Power Plants; EPRI, Palo Alto, CA; March 1994*



PEENFORMING

El peenforming o conformado por shot peening es el procedimiento preferido de conformado de paneles aerodinámicos de alas de aviones. Es un proceso sin matriz, realizado a temperatura ambiente. Es idóneo para el conformado de paneles de alas y de empenaje, incluso para los aviones los más grandes. Se utiliza idealmente para conformar curvaturas cuyos radios se sitúan dentro del límite elástico del metal. Se trata de grandes radios de curvatura, sin cambio abrupto de forma.

Las tensiones residuales de compresión alargan la superficie shot peenizada dentro de su dominio elástico como lo muestra la **FIGURA 10-1**. La superficie shot peenizada tomará una curvatura convexa y pondrá la superficie cóncava a compresión. Los paneles de alas de aviones suelen tener grandes superficies de espesores relativamente pequeños. Las tensiones residuales de shot peening desarrollan fuerzas de flexión importantísimas sobre las grandes superficies. Es generalmente posible trabajar estos paneles para conseguir la forma exigida cuando el peenforming está definido y controlado correctamente.

Un proceso de peenforming bien pensado se aplica con espesores variables, cortes, largueros integrados, refuerzos como la presencia de deformaciones anteriores. La **FIGURA 10-2** muestra un panel de ala con curvaturas distintas sobre toda su longitud. El panel está colocado sobre utillaje de control que permite la verificación de forma. El peenforming suele aplicarse sobre una máquina a mesa fija y cabina rodante (**FIGURA 10-3**).

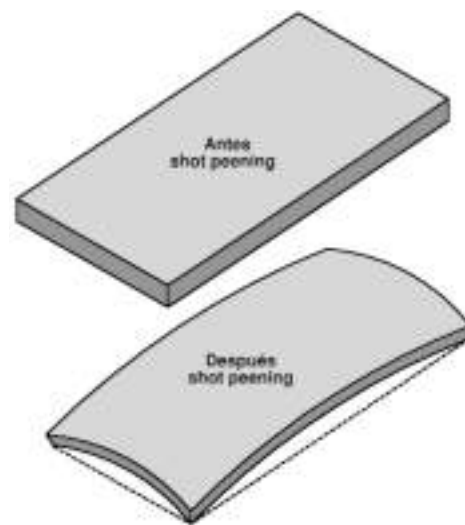


FIGURA 10-1 Chapa Antes y después del Shot Peening

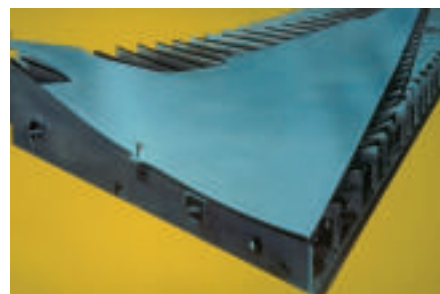


FIGURA 10-2 Panel de Ala conformada por Peen Forming

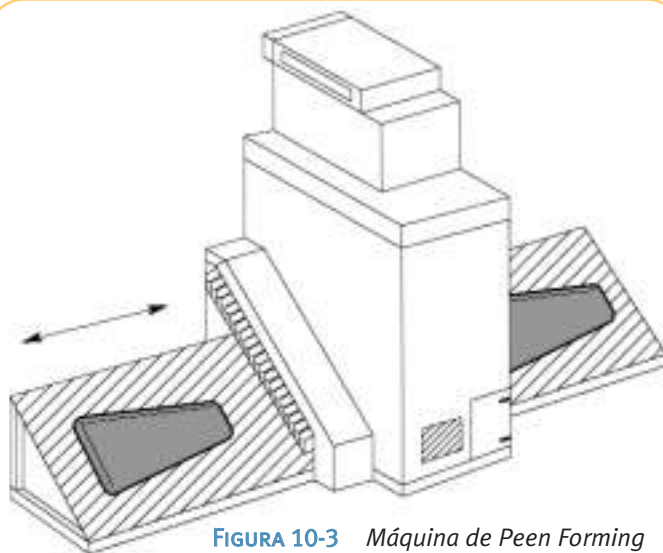
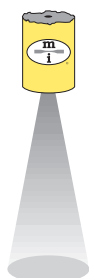


FIGURA 10-3 Máquina de Peen Forming

Las ventajas del peenforming son las siguientes:

- No se necesita matriz de conformado.
- Proceso realizado a temperatura ambiente.
- El proceso se adapta fácilmente a cambios de diseños posteriores. No hay costes de cambio de molde.
- Como la curvatura se consigue por la introducción de tensión de compresión, la pieza tiene una mejor resistencia a fatiga por flexión y a la corrosión bajo tensión.
- Los paneles conformados por peenforming presentan tensiones residuales de compresión en las superficies cóncava y convexa.



La mayoría de los aviones equipados de paneles de alas aerodinámicas en aleaciones de aluminio utilizan el proceso peenforming.

Metal Improvement Company desarrolló técnicas de modelizaciones numéricas que permiten hacer estudios de viabilidad y conceptos originales. El programa utiliza datos de concepto 3D y, tomando en cuenta las curvaturas bi-direccionales, calcula y define las características del peenforming. También exporta los datos numéricos para finalizar los parámetros de peenforming necesarios para conseguir la curvatura. Una ventaja significativa de esas modelizaciones es de permitir a MIC que asista los conceutores de paneles de alas en los primeros pasos del diseño. Esas técnicas permiten saber con antelación si las curvas aerodinámicas pedidas son compatibles con procesos de fabricación economicamente ventajosos (FIGURA 10-4).

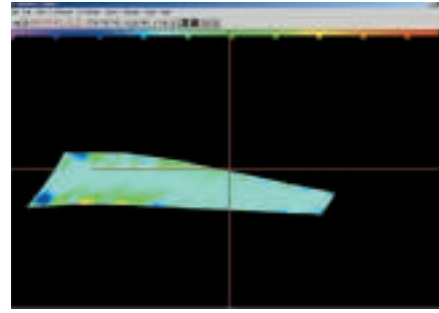


FIGURA 10-4 Simulación Operación de Peen Forming

CORRECCION DE FORMA

Utilizando las técnicas del peenforming, el shot peening permite corregir geometrias. Se consigue aplicando solamente el shot peening sobre la pieza en zonas seleccionadas para introducir las tensiones de compresión que permiten llegar a la geometria deseada.

Algunos ejemplos:

- Corrección de flecha de arbol de transmisión o de cigüeñal
- Corrección de concentricidad de corona
- Ajuste (flecha y twist) de largueros de ala de avión
- Corrección de deformación después de soldeo

El procedimiento de peenforming evita las tensiones de tracción perjudiciales generadas por otros procesos de corrección de forma e introduce en superficie sólo tensiones residuales de compresión benéficas.

AUMENTO DE DUREZA

Numerosos materiales y aleaciones tienen la propiedad de aumentar su dureza por martilleo. El shot peening puede generar aumentos sustanciales de dureza en superficie para aleaciones de los materiales siguientes :

- Acero inoxidable
- Aluminio
- Inoxidable al manganeso
- Inconel
- Estelita
- Hastelloy

Puede ser particularmente interesante para las piezas que no puedan ser tratadas termicamente pero que necesitan una buena resistencia al desgaste de superficie. La tabla siguiente presenta algunos ejemplos de aumento de dureza de superficie por shot peening.

<i>Material</i>	<i>Antes Shot Peening</i>	<i>Después Shot Peening</i>	<i>Mejora en %</i>
Latón	50 HRB	175 HRB	250
Inox 304	243 HV	423 HV	74
Inox 316 L	283 HV	398 HV	41
Inox (Manganeso)	23 HRC	55 HRC	139
Inconel 625	300 HV	500 HV	67
Estilita	42 HRC	54 HRC	29
Hastalloy C	18 HRC	40 HRC	122 *
Hastalloy C	25 HRC	45 HRC	80 **

* Estado forjado ** Estado moldeado



TEXTURIZADO PEENTEXSM

El shot peening puede también ser utilizado para crear aspectos estéticos diferentes. MIC dispone de una gran variedad de bolas, de la más pequeña bola de cristal hasta grandes bolas de acero al carbono e inoxidable. Utilizando un proceso muy controlado, MIC es capaz de producir finiciones arquitecturales uniformes, reproducibles y más resistentes a daños mecánicos debidos al aumento de dureza superficial.

Los acabados Peentexsm fueron utilizados para el texturizado de objetos de arte, pasamanos de escalera, vestíbulos y fachada de edificios, objetos de fundición de decoración y numerosas otras aplicaciones por sus aspectos visuales. MIC recomienda comparar visualmente diferentes acabados sobre muestras. La **FIGURA 10-5** es un pasamano con un ejemplo acabado Peentexsm (lado izquierdo de la **FIGURA 10-5**) con el objetivo de quitar el aspecto brillante en la zona sin texturizado (lado derecho).

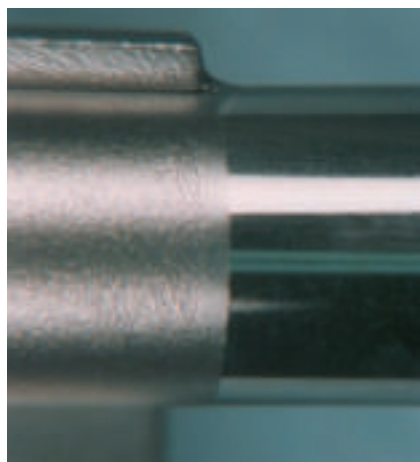


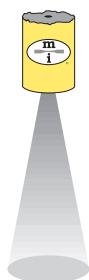
FIGURA 10-5 Comparación entre Peentexsm a la izquierda y el Estado Pulido a la Derecha

Una superficie texturizada es capaz de ocultar las rayas, las imperfecciones que serían muy visibles sobre una superficie mecanizada o amolada. Los moldes utilizados en la fabricación de piezas plásticas son, a menudo, shot peenizados para ocultar los defectos de superficie. La textura del molde será la imagen espejo de la pieza de plástico.

OPTIMIZACION DEL ESTADO DE SUPERFICIE

Unas superficies técnicas necesitan una mejora de acabado para optimizar la función de la pieza. Algunas aplicaciones de shot peening están listadas :

- En la mayoría de los casos, una superficie texturizada tiene un coeficiente de rozamiento más bajo que una superficie sin texturizado. Esto viene del hecho que la superficie de contacto está reducida a los “picos” de huellas de shot peening.
- En algunas aplicaciones los “valles” de huellas sirven de depósitos de lubricante lo que no es el caso en superficies lisas.
- En algunos ejemplos, una superficie texturizada no-direccional es preferible a una superficie mecanizada uni-direccional. La eficacia fue comprobada sobre algunas aplicaciones de estanqueidad.
- Para algunas aplicaciones de moldes, una superficie texturizada tiene menos efectos de adherencia, lo que favorece el desmoldeo.



ESTUDIO DE CASO

TUBO DE TRANSPORTE NEUMATICO

El diámetro de los tubos de transportes neumáticos pueden llegar hasta 250 mm, y suelen realizarse con acero inoxidable o aluminio. Están utilizados para el transporte de gránulas de plástico en las mismas plantas de producción, de moldeo de varios productos o en los sitios de mezcla y de distribución. Las gránulas transportadas se deterioran al rozar sobre la pared interna del tubo. La velocidad de las gránulas generan fricción, calor, y pérdidas de producción.

Utilizando una variante del Peentexsm que produce huellas direccionales, MIC propone una superficie texturizada orientada que reduce de forma significativa la creación de largos hilos llamados cabellos de angel. Ellos generan perdidas y/o contaminaciones de producción que representan miles de toneladas por año. El shot peening direccional se ha mostrado muchísimo más eficaz que los otros tratamientos internos de los tubos y frecuentemente más económico. Puede, también, realizarse in situ.

Además, la plastificación de superficie permite un aumento de dureza (para aluminio e inoxidable) lo que reduce el desgaste y entonces aumenta la vida del tubo.

La tabla presenta resultados de ensayos de seis diferentes tratamientos internos de tubos. Se busca el valor mínimo, en gramos por tonelada, de cabellos de angel transportados. El shot peening orientado genera solamente un tercio de cabellos de angel producidos con el proceso de finición el más cerca [Ref 10.1].



FIGURA 10-6 Unidad de Producción Utilizando Tubos a Texturizado Orientado

<i>Tipo de Tratamiento</i>	<i>Cabellos de angel (g) por Tonelada transportada</i>
Shot Peening Direccional	35 g
Mecanizado suave	108 g
Espiral mecanizada interna	144 g
Estado chorreado	157 g
Revestimiento Poliuretano	159 g
Tubo con rayas medias	306 g

ESTUDIO DE CASO

INDUSTRIA ALIMENTICIA

La industria lechera y quesera evidenció que las huellas del shot peening pueden sustituirse a otros tratamientos de superficie. El texturizado creado por shot peening suele reducir el coeficiente de rozamiento, lo que es necesario para el desmoldeo de quesos en contacto con las superficies alimenticias. Las huellas actúan como pequeños depósitos de lubricantes de grasas y otras sustancias. Eso permite a los productos lácteos deslizarse más fácilmente dentro de los moldes sobre la parte alta de los picos de huellas del shot peening.

Ensayos mostraron que las superficies shot peenizadas alcanzan o superan las exigencias de limpieza microbiológicas. Eso viene del hecho que los impactos esféricos no permiten a las bacterias de fijarse o de reproducirse. Los estados de superficies rugosos conseguidos por proyección de abrasivos, por chorreado o por granallas rotas son más difíciles a limpiar y las bacterias se acumulan y se desarrollan más fácilmente [Ref 10.2]. Ambas bolas de cristal y de acero inoxidable se utilizan con mucho éxito para esa aplicación.

La **FIGURA 10-7** presenta un molde de queso tubular. MIC texturó con éxito muchas otras geometrías de moldes de queso.

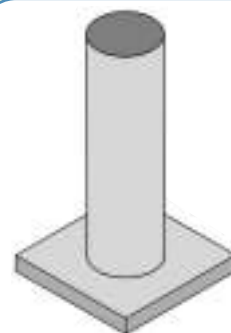


FIGURA 10-7 Molde para Queso



CORROSION EXFOLIANTE

Muchos aviones comerciales tienen más de 20 años de funcionamiento. Entonces, la seguridad de los aviones los más viejos depende de la calidad de su mantenimiento. Un viejo Boeing 737 depresurizó brutalmente a 7300 m de altitud cuando un trozo de 6 m de fuselaje se desgarró en vuelo. La causa de este fallo catastrófico fue la corrosión y la fatiga del metal [Ref 10.3].

MIC desarrollo un procedimiento llamado *Search Peening*sm para localizar la corrosión en superficie y a proximidad. La corrosión exfoliante es una forma de corrosión intergranular que se desarrolla a lo largo de las juntas de grano. Se caracteriza por el delaminado de finas capas de aluminio con la presencia de corrosión entre las capas. Se suele encontrar alrededor de los remaches debidos a la acción galvánica que hay entre dos materiales distintos.

Se forman en superficie ampollas hacia el exterior como lo presenta la **FIGURA 10-8**. En los casos más severos, la corrosión se confina bajo la superficie.

Cuando la corrosión aparece, el técnico de mantenimiento puede quitarla manualmente con amolado o otros medios. Entonces se aplica un Shot Peening para compensar la pérdida de carga admisible a fatiga por la pérdida de espesor de la pieza. Una corrosión exfoliante puede aparecer de nuevo en forma de ampollas. Si es el caso, se quita y se repite el Search Peeningsm hasta que no se reproduzca ninguna ampolla después del shot peening.

MIC puede realizar el Search Peeningsm in situ en los pabellones de mantenimiento aeronáutico. Las zonas críticas del avión se protegen antes de iniciar el shot peening con operadores experimentados.

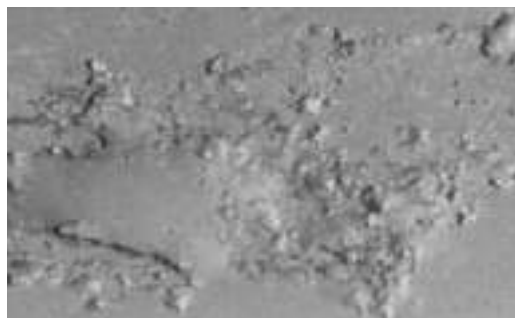


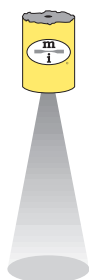
FIGURA 10-8 Corrosión Exfoliante

COMPACTADO DE POROSIDADES

La porosidad ha sido mucho tiempo un problema que penaliza mucho la industria de la fundición y de piezas sinterizadas. Las heterogeneidades en superficie de los materiales pueden ser mejoradas con un martilleo de bolas de shot peening. Aumentando la intensidad (energía de impacto), el shot peening permite también de evidenciar defectos importantes entre granos y delaminaciones cerca de la superficie.

REFERENCIAS:

- 10.1 Paulson; *Effective Means for Reducing Formation of Fines and Streamers in Air Conveying Systems*, Regional Technical Conference of the Society of Plastics Engineering; 1978, Flo-Tronics Division of Allied Industries; Houston, TX
- 10.2 Steiner, Maragos, Bradley; *Cleanability of Stainless Steel Surfaces With Various Finishes*; Dairy, Food, and Environmental Sanitation, April 2000
- 10.3 Eckersley; *The Aging Aircraft Fleet*, IMPACT; Metal Improvement Co.



AGUJEROS Y SUPERFICIES INTERNAS

Cuando la profundidad del agujero de una pieza es más importante que el diámetro de este agujero, no puede estar correctamente shot peenizado por método externo. Una boquilla de shot peening interna o un deflector de granalla interno debe ser utilizado y eso, bajo condiciones de control muy estrictas (FIGURA 11-1). Pequeños orificios, hasta 2,4 mm de diámetro, sobre discos de turbina aeronáutica, han sido Shot Peenizados en producción utilizando el método del deflector de granalla interna.

Las aplicaciones potenciales del shot peening interno incluyen :

- orificios de fijación
- cilindros hidráulicos
- largueros de palas de helicópteros
- tubos de sondeo
- hélices de avión
- orificios de lubricación de arboles de transmisión
- anclajes de álabe de disco de turbina y de compresor.

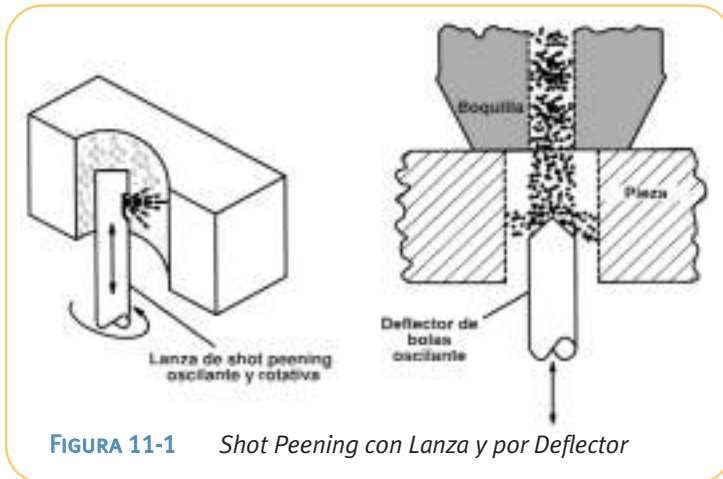


FIGURA 11-1 Shot Peening con Lanza y por Deflector

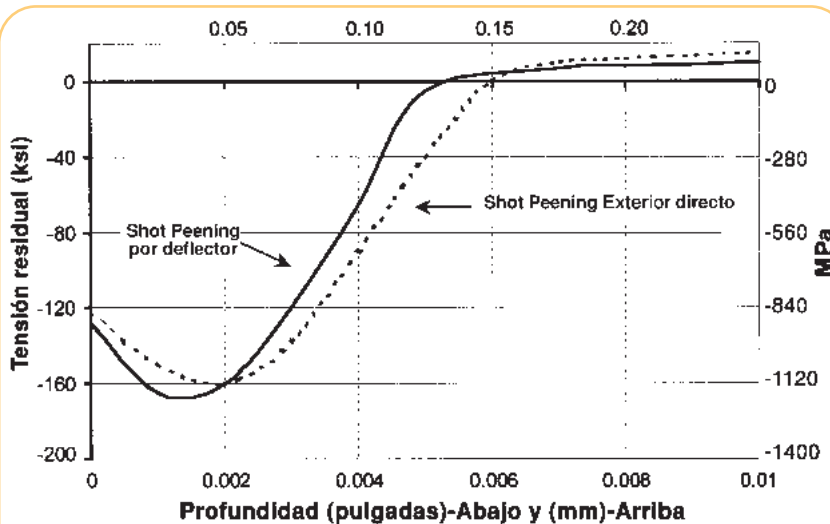


FIGURA 11-2 Comparación entre Shot Peening por Deflector y Shot Peening Exterior Directo

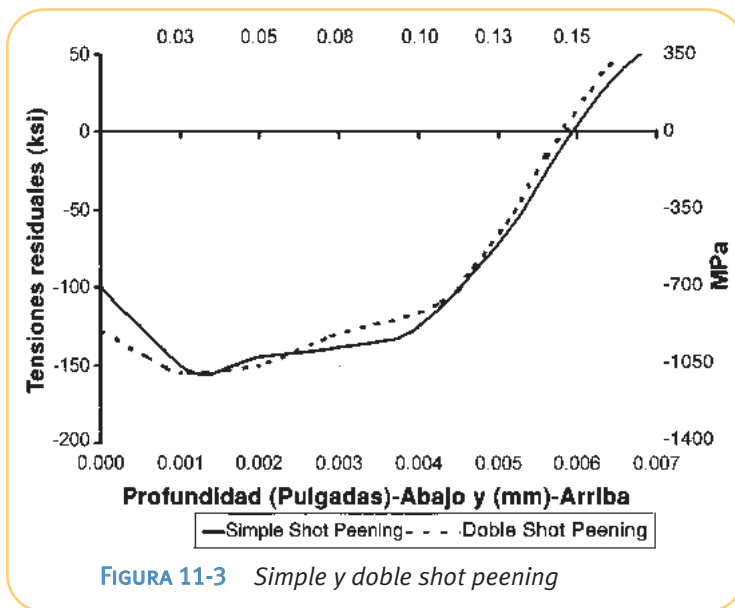
M.I.C ha desarrollado una técnica para comprobar la intensidad en los pequeños orificios. La FIGURA 11-2 muestra los resultados de un estudio realizado sobre un disco de turbina aeronáutica. La comparación se hace entre el perfil de las tensiones residuales sobre una superficie externa shot peenizada con un sistema convencional con boquillas, y las tensiones generadas al interior de un pequeño diámetro shot peenizado utilizando el método del deflector. Se utiliza el mismo tamaño de bola, la misma tasa de cobertura y la misma intensidad. Los perfiles de las tensiones residuales obtenidos por ambos métodos son prácticamente superponibles. [Réf 11.1].

DOBLE SHOT PEENING

El doble shot peening (o Dura Peensm) se utiliza para mejorar si es necesario los resultados a fatiga con relación a la operación del simple tratamiento de shot peening. Las mejoras en duraciones de vida a fatiga debidas al shot peening sobrepasan generalmente un 300 %, 500 % o más.

Durante el tratamiento por doble shot peening, los resultados del simple shot peening están muy a menudo multiplicados por dos o por tres, a veces más.





La FIGURA 11-3 muestra aproximativamente 200 MPa de compresión suplementaria en la superficie cuando el doble shot peening está realizado sobre un acero de muelle al cromo silicio [Ref. 11.2].

El doble shot peening consiste en un primer tratamiento seguido de un segundo tratamiento sobre la misma superficie utilizando una bola más pequeña y una intensidad reducida. Este segundo shot peening martillea así las asperezas generadas por el primer tratamiento, lo que mejora el estado de superficie. El martilleo de las asperezas en superficie acarrea una ganancia de las tensiones de compresión sobre la superficie. Las FIGURAS 11-4 y 11-5 muestran los estados de superficie de un simple y de un doble shot peening ampliados por 30x, cuyos perfiles de tensiones se presentan en la FIGURA 11-3. [Ref. 11.2]

El objetivo es mejorar la tensión residual de compresión de la capa más cercana de la superficie, porque sabemos que se inician en superficie las grietas de fatiga. Comprimiendo más la capa superficial, la pieza se vuelve más resistente a las grietas de fatiga.

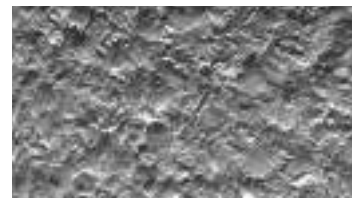


FIGURA 11-4 Textura de Superficie con Simple Shot Peening

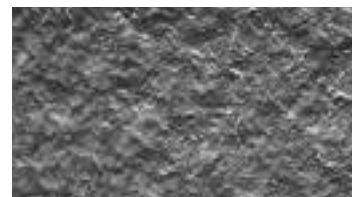


FIGURA 11-5 Textura de Superficie con Doble Shot Peening

EL PROCEDIMIENTO C.A.S.E.SM

Le procedimiento C.A.S.E.SM consiste en un tratamiento de shot peening seguido de un acabado isotropico. El acabado isotropico suprime las asperezas dejadas por el tratamiento de shot peening por técnicas de pulido por vibración y así mantiene la integridad de la tensión residual de compresión en superficie. El procedimiento utiliza una solución química especialmente concebida para reducir el tiempo de tratamiento, lo que permite utilizarlo sobre producciones de grandes series.

C.A.S.E.SM fue concebido para superficies que exigen a la vez una excelente resistencia a fatiga y un excelente estado de superficie debido a una carga de contacto. El C.A.S.E.SM se ha demostrado muy eficaz para mejorar la resistencia al pitting o al micro-pitting de los engranajes. Muchas concepciones de engranajes estan limitadas por fatiga al pitting que se considera como el factor crítico.

El Shot peening se realiza sobre los flancos y pies de dientes mientras que el acabado isotropico se concentra sobre los flancos. Las mejoras del estado de superficie permiten una mejor repartición de las cargas en superficie lo que reduce las tensiones de contacto y aumenta la resistencia al pitting.

Los engranajes de transmisión utilizados en la aeronáutica, el automóvil y los vehículos pesados son aplicaciones ideales para el procedimiento CASE.SM. Estaran utilizados para soportar durante años, momentos de flexión al pie y cargas de contacto importantes sobre los flancos de dientes. Este procedimiento ha dado excelentes resultados en todas estas industrias.

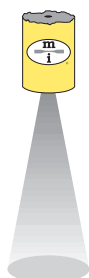




FIGURA 11-6 Textura de superficie con Proceso C.A.S.Esm

La **FIGURA 11-6** muestra una finición típica del CASEsm ampliada por x 30 [Ref. 11.3]. El estado de superficie shot peenizado sería muy parecido a la **FIGURA 11-4**. El procedimiento está concebido para dejar algunos “valles” al acabado shot peenizado para la retención de lubricante.

Estados de superficie de $0,4 \mu\text{mRa}$ o mejor son realizables sobre engranajes cementados. La **FIGURA 11-7** muestra un perfil típico de rugosidad de un engranaje cementado después de

shot peening y también después el acabado isotropico del procedimiento CASEsm. La distancia de “pico hasta valle” del acabado shot peenizado es de $2,9 \mu\text{m}$. Después del acabado isotropico, esta distancia se rebaja a $0,6 \mu\text{m}$. La rugosidad R_{sk} , que mide la disimetría de un perfil de rugosidad teniendo en cuenta su valor mediano es entonces negativo y puede acercarse a $-1,1$, dado que el procedimiento elimina todos los picos para guardar únicamente los valles del shot peening.

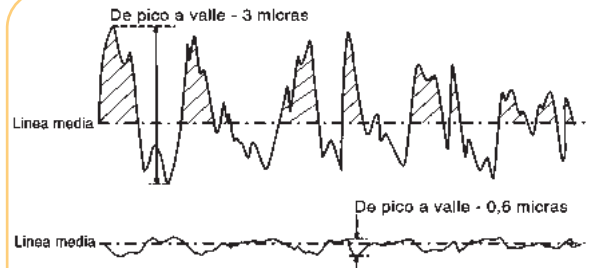


FIGURA 11-7 Textura de Superficie con Shot Peening y Después del Proceso C.A.S.Esm

SHOT PEENING EN OBRA

Las grandes estructuras que han sido fijadas sobre sus fundaciones o cuyo tamaño sobrepasa los límites de cargamento sobre camión pueden ser shot peenizadas por equipos de operadores experimentados con equipamientos portátiles. Estos equipos realizan el shot peening en el mundo entero conformándose a los mismos criterios de calidad que en las fábricas M.I.C. Control de Intensidad Almen, cobertura y bolas certificadas son utilizados como descritos en el capítulo 12 - Control del procedimiento

Ejemplos de aplicaciones realizadas con éxito con equipo móvil :

- Elementos soldados (depósitos bajo presión, cuerpo de triturador, casco de embarcación, depósitos de almacenamiento químico, puentes)
- Reparación de avión y eliminación de la corrosión (panel de alas, tren de aterrizaje, otros componentes cargados dinámicamente)
- Componentes de centrale eléctrica (tubos de intercambiador térmico, stator de turbina, componentes rotativos, álabes de turbina)
- Shot peening direccional sobre tubos de transporte de partículas plásticas (polietileno, polipropileno,...etc.)
- Industrias diversas (acería, papeleras, minas)

SHOT PEENING BAJO TENSION

El shot peening bajo tensión permite desarrollar una tensión residual de compresión suplementaria que ofrece más resistencia a las grietas de fatiga. Mientras que el doble shot peening ofrece mejoras a la capa superficial, el shot peening bajo tensión desarrolla un nivel importante de tensión de compresión sobre toda la capa afectada.

Para ejecutar el shot peening bajo tensión, la pieza debe estar físicamente cargada en la misma dirección que tiene en servicio antes el shot peening. Los muelles de tracción deben estar estirados, los muelles de compresión deben estar comprimidos y las barras de torsión deben estar cargadas en torsión. Eso ofrecerá una tensión residual de compresión máxima y orientada que se opone a la tensión de tracción de servicio creada durante el cargamento cíclico.

La tensión de compresión suplementaria está producida por el precargamento de la pieza en su límite elástico durante el tratamiento por shot peening. Cuando las bolas de shot peening alcanzan la superficie, la capa en superficie se alarga bajo la tensión debida al precargamento.



Se obtiene la tensión residual suplementaria cuando la superficie del metal intenta restaurar su alargamiento inicial.

La **FIGURA 11-8** muestra la tensión de compresión suplementaria, obtenida sobre un acero 50CrV4 por shot peening bajo tensión [Ref11-4]. El gráfico demuestra que, cuanto más es elevado el cargamento, más importante es la tensión residual. Cuando el shot peening se realiza bajo tensión, el coste de tratamiento aumenta a causa de la fabricación del utillaje de fijación y de la manipulación suplementaria para precargar las piezas antes shot peening.

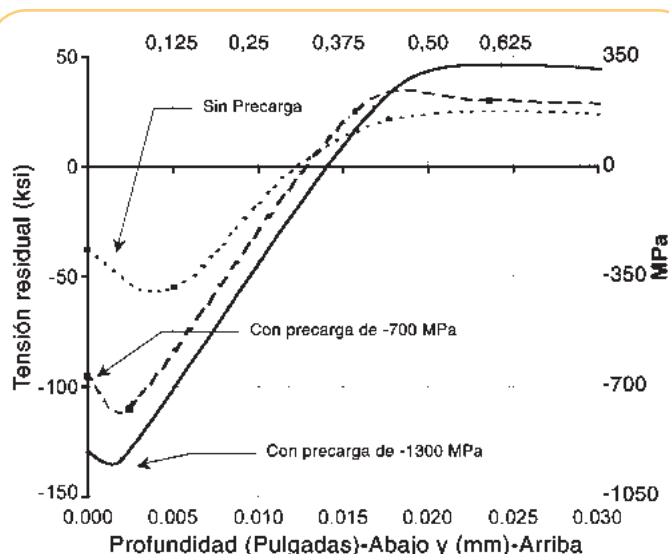


FIGURA 11-8 Tensión Residual Inducida por shot peening Bajo Tensión.

PEENSTRESSSM – MODELISACION DE LA TENSION RESIDUAL

Para definir los parámetros de shot peening apropiados, MIC toma en consideración diversos criterios. Uno de los más importantes es la predicción del perfil de la tensión residual después del shot peening. Los factores siguientes influyen en el perfil de tensión residual final :

- Material, tratamiento térmico y dureza
- Geometría de la pieza
- Bola (tamaño, material, dureza e intensidad)
- Tratamiento simple, doble o bajo tensión

MIC tiene más de 50 años de experiencia en la selección de los parámetros de shot peening.

Recientemente, MIC ha desarrollado en interno un programa llamado Peenstress utilizado para optimizar los resultados del shot peening.

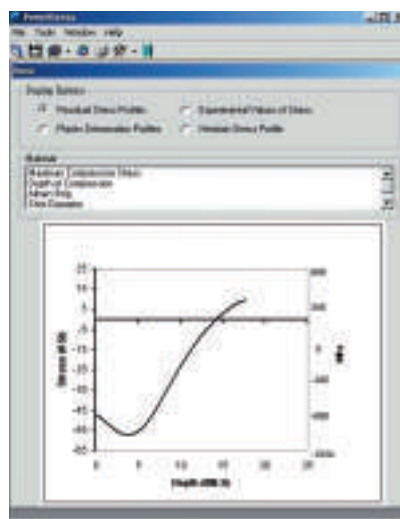


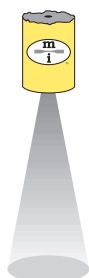
FIGURA 11-9 Perfil de tensión Residual Modelizado por PeenstressSM.

PeenstressSM posee una amplia base de datos de materiales y condiciones de tratamientos térmicos a disposición del utilizador. Una vez seleccionado el material apropiado (y el tipo de tratamiento térmico), el utilizador elige los parámetros de shot peening que son :

- Diámetro de la bola
- Material y dureza de la bola
- Intensidad Almen.

Como sobre la **FIGURA 11-9**, PeenstressSM traza graficamente la curva teórica basada sobre los datos introducidos. Cambiando los parámetros de shot peening, el utilizador puede optimizar el tratamiento para conseguir los resultados deseados.

PeenstressSM contiene una base importante de datos de análisis de tensión resultando de difracción de rayos X que servirán a comprobar las curvas teóricas. Cuando se utiliza el Shot Peening sobre piezas de espesor reducido el programa es particularmente útil para establecer la profundidad de compresión y así reducir al mínimo la deformación.



LASERSHOTSM PEENING

El Lasershotsm peening, o choque laser, utiliza ondas de choque para introducir una tensión residual de compresión. La ventaja principal de este procedimiento es la introducción de una capa de compresión muy profunda con una plastificación mínima. Profundidades de capa hasta 1.0 mm sobre aceros cementados y 2.54 mm sobre aleaciones de aluminio han sido obtenidas de manera corriente. Los métodos convencionales de shot peening, son capaces de alcanzar hasta un 35 % de esas profundidades. Otro beneficio, es que el alivio térmico de la tensión residual es menos importante que la que es generada por el shot peening mecánico sobre aleaciones como el titanio, inconel, etc...[Réf 11.5]

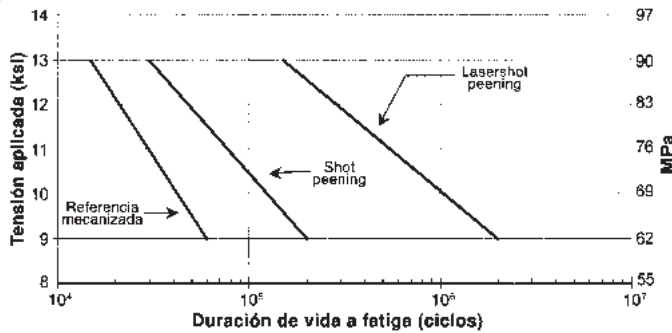


FIGURA 11-10 Lasershot Peening Sobre Alu 6061-T6

Metal Improvement Company a tomado parte activamente en un acuerdo de investigación y desarrollo cooperativo (CRADA) con el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (EEUU) para desarrollar este procedimiento. El dicho procedimiento utiliza un laser vidrio Neodyme de alta potencia y de fuerte cadencia de tiros. Ese laser está utilizado con un manipulador robotizado cinco ejes lo que permite tratar una gran variedad de piezas.

Los beneficios de una capa de compresión residual excepcionalmente profunda están

presentados en la FIGURA 11-10. La curva de fatiga muestra los resultados de prueba a fatiga de probetas en aluminio 6061-T6. Las pruebas comparativas han sido realizadas con probetas referencias, probetas shot peenizadas de manera mecánica y probetas tratadas por choque laser [Réf. 11.6].

VALVULAS - FABRICACION

Metal Improvement Company fabrica válvulas elásticas utilizadas en compresores, bombas y motores de combustión. Las válvulas elásticas son estampaciones de alta precisión funcionando en ambientes hostiles que necesitan gran resistencia mecánica. Se requieren tolerancias de fabricación muy estrictas para realizar una forma plana y ofrecer una resistencia a fatiga en flexión y a las cargas de contactos importantes.

MIC emplea técnicas de acabado Stress litesm concebidas para producir un estado de superficie específico y con bordes redondeados exigidos para garantizar la duración de vida de la pieza. Para aplicaciones muy cargadas, el Stress litesm puede ser asociado con el Shot peening. Los resultados siguientes comparan los resultados de válvulas elásticas utilizando el Stress litesm, con o sin shot peening [Réf. 11.7] :

- Estampada : 47,000 ciclos
- Stress Litesm : 62,000
- Stress Litesm + Shot peening: 194,000

FIGURA 11-11 (válvulas elásticas) representa una selección de la numerosas formas complejas de válvulas fabricadas por MIC.

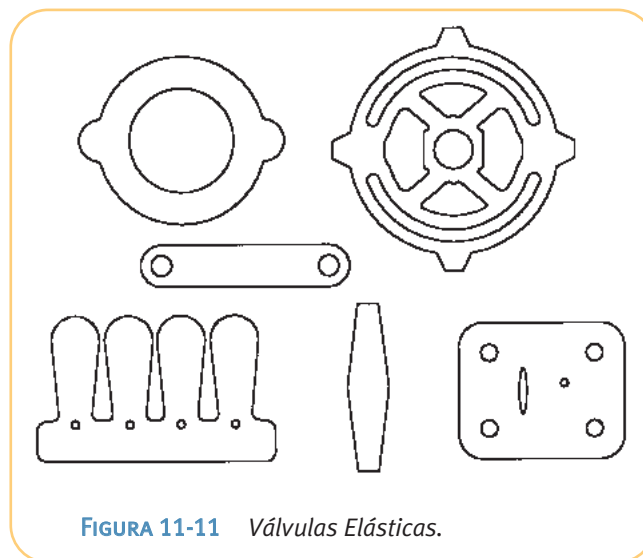


FIGURA 11-11 Válvulas Elásticas.



REPRODUCCION / ARTICULOS TECNICOS

MIC posee una gran colección de publicaciones técnicas referentes a la fatiga y corrosión de los metales, y al shot peening.

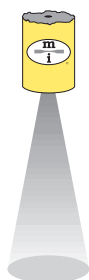
Existe una lista de las separatas al final de este manual técnico. Le invitamos a ponerse en contacto con el servicio técnico de MIC más cercano o a visitar nuestro sitio Web www.metalimprovement.com , si desea un complemento de informe referente al shot peening.

TRATAMIENTO TERMICO

Metal Improvement Co. posee una red de unidades de tratamiento térmico para metales. Esas fabricas están catalogadas en el respaldo de la tapa . A fin de ofrecerles el mejor servicio con arreglo a sus necesidades en tratamientos térmicos como el shot peening, MIC le propondra soluciones originales de subcontratación y de producción.

REFERENCIAS:

- 11.1 Hupp; Shot Peening Bolt Holes in Aircraft Engine Hardware; 2nd International Conference on Shot Peening; Chicago, IL May 1984
- 11.2 Lanke, Hornbach, Breuer; Optimization of Spring Performance Through Understanding and Application of Residual Stress; Wisconsin Coil Spring Inc., Lambda Research, Inc., Metal Improvement Co. Inc.; 1999 Spring Manufacturer's Institute Technical Symposium; Chicago, IL May 1999
- 11.3 Metallurgical Associates, Inc; Waukesha, WI 1999
- 11.4 Muhr; Influence of Compressive Stress on Springs Made of Steel Under Cyclic Loads; Steel and Iron, December 1968
- 11.5 Prevey, Hornbach, and Mason; Thermal Residual Stress Relaxation and Distortion in Surface Enhanced Gas Turbine Engine Components, Proceedings of ASM/TMS Materials Week, September 1997, Indianapolis, IN
- 11.6 Thakkar; Tower Automotive fatigue study 1999
- 11.7 Ferrelli, Eckersley; Using Shot Peening to Multiply the Life of Compressor Components; 1992 International Compressor Engineering Conference, Purdue University



CONTROL DEL PROCEDIMIENTO

El shot peening controlado es diferente de la mayoría de los procedimientos de fabricación por el hecho de que no existe un método no destructivo para determinar que fue realizado en acuerdo 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 tensiones en profundidad. Para asegurarse del respeto de las especificaciones sobre los lotes producidos, los controles siguientes deben ser aplicados de manera permanente :

- Bola de Shot Peening
- Intensidad Almen
- Cobertura
- Máquinas y equipos de producción

MIC satisface o supera criterios de calidad muy severos así como las normas y especificaciones establecidas por todo tipo de industrias, incluso aeronáutica y automóvil. MIC posee certificación y es conforme a las normas ISO 9002 y QS 9000.

CONTROL DE LAS BOLAS

Formas aceptables



Formas inaceptables

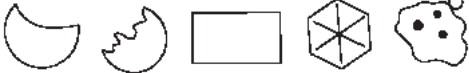


FIGURA 12-1 Formas de Bolas

La **FIGURA 12-1** muestra las formas aceptables e inaceptables de bolas. La bola de Shot Peening debe ser de forma globalmente esférica. Cuando la bola se quiebra

bajo el impacto, los residuos deben ser eliminados para procurar que la superficie no se estropee. La **FIGURA 12-2A** (ampliación x100) presenta de manera evidente la deterioración y los sitios de inicio de grietas potenciales sobre la superficie causados por el uso de bolas inaceptables.

La **FIGURA 12-2B** (ampliación x100) muestra lo que debe ser una superficie correctamente Shot Peenizada.

El diámetro de las bolas debe ser uniforme. La energía del impacto transmitida por la bola es función de su masa y de su velocidad. Una bola más gruesa tiene una masa y una energía de impacto más importante. Si se utiliza para el Shot Peening una mezcla de bolas de tamaños diferentes, las más gruesas crearán zonas de tensión residual mucho más profundas. La capa en tensión será heterogénea y ocasionará resultados incoherentes a fatiga. La **FIGURA 12-3A** presenta un lote de bolas de tamaño y de forma correctas.

La **FIGURA 12-2B** presenta bolas inaceptables.

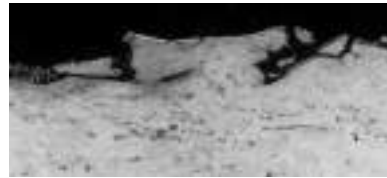


FIGURA 12-2A Daño de Superficie Creado por Bolas Rotas

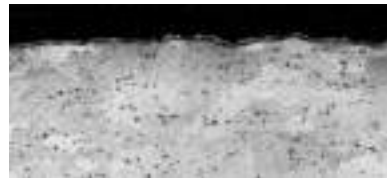


FIGURA 12-2B Estado de Superficie Tipico con Bolas de Buena Calidad



FIGURA 12-3A Bolas de Buena Calidad para el Shot Peening

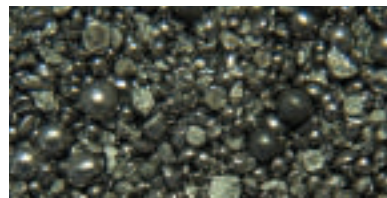
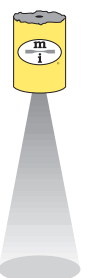


FIGURA 12-3B Bolas Inaceptables de Mala Calidad



Para eliminar correctamente las bolas demasiadas gruesas o pequeñas, MIC utiliza un sistema de tamizado dinámico. Para eliminar de manera correcta la bolas rotas, se introducen las bolas dentro de un separador con espirales interiores abiertas y exteriores envolveres. El sistema tiene por base la diferencia de velocidad entre las bolas esféricas que ruedan y las bolas rotas que avanzan de golpe. La introducción de las bolas se hace por un tubo a la cumbre del cono **FIGURA 12-4**. Las bolas caen en un deposito de forma conica, y después en la espiral interior. La bolas esféricas tomarán suficiente velocidad para expulsarse en la espiral exterior y así podrán ser recicladas. Las bolas rotas que no pueden rodar se quedarán en la espiral interior de donde serán eliminadas.



FIGURA 12-4 Separador de Bolas de Shot Peening

CONTROL DE INTENSIDAD

La intensidad del Shot Peening es la medida de la energía del flujo de bolas. Es uno de los medios esenciales para asegurar la reproducibilidad del procedimiento. La energía del flujo de bolas está en relación directa con la tensión de compresión introducida en una pieza. La intensidad puede ser aumentada si se utiliza bolas de tamaño más importante y/o si se aumenta la velocidad del tiro de las bolas. Las demás variables a tener en cuenta son el angulo de tiro y el tipo de bolas.

Se mide la intensidad utilizando probetas Almen. La probeta es una placa de acero de muelle SAE1070 shot peenizada por un lado sólo. La tensión residual de compresión del shot peening doblará la probeta Almen formando un arco convexo con respecto a la superficie shot peenizada (**FIGURA 12-5**). La altura de la flecha de la probeta Almen depende de la energía del chorro de las bolas y su medida es muy fiable.

Existen tres tipos de probetas Almen utilizadas según la aplicación del shot peening. Cuanto más intenso es el shot peening, más espesa es la probeta.

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

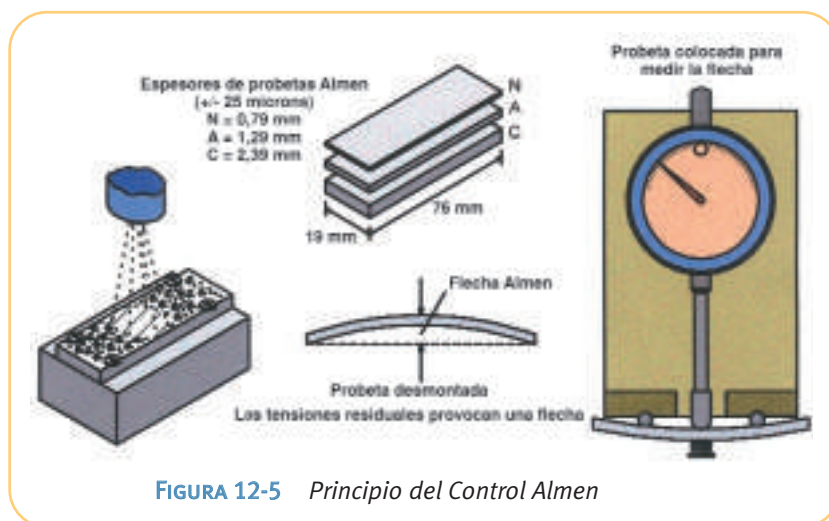


FIGURA 12-5 Principio del Control Almen

La intensidad Almen es la altura de la flecha medida por un comparador Almen seguida por el nombramiento de la probeta Almen. El nombramiento apropiado para 0,30 mm de altura de flecha utilizando una probeta A es F 0,30A (o más usualmente F 30A). El sector de utilización de una probeta Almen es de 0,10 a 0,60 mm. En practica, se utiliza a menudo una probeta Almen más espesa si la intensidad es superior a 0,50 mm.

Usando la misma intensidad de shot peening, se obtiene una flecha 3 veces más importante con una probeta N comparada con la probeta A, ella misma tres veces más importante comparada con la C.

Las probetas Almen están montadas sobre bloques Almen, fijados sobre una pieza rechazadas (FIGURA 12-6) 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. Eso permite comprobar que la máquina de shot peening está ajustada correctamente y funciona conformemente con el procedimiento aprobado. Al final del tratamiento del lote de piezas, la intensidad está comprobada de nuevo para asegurarse que no hubo desvío de los parámetros de tratamiento. En caso de largos ciclos de tratamiento, se ejecutarán controles de intensidad en el transcurso de la producción con arreglo a las exigencias de calidad.

Saturación (control de intensidad): El control inicial de un procedimiento durante su desarrollo necesita que se establezca una curva de saturación. El tiempo de saturación está definido en el primer punto de la curva a partir del cual, duplicando el tiempo de exposición, la altura de arco aumentará sólo de un 10%. La curva de saturación se define shot peenizando una serie de probetas en una máquina ajustada para determinar el tiempo de saturación.

La FIGURA 12-7 muestra que duplicando el tiempo de shot peening de la probeta Almen ($2T$) respecto al tiempo inicial (T), la altura del arco Almen aumenta de menos de un 10%. Eso significa que el proceso alcanza la saturación en tiempo T . La saturación establece la intensidad real del chorro de bolas en una zona precisa de la pieza y permite el ajuste específico de la máquina.

Es importante que no se confunda la saturación con la cobertura. La cobertura está descrita en el próximo capítulo como el porcentaje de la superficie cubierta de impactos de shot peening. 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. Eso es debido a que la cobertura está determinada sobre la superficie de la pieza real siendo más o menos dura. Se determina la saturación utilizando probetas Almen de acero de muelle SAE1070 tratadas a 44-50 HRC.



FIGURA 12-6 utillaje Soporte Probeta Almen

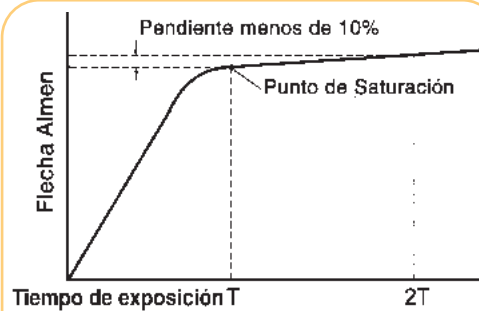


FIGURA 12-7 Curva de Saturación

CONTROL DE COBERTURA

La cobertura completa de una superficie shot peenizada es esencial para poner en ejecución un shot peening de alta calidad. La cobertura es la relación entre la superficie inicial y la superficie cubierta por las huellas del shot peening. La cobertura no debe nunca ser inferior a un 100% porque sino las grietas de corrosión bajo tensión y de fatiga pueden desarrollarse en una zona sin shot peening, aún que sea mínima. Las imágenes aquí abajo muestran una cobertura completa y una cobertura parcial.

Si la cobertura especificada es superior a un 100% (por ejemplo 150%, 200%) significa que el tiempo de tratamiento será el tiempo para realizar el 100% multiplicado por ese factor. Una cobertura de un 200% duplica el tiempo necesario para el tratamiento a un 100%.

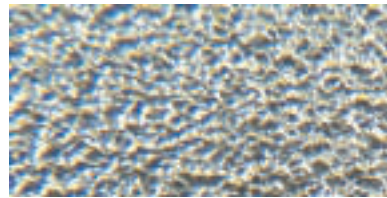


FIGURA 12-8A Cobertura Completa de Shot Peening



FIGURA 12-8B Cobertura Parcial de Shot Peening



PEENSCAN® (Control de la cobertura) :

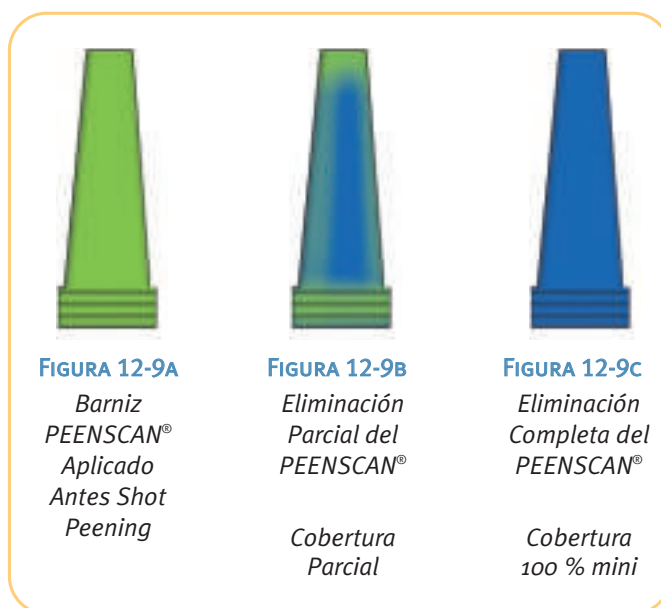
Es bastante fácil determinar la tasa de cobertura del shot peening sobre materiales blandos ya que los impactos son muy visibles. Una lupa con amplificación x 10 es perfectamente adecuada en este caso. En numerosas aplicaciones, es más difícil determinar esa tasa. Agujeros, radios pequeños, materiales duros y pieza de grande superficie son otras tantas dificultades suplementarias para el control de cobertura.

Es la razón por la cual MIC a desarrollado el procedimiento **PEENSCAN®** que utiliza un barniz fluorescente **DYESCAN®**. **PEENSCAN®** es idoneo para medir la uniformidad y la tasa de cobertura en condiciones difíciles. El color amarillo verdoso fluorescente no es visible en condiciones normales de iluminación y el control se debe hacer bajo luz UV.

El barniz puede ser aplicado por inmersión, con pincel o por pulverización sobre la pieza que se quiere analizar. A continuación, la superficie cubierta está shot peenizada y los impactos de bolas quitan el barniz a tasa proporcional a la tasa de cobertura real. Cuando la pieza vuelve a estar controlada bajo luz UV, las heterogeneidades de cobertura aparecen de manera clara. Se pueden, entonces, ajustar los parámetros de shot peening hasta que el procedimiento **PEENSCAN®** confirme el martilleo completo de la zona .

Las **FIGURAS 12-9A hasta 12-9C** muestran el principio del procedimiento del **PEENSCAN®**. Las figuras son simulaciones informaticas de una pala de turbina, el barniz fluorescente está representado en verde (amarillo verdoso bajo UV). A medida que los impactos de shot peening quitan el barniz (de verde), el material (azul) es más y más visible, hasta indicar la cobertura completa.

El proceso de control **PEENSCAN®** a demostrado ser superior al control por lupa con amplificación x 10.



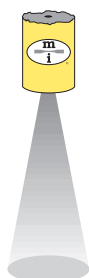
EQUIPO DE SHOT PEENING AUTOMATIZADO

En el mundo entero, las fabricas MIC están equipadas de máquinas de Shot Peening automatizadas y semejantes. Cuando es necesario, esa red permite duplicación o traslado eficaz, económico y fiable de un proceso de shot peening entre dos fabricas MIC.

MIC propone también el shot peening controlado por ordenador (SPCO).

El SPCO está destinado a las piezas críticas que necesitan una grabación de los datos además de nuestro certificado de conformidad a las especificaciones de shot peening(AMS-S-13165, MIL-S-13165C, AMS 2430, NFL 06831/832, etc..)

Les piezas críticas que integran el shot peening desde el diseño deben utilizar el SPCO tal y como es especificado el la norma AMS 2432 por ejemplo.



MIC a desarrollado máquinas auto-controladas por ordenador capaces de presentar sobre pantalla, controlar, y de documentar los parámetros siguientes del procedimiento de shot peening :

- Presión de aire y caudal de bolas a cada boquilla
- Velocidad de rotación y caudal de bolas a cada turbina
- Velocidad de rotación y/o de traslación de la pieza
- Velocidad de desplazamiento de las boquillas
- Tiempo de ciclo.

Estos parámetros están vigilados de manera permanente y comparados a valores límites que están programados. Si se nota un desvío, la máquina se para automáticamente al segundo e indicará la naturaleza y la extensión del fallo. La máquina no podrá volver a tomar su ciclo hasta que no corrijan los parámetros. Un informe del histórico del tratamiento se imprime al final del ciclo SPCO. Toda interrupción del procedimiento se grabará en ese documento. Ese informe está archivado por el servicio calidad MIC y queda a disposición para consulta. La **FIGURA 12-10A** presenta una máquina SPCO utilizada para el shot peening de agujeros interiores de piezas aeronáuticas. La **FIGURA 12-10B** presenta una máquina SPCO con boquillas múltiples. Estas dos figuras presentan al lado de cada máquina sus unidades de mando y de control .



FIGURA 12-10A Máquina Controlada por Ordenador, con Lanza, para Shot Peening de Agujeros



FIGURA 12-10B Máquina Controlada por Ordenador con Múltiples Boquillas

ETUDIO DE CASO : APLICACION

EL SPCO AUMENTA LA DURACION DE VIDA DE LAS TURBINAS

El SPCO ha conocido un gran interés cuando la FAA ha valorizado el aumento del potencial de una turbina aeronáutica de 700 a 1500 ciclos de vuelo entre dos revisiones. Esa ventaja ha permitido a este motor concebido para los aviones militares de penetrar el mercado de la aviación civil.

Había muy pocas posibilidades de mejorar sin cambiar el diseño, por eso el fabricante del motor eligió aplicar el shot peening para aumentar la duración de vida de los discos de turbina y de las placas de enfriamiento. El SPCO permitió asegurarse de que todos los parámetros de producción de esas piezas críticas estaban cuidadosamente controlados y reproducidos con mucha precisión [Ref.12.1].



ESPECIFICAR EL SHOT PEENING

La FIGURA 12-11 presenta un árbol dentado armado sobre dos apoyos de un conjunto mecánico. Los dientes exteriores y los radios adyacentes son zonas típicas de inicio de grietas de fatiga de flexión y/o de torsión. En este caso, se debe especificar el shot peening sobre plano de manera siguiente :

- Zona A : shot peening imperativo
- Zona B : sobrepaso autorizado
- Zona C : protección obligatoria.

Las informaciones siguientes deben aparecer sobre el plano :

- Shot peening de los dientes y de los radios adyacentes utilizando bolas MI 110H (BA 300 D) con intensidad de 0.006" - 0.009" A (F 15-22A)
- 100% de cobertura mínima sobre los dientes control por PEENSCAN®.
- Sobrepaso autorizado sobre el diámetro adyacente más importante.
- Protección de los tramos de rodamiento y de la zona central del árbol.
- Shot peening siguiendo la norma AMS-S-13165.

Es importante anotar que si se pide un control sin destrozo, debiera realizarse antes el shot peening. El shot peening tiende a ocultar y/o a cerrar grietas pequeñas de manera superficial, lo que falsea los resultados del control sin destrozo.

Metal improvement Company tiene más de cincuenta años de experiencia en estudio de la elección de los parámetros del shot peening. MIC esta especializado en la elección del tipo de bolas y de las intensidades apropiadas para todas las aplicaciones sobre la corrosión bajo tensión y/o fatiga. Existe una lista de los servicios técnicos del mundo entero al final de este manual técnico.

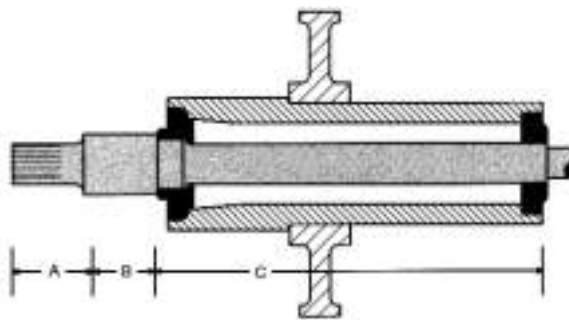
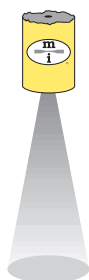


FIGURA 12-11 Dibujo de Montaje de un Eje Estriado Exigiendo un Shot Peening

REFERENCIAS:

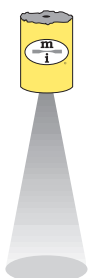
12.1 Internal Metal Improvement Co. Memo



1. "Shot Peening of Engine Components"; J. L. Wandell, MIC, Paper N° 97 ICE-45, ASME 1997.
2. "The Application of Microstructural Fracture Mechanics to Various Metal Surface States"; K. J. Miller and R. Akid, University of Sheffield, UK.
3. "Development of a Fracture Mechanics Methodology to Assess the Competing Mechanisms of Beneficial Residual Stress and Detrimental Plastic Strain Due to Shot Peening"; M. K. Tufft, General Electric Company, International Conference on Shot Peening 6, 1996.
4. "The Significance of Almen Intensity for the Generation of Shot Peening Residual Stresses"; R. Hertzog, W. Zinn, B. Scholtes, Braunschweig University and H. Wohlfahrt, University GH Kassel, Germany.
5. "Computer Monitored Shot Peening: AMEC Writes New AMS Specification"; Impact: Review of Shot Peening Technology, Metal Improvement Company, Inc., 1988.
6. "Three Dimensional Dynamic Finite Element Analysis of Shot-Peening Induced Residual Stresses"; S. A. Meguid, G. Shagal and J. C. Stranart, University of Toronto, Canada, and J. Daly, Metal Improvement Company, Inc.
7. "Instrumented Single Particle Impact Tests Using Production Shot: The Role of Velocity, Incidence Angle and Shot Size on Impact Response, Induced Plastic Strain and Life Behavior"; M. K. Tufft, GE Aircraft Engines, Cincinnati, OH., 1996.
8. "Predicting of the Residual Stress Field Created by Internal Peening of Nickel-Based Alloy Tubes"; N. Hamdane, G. Inglebert and L. Castex, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France.
9. "Three Innovations Advance the Science of Shot Peening"; J. S. Eckersley and T. J. Meister, MIC, Technical Paper, AGMA, 1997.
10. "Tech Report: Surface Integrity"; Manufacturing Engineering, 1989.
11. "Optimization of Spring Performance Through Understanding and Application of Residual Stresses"; D. Hornbach, Lambda Research Inc., E. Lanke, Wisconsin Coil Spring Inc., D. Breuer, Metal Improvement Company, Inc.
12. "Plastically Deformed Depth in Shot Peened Magnesium Alloys"; W. T. Ebihara, U. S. Army, N. F. Fiore and M. A. Angelini, University of Notre Dame.
13. "Improving the Fatigue Crack Resistance of 2024-T351 Aluminium Alloy by Shot Peening"; E. R. del Rios, University of Sheffield, and M. Trooll and A. Levers, British Aerospace Airbus, England.
14. "Fatigue Crack Initiation and Propagation on Shot-Peened Surfaces in a 316 Stainless Steel"; E. R. del Rios, A. Walley and M. T. Milan, University of Sheffield, England, and G. Hammersley, Metal Improvement Company.
15. "Characterization of the Defect Depth Profile of Shot Peened Steels by Transmission Electron Microscopy"; U. Martin, H. Oettel, Freiberg University of Mining and Technology, and I. Altenberger, B. Scholtes and K. Kramer, University Gh Kassel, Germany.
16. "Essais Turbomeca Relatifs au Grenaillage de l'Alliage Base Titane TA6V"; A. Bertoli, Turbomeca, France.
17. "Effect of Microstrains and Particle Size on the Fatigue Properties of Steel"; W. P. Evans and J. F. Millan, The Shot Peener, Vol. II, Issue 4.
18. "Overcoming Detrimental Residual Stresses in Titanium by the Shot Peening Process"; T. J. Meister, Metal Improvement Company, Inc.
19. "The Effect of Shot Peening on Calculated Hydrogen Surface Coverage of AISI 4130 Steel"; I. Chatteraj, National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur, India, and B. E. Wilde, The Ohio State University, Columbus, OH. Pergamon Press plc, 1992.
20. "Effect of Shot Peening on Delayed Fracture of Carburized Steel"; N. Hasegawa, Gifu University, and Y. Watanabe, Toyo Seiko Co. Ltd., Japan.
21. "New Studies May Help an Old Problem. Shot Peening: an Answer to Hydrogen Embrittlement?"; J. L. Wandell, Metal Improvement Company, Inc.



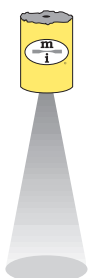
22. "The Effects of Shot Peening on the Fatigue Behaviour of the Ni-base Single Crystal Superalloy CMSX-4"; J. Hou and W. Wei, University of Twente, Netherlands.
23. "Effect of Shot Peening Parameters on Fatigue Influencing Factors"; A. Niku-Lari, IITT, France.
24. "Weld Fatigue Life Improvement Techniques" (Book); Ship Structure Committee, Robert C. North, Rear Admiral, U. S. Coast Guard, Chairman.
25. "Controlled Shot Peening as a Pre-Treatment of Electroless Nickel Plating"; G. Nickel, Metal Improvement Company, Electroless Nickel '95.
26. "Effects of Surface Condition on the Bending Strength of Carburized Gear Teeth"; K. Inoue and M. Kato, Tohoku University, Japan, S. Lyu, Chonbuk National University, Republic of Korea, M. Onishi and K. Shimoda, Toyota Motor Corporation, Japan, 1994 International Gearing Conference.
27. "Aircraft Applications for the Controlled Shot Peening Process"; R. Kleppe, MIC, Airframe/Engine Maintenance and Repair Conference and Exposition, Canada, 1997.
28. "Prediction of the Improvement in Fatigue Life of Weld Joints Due to Grinding, TIG Dressing, Weld Shape Control and Shot Peening"; P. J. Haagensen, The Norwegian Institute of Technology, A. Drigen, T Slind and J. Orjaseter, SINTEF, Norway.
29. "Increasing Fatigue Strength of Weld Repaired Rotating Elements"; W. Welsch, Metal Improvement Company, Inc.
30. "B 737 Horizontal Stabilizer Modification and Repair"; Alan McGreal, British Airways and Roger Thompson, Metal Improvement Company, Inc.
31. "Residual Stress Characterization of Welds Using X-Ray Diffraction Techniques"; J. A. Pinault and M. E. Brauss, Proto Manufacturing Ltd., Canada and J. S. Eckersley, Metal Improvement Company, Inc.
32. "Towards a Better Fatigue Strength of Welded Structures"; A. Bignonnet, Fatigue Design, Mechanical Engineering Publications, London, England.
33. "ABB Bogie Shot-Peening Demonstration: Determination of Residual Stresses in a Weld With and Without Shot-Peening"; P. S. Whitehead, Stresscraft Limited, England.
34. "The Application of Controlled Shot Peening as a Means of Improving the Fatigue Life of Intramedullary Nails Used in the Fixation of Tibia Fractures"; M. D. Schafer, State University of New York at Buffalo.
35. "Improvement in the Fatigue Life of Titanium Alloys"; L. Wagner and J. K. Gregory, Advanced Materials and Processes, 1997.
36. "Effet du Grenaillage sur la Tenue en Fatigue Vibratoire du TA6V"; J. Y. Guedou, S.N.E.C.M.A., France.
37. "Fretting Fatigue and Shot Peening"; A. Bignonnet et al., International Conference of Fretting Fatigue, Sheffield, England, 1993.
38. "Influence of Shot Peening on the Fatigue of Sintered Steels under Constant and Variable Amplitude Loading"; C. M. Sonsino and M. Koch, Darmstadt, Germany.
39. "Evaluation of the Role of Shot Peening and Aging Treatments on Residual Stresses and Fatigue Life of an Aluminum Alloy"; H. Allison, Virginia Polytechnic Institute, VA.
40. "A Survey of Surface Treatments to Improve Fretting Fatigue Resistance of Ti-6Al-4V"; I. Xue, A. K. Koul, W. Wallace and M. Islam, National Research Council, and M. Bibby, Carlton University, Canada, 1995.
41. "Gearing Up For Higher Loads"; Impact - Review of Shot Peening Technology, Metal Improvement Company, Inc.
42. "Belleville Disk Springs"; Product News, Power Transmission Design, 1996.
43. "Improvement in Surface Fatigue Life of Hardened Gears by High-Intensity Shot Peening"; D. P. Townsend, Lewis Research Center, NASA, Sixth International Power Transmission Conference, 1992.



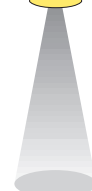
44. "Review of Canadian Aeronautical Fatigue Work 1993-1995"; D. L. Simpson, Institute for Aerospace Research, National Research Council of Canada.
45. "A Review of Australian and New Zealand Investigations on Aeronautical Fatigue During the Period of April 1993 to March 1995"; J. M. Grandage and G. S. Jost, editors, Department of Defense, Australia and New Zealand.
46. "Shot Peening to Increase Fatigue Life and Retard Stress Corrosion Cracking"; P. Dixon Jr., Materials Week, American Society for Metals, 1993.
47. "The Effect of Hole Drilling on Fatigue and Residual Stress Properties of Shot-Peened Aluminum Panels"; J. Chadhuri, B. S. Donley, V. Gondhalekar, and K. M. Patni, Journal of Materials Engineering and Performance, 1994.
48. "Shot Peening, a Solution to Vibration Fatigue"; J. L. Wandell, MIC, 19th Annual Meeting of The Vibration Institute, USA, 1995.
49. "GE Dovetail Stress Corrosion Cracking Experience and Repair"; C. DeCesare, S. Koenders, D. Lessard and J. Nolan, General Electric Company, Schenectady, New York.
50. "Arresting Corrosion Cracks in Steam Turbine Rotors"; R. Chetwynd, Southern California Edison.
51. "Rotor Dovetail Shot Peening"; A. Morson, Turbine Technology Department, General Electric Company, Schenectady, NY.
52. "Stress Corrosion Cracking: Prevention and Cure"; Impact - Review of Shot Peening Technology, MIC 1989.
53. "The Application for Controlled Shot Peening for the Prevention of Stress Corrosion Cracking (SCC)"; J. Daly, Metal Improvement Company, Inc., NACE Above Ground Storage Tank Conference, 1996.
54. "The Use of Shot Peening to Delay Stress Corrosion Crack Initiation on Austenitic 8Mn8Ni4Cr Generator End Ring Steel"; G. Wigmore and L. Miles, Central Electricity Generating Board, Bristol, England.
55. "Steam Generator Shot Peening"; B&W Nuclear Service Company, Presentation for Public Service Electric & Gas Company, 1991.
56. "The Prevention of Stress Corrosion Cracking by the Application of Controlled Shot Peening"; P. O'Hara, Metal Improvement Company, Inc.
57. "Designing Components Made of High Strength Steel to Resist Stress Corrosion Cracking Through the Application of Controlled Shot Peening"; M. D. Shafer, Department of Mechanical Engineering, Buffalo, NY, The Shot Peener, Volume 9, Issue 6.
58. "Shot Peening for the Prevention of Stress Corrosion and Fatigue Cracking of Heat Exchangers and Feedwater Heaters"; C. P. Diepart, Metal Improvement Company, Inc.
59. "Shot Peening: a Prevention to Stress Corrosion Cracking – a Case Study"; S. Clare and J. Wolstenholme
60. "Thermal Residual Stress Relaxation and Distortion in Surface Enhanced Gas Turbine Engine Components"; P. Prevey, D. Hornbach and P. Mason, Lambda Research, AMS Materials Week, 1997.
61. "EDF Feedback Shot-Peening on Feedwater Plants Working to 360 °C – Prediction Correlation and Follow-up of Thermal Stresses Relaxation"; J. P. Gauchet, EDF, J. Barrallier, ENSAM, Y. LeGuernic, MIC, France.
62. "EDF Feedback on French Feedwater Plants Repaired by Shot Peening and Thermal Stresses Relaxation Follow-up"; J. P. Gauchet and C. Reversat, EDF, Y. LeGuernic, MIC, J. L. LeBrun, LM# URA CNRS 1219, L. Castex and L. Barrallier, ENSAM, France.
63. "Effect of Small Artificial Defects and Shot Peening on the Fatigue Strength of Ti-Al-4V Alloys at Elevated Temperatures"; Y. Kato, S. Takafuji and N. Hasegawa, Gifu University, Japan.

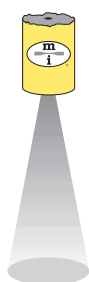


64. "Investigation on the Effect of Shot Peening on the Elevated Temperature Fatigue Behavior of Superalloy"; C. Yaoming and W. Renzhi, Institute of Aeronautical Materials, Beijing, China.
65. "Effect of Shot Peening and Post-Peening Heat Treatments on the Microstructure, the Residual Stresses and Deuterium Uptake Resistance of Zr-2.5Nb Pressure Tube Material"; K. F. Amouzouvi, et al, AECL Research, Canada.
66. "Transmission Components, Gears – CASE Finishing"; Metal Improvement Company, Inc.
67. "Steam Generator Peening Techniques"; G. M. Taylor, Nuclear News, 1987.
68. "Shot Peening Versus Laser Shock Processing"; G. Banas, F.V. Lawrence Jr., University of Illinois, IL.
69. "Lasers Apply Shock for Strength"; J. Daly, Metal Improvement Company, Inc., The Update, Page 6, Ballistic Missile Defense Organization, 1997.
70. "Surface Modifications by Means of Laser Melting Combined with Shot Peening: a Novel Approach"; J. Noordhuis and J. TH. M. De Hosson, Acta Metall Mater Vol. 40, Pergamon Press, UK.
71. "Laser Shock Processing of Aluminium Alloys. Application to High Cycle Fatigue Behaviour"; P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien, H. P. Lieurade, Materials Science and Engineering, Elsevier Science S.A. 1996, UK.
72. "Laser Peening of Metals – Enabling Laser Technology"; C. B. Dane and L. A. Hackel, Lawrence Livermore National Laboratory, and J. Daly and J. Harrison, Metal Improvement Company, Inc.
73. "Laser Induced Shock Waves as Surface Treatment of 7075-T7351 Aluminium Alloy"; P. Peyre, P. Merrien, H. P. Lieurade, and R. Fabbro, Surface Engineering, 1995.
74. "Effect of Laser Surface Hardening on Permeability of Hydrogen Through 1045 Steel"; H. Skrzypek, Surface Engineering, 1996.
75. "Stop Heat from Cracking Brake Drums"; Managers Digest, Construction Equipment, 1995.
76. "The Ultra-Precision Flappers... Shot Peening of Very Thin Parts"; Valve Division, Impact – a Review of Shot Peening Technology, Metal Improvement Company, Inc., 1994.
77. "The Aging Aircraft Fleet: Shot Peening Plays a Major Role in the Rejuvenation Process"; Impact – Review of Shot Peening Technology, Metal Improvement Company, Inc.
78. "Sterilization and Sanitation of Polished and Shot-Peened Stainless-Steel Surfaces"; D. J. N. Hossack and F. J. Hooker, Huntingdon Research Centre, Ltd., England.
79. "Shot Peening Parameters Selection Assisted by Peenstress Software"; Y. LeGuernic, Metal Improvement Company, Inc.
80. "Process Controls: the Key to Reliability of Shot Peening"; J. Mogul and C. P. Diepart, MIC, Industrial Heating, 1995.
81. "Innovations in Controlled Shot Peening"; J. L. Wandell, Metal Improvement Company, Inc., Springs, 1998.
82. "Computer Monitored Shot Peening, an Update"; J. R. Harrison, Metal Improvement Company, Inc., 1996 USAF Aircraft Structural Integrity Conference.
83. "Shot Peening of Aircraft Components – NAVAIR Instruction 4870.2"; Naval Air System Command, Department of the Navy, USA.
84. "A Review of Computer-Enhanced Shot Peening"; J. Daly and J. Mogul, Metal Improvement Company, Inc., The Joint Europe-USA Seminar on Shot Peening, USA, 1992.
85. "Shot Peening – Process Controls, the Key to Reliability"; J. Mogul and C. P. Diepart, Metal Improvement Company, Inc.
86. "The Implementation of SPC for the Shot Peening Process"; Page 15, Quality Breakthrough, a Publication for Boeing Suppliers, 1993.



87. "Peenstress Software Selects Shot Peening Parameters"; Y. LeGuernic and J. S. Eckersley, Metal Improvement Company.
88. "The Development of New Type Almen Strip for Measurement of Peening Intensity on Hard Shot Peening"; Y. Watanabe et al, Gifu University, Japan.
89. "Interactive Shot Peening Control"; D. Kirk, International Conference on Shot Peening 5, 1993.
90. "Shot Peening: Techniques and Applications"; (Book) K. J. Marsh, Editor, Engineering Materials Advisory Services Ltd., England.
91. "Evaluation of Welding Residual Stress Levels Through Shot Peening and Heat Treating"; M. Molzen, Metal Improvement Co., Inc, D. Hornbach, Lambda Research, Inc.
92. "Effect of Shot Peening of Stress Corrosion Cracking on Austenitic Stainless Steel"; J. Kritzler, Metal Improvement Co., Inc.
93. "An Analytical Comparison of Atmosphere and Vacuum Carburizing Using Residual Stress and Microhardness Measurements"; D. Breuer, Metal Improvement Co., Inc, D. Herring, The Herring Group, Inc., G. Lindell, Twin Disc, Inc., B. Matlock, TEC, Inc.





UNITED STATES

WORLD SERVICE HEADQUARTERS

10 Forest Avenue
Paramus, NJ 07652
(201) 843-7800
(201) 843-3460 fax
www.metalimprovement.com
METALIMP@ix.netcom.com

ARIZONA

SHOT PEENING
103 S. 41st Avenue
Phoenix, AZ 85009
(602) 278-2811
(602) 278-3911 fax

CALIFORNIA

LASERSHOTSM PEENING
7655 Longard Road
Livermore, CA 94550
(925) 960-1090
(925) 960-1093 fax

SHOT PEENING
3239 E. 46th Street
Vernon, CA 90058
(323) 585-2168
(323) 585-0157 fax

SHOT PEENING
2588-A Industry Way
Lynwood, CA 90262
(323) 563-1533
(323) 563-2105 fax

SHOT PEENING
2151 S. Hathaway
Santa Ana, CA 92705
(714) 546-4160
(714) 546-8643 fax

CONNECTICUT

SHOT PEENING
145 Addison Road
Windsor, CT 06095
(860) 688-6201
(860) 285-8809 fax

*VALVE REEDS,
PRECISION STAMPINGS*
98 Filley Street
Bloomfield, CT 06002
(860) 243-2220
(860) 242-7292 fax

FLORIDA

SHOT PEENING
1940 N.W. 70th Avenue
Miami, FL 33126
(305) 592-5960
(305) 477-9648 fax

ILLINOIS

SHOT PEENING
678 Winthrop Avenue
Addison, IL 60101
(630) 543-4950
(630) 543-8075 fax

INDIANA

SHOT PEENING
5945 W. 84th Street,
Ste. D
Indianapolis, IN 46278
(317) 875-6030
(317) 875-6044 fax

HEAT TREATING
3724 Maumee Avenue
Fort Wayne, IN 46854
(219) 423-1691
(219) 422-2656 fax

KANSAS

HEAT TREATING
1019 S. McLean Boulevard
Wichita, KS 67213
(316) 267-0239
(316) 267-7904 fax

HEAT TREATING
1009 South West Street
Wichita, KS 67213
(316) 943-3288
(316) 943-3025 fax

HEAT TREATING
1618 Ida
Wichita, KS 67211
(316) 267-8201
(316) 267-5735 fax

SHOT PEENING
440 North West Road
Wellington, KS 67152
(620) 326-5509
(620) 326-6043 fax

LOUISIANA

SHOT PEENING, HEAT TREATING
116 Southpark Road
Lafayette, LA 70508
(337) 837-9273
(337) 837-2505 fax

MASSACHUSETTS

SHOT PEENING
One Nablus Road
Wakefield, MA 01880
(781) 246-3848
(781) 246-4521 fax

MICHIGAN

SHOT PEENING
30100 Cypress Drive
Romulus, MI 48174
(734) 728-8600
(734) 729-8605 fax

MINNESOTA

SHOT PEENING
8630 Monticello Lane
Maple Grove, MN 55369
(763) 425-2400
(763) 425-4669 fax

NEW JERSEY

HEAT TREATING
304 Cox Street
Roselle, NJ 07203
(908) 245-0717
(908) 245-6255 fax

SHOT PEENING
472 Barell Avenue
Carlstadt, NJ 07072
(201) 935-1800
(201) 935-8670 fax

NEW YORK

SHOT PEENING
195 Field Street
W. Babylon, NY 11704
(631) 694-8770
(631) 694-8775 fax

NORTH CAROLINA

SHOT PEENING
500 Spring Brook Road
Charlotte, NC 28217
(704) 525-3818
(704) 525-3118 fax

OHIO

SHOT PEENING
11131 Lushek Drive
Blue Ash, OH 45241
(513) 489-6484
(513) 489-6499 fax

SHOT PEENING
1652 E. Highland Road
Twinsburg, OH 44087
(330) 425-1490
(330) 425-1494 fax

HEAT TREATING
1515 Universal Road
Columbus, OH 43207
(614) 444-1181
(614) 444-0421 fax

HEAT TREATING
431 W. Wilson Street
Salem, OH 44460
(330) 337-7671
(330) 337-6074 fax

PENNSYLVANIA

SHOT PEENING
3434 State Road
Bensalem, PA 19020
(215) 638-0888
(215) 638-2885 fax

HEAT TREATING
270 Emig Road
Emigsville, PA 17318
(717) 767-6757
(717) 764-0129 fax

TEXAS

SHOT PEENING
1450 Avenue S
Grand Prairie, TX 75050
(972) 641-8011
(972) 660-3692 fax

SHOT PEENING
9410 E. Hardy
Houston, TX 77093
(713) 691-0257
(713) 691-4744 fax

WISCONSIN

SHOT PEENING
8201 N. 87th Street
Milwaukee, WI 53224
(414) 355-6119
(414) 355-9114 fax

CANADA

ONTARIO

SHOT PEENING
105 Alfred Kuehne Boulevard
Brampton, Ontario L6T 4K3
(905) 791-8002
(905) 791-4490 fax

EUROPE

UNITED KINGDOM

SHOT PEENING
Ascot Drive
Derby, DE24 8ST
[44] (1332) 756076
[44] (1332) 754392 fax

SHOT PEENING
Hambridge Lane
Newbury, Berkshire RG14 5TU
[44] (1635) 279600
[44] (1635) 279601 fax

SHOT PEENING
Hawarden Airport
Chester Road
Broughton, Chester CH4 0BZ
[44] (1244) 534999
[44] (1244) 521500 fax

SHOT PEENING
Unit 37
Pallion Industrial Estate
Sunderland, Tyne and Wear SR4 6SN
[44] (191) 514 1140
[44] (191) 514 1124 fax

GERMANY

SHOT PEENING
Otto-Hahn-Strasse 3
59423 Unna
[49] (2303) 91880
[49] (2303) 918811 fax

SHOT PEENING
Sommerauer Strasse 6
D-91555 Feuchtwangen
[49] (9852) 67030
[49] (9852) 670311 fax

SHOT PEENING
Hans-Böckler-Str. 5
64521 Gross-Gerau
[49] (6152) 85770
[49] (6152) 857711

SHOT PEENING
Am Piperfenn 7a
14776 Brandenburg
Under Construction

FRANCE

SHOT PEENING
Zone Industrielle d'Amilly
45200 Montargis
[33] 238 855 807
[33] 238 983 376 fax

SHOT PEENING
Zone Industrielle de St. Etienne
Rue de Cazenave
64100 Bayonne
[33] 559 554 252
[33] 559 556 567 fax

BELGIUM

SHOT PEENING
Schurhovenveld 4056
B-3800 Sint-Truiden
[32] 11 69 65 12
[32] 11 69 65 14 fax



METAL IMPROVEMENT COMPANY, INC.

Filial de Curtiss-Wright Corporation